

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira**

**Faculté des Sciences Appliquées**

**Département de Génie Électrique Spécialité**

**Électronique des Systèmes Embarqués**



---

**Mémoire présenté pour l'obtention**

**du diplôme de Master**

**Présenté au**

**Département : Génie Électrique**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Electronique**

**Thème**

---

**Station de Mesure IoT pour la collecte des Données d'un  
champ Photovoltaïque**

---

**Réalisé par :**

Mr KHALFI Oualid

Mr SAYAH Mohammed Abdenmour

**Encadré par :**

Mr CHELBI Salim

**les membres de jury :**

Mr MEDJDOUB Smail

Mr SAIDI Mohammed

## *Remerciements*

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux. Toutes les louanges à Allah et sa bénédiction pour la réalisation de cette recherche.

Louange à Dieu pour sa conciliation, pour la force et la patience qu'il nous a données pour accomplir ce travail. Sans lui, nous n'aurions pas atteint ce grand jour. Tout d'abord, nous remercions notre superviseur Mr. S. Chelbi, pour ses orientations et ses conseils tout au long de cette recherche. Ses orientations et ses conseils ont été précieux tout au long de cette période

Nous tenons à remercier chaleureusement nos familles fières de nous supporter dans nos vies d'étudiants et de faire bon et courage. Leur confiance en nos compétences, leurs encouragements constants et leur présence à nos côtés ont été une source de motivation indispensable lors des moments de doute et de difficulté. Merci à leur affection, leur compréhension et leur soutien moral, nous avons pu poursuivre nos études dans les meilleures conditions et mener à bien ce travail. Qu'elles trouvent ici l'expression de notre sincère gratitude et de notre profond respect.

# *Dédicace*

Nous dédions ce travail à nos parents,  
pour leur soutien et leurs encouragements qui nous ont permis d'atteindre cette  
étape.

À nos frères et sœurs pour leur amour et leur affection,

À notre encadreur, M. S. Chelbi,

À tous nos amis et collègues,

À tous ceux qui nous ont aidés,

À tous ceux que nous aimons,

À tous ceux que nous avons omis de mentionner,

Nous dédions humblement ce travail.

## Résumé

Ce mémoire décrit la conception et la mise en place d'une station de mesure IoT pour la collecte des données d'un champ photovoltaïque. Le système conçu repose sur le microcontrôleur ESP32 et utilise trois capteurs, à savoir :- le DHT11 pour la mesure de la température et de l'humidité ;- le TSL2561 pour l'éclairement solaire ; et- l'INA219 pour la tension, le courant et la puissance du panneau photovoltaïque. Pour assurer la continuité de la transmission des données dans des environnements à connectivité variable, on a mis en place une architecture de communication redondante à trois niveaux : WiFi comme canal principal vers la plateforme ThingSpeak, GSM SIM800L pour l'envoi d'alertes SMS en cas de défaillance WiFi, et LoRa Ra-02 comme solution de secours longue portée. Nous avons développé deux interfaces de supervision : une application de bureau sous React Native et une application mobile Android. Les résultats des expériences ont confirmé la fiabilité et l'exactitude du système, validant ainsi son adéquation pour la surveillance des installations photovoltaïques dans des conditions réelles.

**Mots-clés:** IoT, photovoltaïque, ESP32, surveillance, ThingSpeak, LoRa, GSM, DHT11, TSL2561, INA219.

### Abstract:

This thesis describes the design and implementation of a measurement station based on IoT that allows monitoring and collecting data from a photovoltaic solar energy field. The developed system is based on the ESP32 microcontroller and it includes several sensors to measure relevant electrical and environmental parameters. The DHT11 sensor is used to monitor temperature and humidity, the TSL2561 sensor is used to measure solar irradiance, and the INA219 sensor is used to measure voltage, current and electrical power. A multi-layer communication architecture is used to ensure reliable data transmission under different connectivity conditions. WiFi is a main communication channel to send data to the Thing Speak platform. The GSM SIM800L module is utilised for sending SMS alerts in case of WiFi failure. LoRa Ra-02 technology is implemented as a backup communication solution for long range.

Two monitoring interfaces were also developed, a desktop application and an Android mobile application, that allows real time supervision of the system. The experimental results show that the proposed system is reliable and accurate and able to guarantee a continuous monitoring of the photovoltaic field.

**Keywords:** Internet of Things, photovoltaic system, ESP32, monitoring, ThingSpeak, LoRa, GSM.

## ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى تصميم وإنجاز محطة قياس تعتمد على تقنيات إنترنت الأشياء لمراقبة وجمع البيانات الخاصة ، ويستخدم مجموعة من ESP32 بحقل للطاقة الشمسية الكهروضوئية. يعتمد النظام المقترح على المتحكم الدقيق لقياس درجة الحرارة والرطوبة، DHT11 المستشعرات لقياس أهم المعلومات التشغيلية، حيث تم توظيف المستشعر لمراقبة الجهد والتيار والقدرة INA219 لقياس شدة الإشعاع الشمسي، بالإضافة إلى المستشعر TSL2561 والمستشعر الكهربائي.

ولضمان استمرارية نقل البيانات وموثوقية النظام في مختلف ظروف الاتصال، تم اعتماد بنية اتصالات متعددة المستويات GSM SIM800L ، مع استخدام وحدة ThingSpeak لإرسال البيانات إلى منصة WiFi تعتمد أساسًا على شبكة كحل بديل للاتصالات بعيدة LoRa Ra-02 لإرسال رسائل تنبيه قصيرة عند انقطاع الاتصال بالشبكة، إضافة إلى تقنية المدى.

كما تم تطوير واجهتين لمتابعة البيانات والإشراف على النظام، تتمثلان في تطبيق لسطح المكتب وتطبيق مخصص وقد أظهرت الاختبارات العملية كفاءة النظام المقترح وقدرته على توفير قياسات Android. للهواتف الذكية العاملة بنظام موثوقة مع ضمان استمرارية مراقبة الحقل الكهروضوئي.

، LoRa ، ThingSpeak ، المراقبة ، ESP32، إنترنت الأشياء، الطاقة الشمسية الكهروضوئية ، :الكلمات المفتاحية GSM.

## Table des matières

|                                                                     |   |
|---------------------------------------------------------------------|---|
| Chapitre I Systèmes photovoltaïques et station météorologique ..... | 1 |
| I.1 Introduction : .....                                            | 2 |

|            |                                                         |           |
|------------|---------------------------------------------------------|-----------|
| I.2        | Généralités sur les systèmes photovoltaïques : .....    | 2         |
| I.2.1      | Le rayonnement solaire : .....                          | 2         |
| I.2.2      | Les types de rayonnement solaire : .....                | 3         |
| I.3        | Structure d'une cellule photovoltaïque : .....          | 4         |
| I.3.1      | L'effet photovoltaïque .....                            | 4         |
| I.3.2      | La jonction PN : .....                                  | 5         |
| I.3.3      | La cellule photovoltaïque : .....                       | 6         |
| I.4        | Les types de panneaux photovoltaïques : .....           | 7         |
| I.4.1      | Les Panneaux monocristallins : .....                    | 7         |
| I.4.2      | Panneaux poly cristallins : .....                       | 7         |
| I.4.3      | Panneaux amorphes (couche mince) : .....                | 7         |
| I.4.4      | Panneaux photovoltaïques souples : .....                | 8         |
| I.4.5      | Panneaux de nouvelle génération : .....                 | 8         |
| I.5        | Influence des conditions environnementales : .....      | 8         |
| I.5.1      | Influence de la température : .....                     | 8         |
| I.5.2      | Influence de l'éclairement : .....                      | 9         |
| I.6        | Les stations météorologiques : .....                    | 10        |
| I.6.1      | Définition : .....                                      | 10        |
| I.6.2      | Les types de stations météorologiques : .....           | 11        |
| I.6.3      | Paramètres météorologiques mesurés : .....              | 13        |
| I.7        | La surveillance des systèmes photovoltaïques : .....    | 14        |
| I.8        | Systèmes de surveillance sans fil : .....               | 14        |
| I.8.1      | Wi-Fi : .....                                           | 15        |
| I.8.2      | Réseau GSM : .....                                      | 15        |
| I.9        | Conclusion : .....                                      | 15        |
| <b>II.</b> | <b>Chapitre II Matériel et logiciels utilisés .....</b> | <b>17</b> |

|                                                                      |           |
|----------------------------------------------------------------------|-----------|
| II.1 Introduction :                                                  | 1         |
| II.2 Objectif du projet :                                            | 16        |
| II.3 Cahier des charges :                                            | 16        |
| II.3.1 Spécifications techniques :                                   | 16        |
| II.3.2 Fonctionnalités :                                             | 17        |
| II.3.3 Livrables attendus :                                          | 17        |
| II.4 Conception matérielle :                                         | 17        |
| II.4.1 Le DHT11 :                                                    | 17        |
| II.4.2 Le TSL2561 :                                                  | 19        |
| II.4.3 Capteur de tension et de courant INA219:                      | 21        |
| II.4.4 Module LoRa:                                                  | 23        |
| II.4.5 Le module GSM SIM800L :                                       | 27        |
| II.4.6 Module de développement ESP32 :                               | 29        |
| II.5 Les logiciels et plateformes utilisées :                        | 34        |
| II.5.1 Arduino IDE :                                                 | 34        |
| II.5.2 ThingSpeak :                                                  | 35        |
| II.6 Conclusion :                                                    | 35        |
| <b>III. Chapitre III Conception et réalisation</b>                   | <b>36</b> |
| III.1 Introduction :                                                 | 36        |
| III.2 Objectifs du système de surveillance :                         | 37        |
| III.3 Organigramme et schéma synoptique du système :                 | 37        |
| III.4 Conception et réalisation du système de mesure :               | 40        |
| III .5 Composants et modules nécessaires pour la réalisation :       | 40        |
| III.5.1 Les capteurs : Ils sont détaillés dans le chapitre précédent | 40        |
| III.5.2 Modules de communication :                                   | 40        |
| III.6 Simulation du projet :                                         | 41        |
| III.6.1 Supervision :                                                | 41        |

|                                                                                      |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| III.7 Schéma électrique sous le logiciel “ Cirkit Designer IDE ” :.....              | 45        |
| III.7.1 Branchement de circuit d’émission :.....                                     | 45        |
| III.7.2 Branchement de circuit réception : .....                                     | 46        |
| III.8 Les résultats obtenus : .....                                                  | 47        |
| III.8.1 Vue générale du système réalisé .....                                        | 47        |
| III.8.2 Interfaces de supervision (Interface PC et application mobile Android) ..... | 49        |
| III.8.4 Visualisation des alertes SMS :.....                                         | 53        |
| III.9 Conclusion : .....                                                             | 54        |
| <b>IV. Conclusion Générale.....</b>                                                  | <b>56</b> |

## Liste des figures

## **Chapitre I : Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

|                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I-1: Composants du rayonnement solaire. ....                                            | 04 |
| Figure I-2: Effet photovoltaïque .....                                                         | 05 |
| Figure I-3: Jonction PN .....                                                                  | 06 |
| Figure I-4: Cellule photovoltaïque. ....                                                       | 07 |
| Figure I-5: Caractéristique $I=f(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température ..... | 09 |
| Figure I-6: Caractéristique $P=f(V)$ d'un module pour différentes valeurs de température ..... | 09 |
| Figure I-7: Caractéristique $I(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement ..... | 10 |
| Figure I-8: Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement ..... | 10 |
| Figure I-9: stations météorologiques classique .....                                           | 12 |
| Figure I-10: station météorologique professionnelle .....                                      | 13 |

## **Chapitre II : Matériel et logiciels utilisés**

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure II-1: Le DHT11 .....                                               | 19 |
| Figure II-2: Capteur TSL2691 .....                                        | 21 |
| Figure II-3: Capteur INA219 .....                                         | 21 |
| Figure II-4: Les broches de LoRa RA-02 .....                              | 24 |
| Figure II-5: Schéma de câblage du module LoRa Ra-02 avec l'ESP32 .....    | 25 |
| Figure II-6: Schéma fonctionnel simplifié du SX1278 .....                 | 25 |
| Figure II-7: LoRaTM Packet Structure .....                                | 27 |
| Figure II-8: Le SIM800L .....                                             | 28 |
| Figure II-9: Diagramme fonctionnel du SIM800L .....                       | 29 |
| Figure II-10: Carte ESP32-DevKitC V4 avec le module ESP32-WROOM-32E ..... | 31 |
| Figure II-11: Les broches de la carte ESP32-DevKitC V4 .....              | 32 |
| Figure II-12: Arduino IDE .....                                           | 34 |

## **Chapitre III : Conception et réalisation**

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III- 1: Schéma synoptique du système de surveillance photovoltaïque .....              | 38 |
| Figure III-2: L'organigramme de fonctionnement général.....                                   | 39 |
| Figure III-3: Branchement de DHT11 .....                                                      | 41 |
| Figure III- 4: Les résultats de température et humidité affichés sur la plateforme ThingSpeak | 41 |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III-5:Branchement de TSL2561 .....                                                    | 42 |
| Figure III-6:supervision les valeurs de capteur. ....                                        | 43 |
| Figure III-7:Branchement de INA219 .....                                                     | 44 |
| Figure III-8:Les résultats de tension et courant affichés sur la plateforme ThingSpeak ..... | 44 |
| Figure III- 9:Circuit d'émission créé par cirkits designer IDE .....                         | 46 |
| Figure III-10:Circuit de réception complet créé par designer IDE .....                       | 47 |
| Figure III-11:Circuit du nœud émetteur .....                                                 | 48 |
| Figure III-12:Circuit du nœud récepteur. ....                                                | 49 |
| Figure III-13:Interface de l'application PC .....                                            | 50 |
| Figure III-14:Résultats affichés sur l'interface PC .....                                    | 50 |
| Figure III-15:Interface de l'application .....                                               | 51 |
| Figure III-16:Supervision des paramètres et résultats des capteurs dans l'application .....  | 52 |
| Figure III-17:Représentation graphique des données acquises par le système .....             | 53 |
| Figure III-18:Les résultats obtenus via un SMS .....                                         | 54 |

## Liste des Tableaux

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1:Caractéristiques Principales de DHT11 .....                            | 18 |
| Tableau 2:Valeurs de température et d'humidité enregistrées sur ThingSpeak ..... | 42 |
| Tableau 3:Valeurs d'éclairement enregistrées sur ThingSpeak .....                | 43 |
| Tableau 4:Valeurs de tension et de courant enregistrées sur ThingSpeak .....     | 45 |

## Listes des Acronymes et Symboles

### Liste des Acronymes :

|              |                                                                  |
|--------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>ADC</b>   | Analog-to-Digital Converter (Convertisseur analogique-numérique) |
| <b>APK</b>   | Android Package Kit (Format d'installation Android)              |
| <b>BLE</b>   | Bluetooth Low Energy (Bluetooth basse consommation)              |
| <b>BW</b>    | Bandwidth (Bande passante)                                       |
| <b>CR</b>    | Coding Rate (Taux de codage)                                     |
| <b>CRC</b>   | Cyclic Redundancy Check (Contrôle de redondance cyclique)        |
| <b>CSS</b>   | Chirp Spread Spectrum (Étalement de spectre par chirp)           |
| <b>CTN</b>   | Coefficient de Température Négatif                               |
| <b>EMI</b>   | Electromagnetic Interference (Interférence électromagnétique)    |
| <b>ESP32</b> | Espressif Systems Processor 32-bit                               |

|                       |                                                                             |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| <b>FEC</b>            | Forward Error Correction (Correction d'erreur anticipée)                    |
| <b>GND</b>            | Ground (Masse)                                                              |
| <b>GPIO</b>           | General Purpose Input/Output (Entrée/Sortie à usage général)                |
| <b>GPRS</b>           | General Packet Radio Service                                                |
| <b>GSM</b>            | Global System for Mobile communications                                     |
| <b>HTTP</b>           | HyperText Transfer Protocol                                                 |
| <b>I<sup>2</sup>C</b> | Inter-Integrated Circuit (Bus de communication série)                       |
| <b>IDE</b>            | Integrated Development Environment (Environnement de développement intégré) |
| <b>IEEE</b>           | Institute of Electrical and Electronics Engineers                           |
| <b>IoT</b>            | Internet of Things (Internet des Objets)                                    |
| <b>LNA</b>            | Low Noise Amplifier (Amplificateur à faible bruit)                          |
| <b>LoRa</b>           | Long Range (Communication longue portée)                                    |
| <b>PCB</b>            | Printed Circuit Board (Circuit imprimé)                                     |
| <b>PN</b>             | Jonction semi-conducteur Positif-Négatif                                    |
| <b>PV</b>             | Photovoltaïque                                                              |
| <b>PWM</b>            | Pulse Width Modulation (Modulation de largeur d'impulsion)                  |
| <b>RF</b>             | Radio Frequency (Radiofréquence)                                            |
| <b>RH</b>             | Relative Humidity (Humidité relative)                                       |
| <b>ROM</b>            | Read-Only Memory (Mémoire morte)                                            |
| <b>RX</b>             | Receiver (Récepteur)                                                        |
| <b>SCL</b>            | Serial Clock Line (Horloge I <sup>2</sup> C)                                |
| <b>SDA</b>            | Serial Data Line (Données I <sup>2</sup> C)                                 |
| <b>SF</b>             | Spreading Factor (Facteur d'étalement LoRa)                                 |
| <b>SMS</b>            | Short Message Service (Service de messages courts)                          |
| <b>SNR</b>            | Signal-to-Noise Ratio (Rapport signal sur bruit)                            |
| <b>SoC</b>            | System on Chip (Système sur puce)                                           |
| <b>SPI</b>            | Serial Peripheral Interface (Bus série périphérique)                        |
| <b>SRAM</b>           | Static Random Access Memory (Mémoire vive statique)                         |
| <b>TCP/IP</b>         | Transmission Control Protocol / Internet Protocol                           |
| <b>TX</b>             | Transmitter (Émetteur)                                                      |
| <b>UART</b>           | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter                                 |
| <b>USB</b>            | Universal Serial Bus                                                        |
| <b>VCC</b>            | Voltage Common Collector (Tension d'alimentation)                           |
|                       | <b>WiFi</b><br>Wireless Fidelity (Réseau local sans fil IEEE 802.11)        |

### Liste des Symboles :

|                               |                                                                                |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>°C</b>                     | Degré Celsius — unité de température                                           |
| <b>°F</b>                     | Degré Fahrenheit — unité de température                                        |
| <b>B (<math>\beta</math>)</b> | Constante Bêta — caractéristique de la thermistance CTN (Kelvin)               |
| <b>c</b>                      | Vitesse de la lumière (m/s)                                                    |
| <b>dB</b>                     | Décibel — unité de niveau de signal                                            |
| <b>dBm</b>                    | Décibel-milliwatt — puissance de signal radio                                  |
| <b>E</b>                      | Énergie d'un photon (Joule)                                                    |
| <b>h</b>                      | Constante de Planck (J·s)                                                      |
| <b>hPa</b>                    | Hectopascal — unité de pression atmosphérique                                  |
| <b>K</b>                      | Kelvin — unité de température absolue (SI)                                     |
| <b>kbps</b>                   | Kilobits par seconde — débit de données                                        |
| <b>kHz</b>                    | Kilohertz — unité de fréquence                                                 |
| <b>km/h</b>                   | Kilomètre par heure — vitesse du vent                                          |
| <b>lux</b>                    | Unité d'éclairement lumineux (SI)                                              |
| <b>mA</b>                     | Milliampère — unité de courant électrique                                      |
| <b>Mbps</b>                   | Mégabits par seconde — débit de données                                        |
| <b>MHz</b>                    | Mégahertz — unité de fréquence                                                 |
| <b>MJ/m<sup>2</sup></b>       | Mégajoule par mètre carré — énergie solaire incidente                          |
| <b>m/s</b>                    | Mètre par seconde — vitesse du vent                                            |
| <b>mW</b>                     | Milliwatt — unité de puissance                                                 |
| <b>Pa</b>                     | Pascal — unité de pression atmosphérique (SI)                                  |
| <b>R<sub>0</sub></b>          | Résistance nominale de la thermistance à température de référence ( $\Omega$ ) |
| <b>R<sub>s</sub></b>          | Débit symbole LoRa                                                             |
| <b>R<sub>t</sub></b>          | Résistance de la thermistance à la température T ( $\Omega$ )                  |
| <b>T</b>                      | Température mesurée (Kelvin)                                                   |
| <b>T<sub>0</sub></b>          | Température de référence (298,15 K = 25 °C)                                    |
| <b>μA</b>                     | Microampère — unité de courant électrique                                      |
| <b>μs</b>                     | Microseconde — unité de temps                                                  |
| <b>V</b>                      | Volt — unité de tension électrique                                             |
| <b>W</b>                      | Watt — unité de puissance électrique                                           |

|                         |                                                        |
|-------------------------|--------------------------------------------------------|
| <b>Wh/m<sup>2</sup></b> | Watt-heure par mètre carré — énergie solaire incidente |
| <b>W/m<sup>2</sup></b>  | Watt par mètre carré — irradiance solaire              |
| <b>%</b>                | Pourcentage — humidité relative                        |
| <b>λ</b>                | Lambda — longueur d'onde                               |
| <b>Ω</b>                | Ohm — unité de résistance électrique                   |

# Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par une sensibilisation croissante aux enjeux environnementaux et par une transition énergétique accélérée, les énergies renouvelables viennent de plus en plus tenir une place centrale dans l'élaboration des stratégies de développement durable. L'énergie solaire photovoltaïque se distingue des autres sources d'énergie par son potentiel considérable, surtout en Algérie, pays doté de l'un des plus grands gisements solaires au monde, avec une durée d'ensoleillement supérieure à 2 500 heures par an sur presque tout son territoire. [1][2]

L'essor des systèmes photovoltaïques a conduit à une demande croissante pour des solutions de surveillance fiables, précises et économiques, permettant de suivre en temps réel les performances de ces installations, de détecter rapidement les éventuelles anomalies et d'optimiser la production d'énergie. À ce titre, l'Internet des Objets (IoT) représente une technologie essentielle permettant la collecte, la transmission et la visualisation à distance des données, tout en diminuant les coûts d'exploitation et de maintenance. [3][4]

Ce travail s'inscrit dans cette perspective et présente la conception et la réalisation d'une station de mesure IoT dédiée à la surveillance d'un champ photovoltaïque. La solution mise en place s'articule autour du microcontrôleur ESP32, et se compose de différents capteurs de mesure — température, humidité, éclairage, tension et courant — et de trois niveaux de communication redondants : WiFi, GSM et LoRa garantissant le maintien de l'acquisition permanente des données même dans les environnements dégradés en connectivité. [4][5] Ce travail est divisé en trois chapitres complémentaires :

Le premier chapitre présente les concepts théoriques de base relatifs aux systèmes photovoltaïques, à l'effet photovoltaïque, aux différents types de panneaux solaires, ainsi qu'aux stations météorologiques et aux technologies de surveillance sans fil. Le deuxième chapitre détaille tous les éléments matériels et logiciels choisis pour la mise en œuvre du système, notamment les capteurs DHT11, TSL2561 et INA219, les modules de communication LoRa Ra-02 et GSM SIM800L, le microcontrôleur ESP32, l'environnement de développement Arduino IDE ainsi que la plateforme cloud ThingSpeak.

Le troisième chapitre présente la conception, la mise en œuvre et la validation expérimentale du système, en détaillant les schémas de câblage, les interfaces de supervision pour PC et Android, ainsi que les résultats expérimentaux des phases de test.

# **Chapitre I Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

## **I.1 Introduction :**

L'énergie électrique représente l'une des formes d'énergie les plus analysées en raison de sa facilité de conversion et de son adaptabilité à une variété de besoins. À l'heure actuelle, elle revêt une importance cruciale dans l'ensemble des domaines de la vie contemporaine, étant donné que la plupart des dispositifs usuels en dépendent directement, qu'ils fonctionnent sous courant continu à basse tension ou sous courant alternatif à haute tension. [6][7]

Toutefois, en raison des enjeux liés à la pollution et au réchauffement climatique, la production d'électricité s'appuie de manière croissante sur des sources alternatives. Parmi celles-ci figurent les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, qui constitue une alternative propre et pérenne visant à atténuer l'impact environnemental des dispositifs de

# **Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

production d'électricité. L'énergie solaire est convertie directement en énergie électrique par le biais des systèmes photovoltaïques.[8][2]

Dans ce cadre, ce chapitre expose des notions générales relatives au système photovoltaïque ainsi qu'aux stations météorologiques, qui interviennent de manière cruciale dans la collecte des paramètres climatiques affectant directement l'efficacité des dispositifs solaires. [9][10]

## **I.2 Généralités sur les systèmes photovoltaïques :**

### **I.2.1 Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire, essentiel au fonctionnement des systèmes photovoltaïques, il constitue l'énergie émise de manière continue par le Soleil sous forme de photons[7][11], dont l'énergie varie en fonction de la longueur d'onde selon la relation suivante:

$$E = h \times \frac{c}{\lambda}$$

Où : **h** : constante de Planck

**c** : vitesse de la lumière       $\lambda$

: la longueur d'onde [42] Ce

rayonnement se divise en trois

principales catégories :

l'infrarouge (représentant

environ 50 % de l'énergie, lié à

la chaleur), le visible (un peu

plus de 40 %) et l'ultraviolet

(moins de 10 %). Le flux solaire

s'élève à environ 1 350 W/m<sup>2</sup>

(constante solaire), toutefois,

après absorption et réflexion par

# Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

---

l'atmosphère, la puissance

incidente à la surface terrestre

n'excède généralement pas 1

000 W/m<sup>2</sup> dans des conditions

optimales, variable en fonction

de la latitude et des conditions

climatiques.

## I.2.2 Les types de rayonnement solaire :

### I.2.2.1 Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct désigne l'énergie solaire parvenant directement du soleil sous forme de rayons quasi parallèles, avant d'être altérée par l'atmosphère.

### I.2.2.2 Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus résulte de la diffusion de la lumière solaire dans l'atmosphère, en particulier par les molécules d'air et les masses nuageuses. Il se produit principalement sous un ciel couvert ou légèrement voilé et se distribue habituellement de manière homogène dans toutes les directions.

Sous certaines conditions, telles que la présence de nuages translucides, une région plus éclatante nommée couronne circumsolaire peut se former autour du soleil, entraînant une augmentation locale de l'intensité lumineuse.

Il convient de souligner que la répartition de ce rayonnement est fortement influencée par la nature, l'épaisseur ainsi que la localisation des nuages. [12]

### I.2.2.3 Le rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi correspond à la fraction de la lumière solaire qui, après avoir frappé la surface terrestre, est renvoyée vers l'atmosphère sans avoir été absorbée, ce phénomène est conditionné par les propriétés de la surface (couleur, texture, composition), en particulier par son albédo, lequel oscille entre 0 (absence de réflexion) et 1 (réflexion complète). [12]

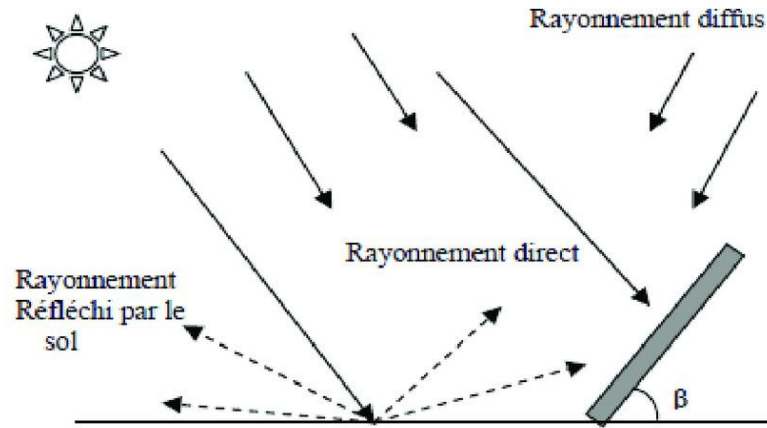


Figure I-1: Composants du rayonnement solaire. [12]

### I.2.2.4 Rayonnement global :

Le rayonnement global désigne la totalité de l'énergie transférée par rayonnement, il englobe simultanément, le rayonnement solaire renvoyé par la surface terrestre ainsi que le rayonnement thermique émis par la Terre en raison de sa température. Autrement dit, il exprime l'équilibre entre l'énergie solaire absorbée et celle réémise vers l'espace. Ce bilan énergétique constitue une donnée fondamentale pour appréhender les mécanismes climatiques de la planète. [12][2]

## I.3 Structure d'une cellule photovoltaïque :

### I.3.1 L'effet photovoltaïque

Le photovoltaïque désigne, de manière succincte, le procédé de conversion directe de la lumière solaire en énergie électrique. Lorsque les rayonnements solaires atteignent les cellules photovoltaïques, ils induisent un déplacement des électrons, engendrant ainsi un courant électrique. Ce phénomène, désigné sous le terme d'effet photoélectrique, constitue le principe fondamental de toute génération d'énergie solaire. [11][13]

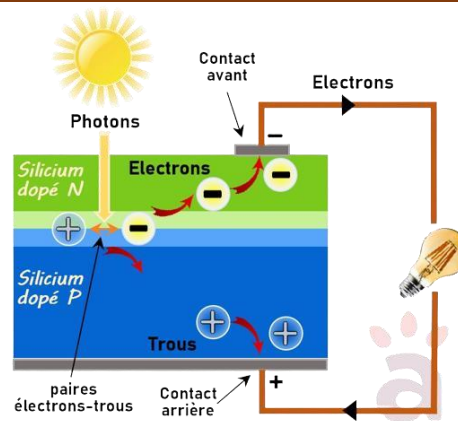


Figure I-2: Effet photovoltaïque [13]

### I.3.2 La jonction PN :

La jonction PN représente le composant essentiel dans le fonctionnement des dispositifs électroniques à semi-conducteurs. Elle résulte de la mise en contact de deux régions dopées de manière distincte : une région de type N, abondante en électrons libres grâce à l'incorporation d'atomes pentavalents, et une région de type P, présentant une concentration élevée de lacunes induite par le dopage avec des atomes trivalents.

Le dopage peut être effectué par diverses méthodes, telles que la diffusion, la croissance épitaxiale ou le bombardement ionique, ce qui permet de maîtriser les caractéristiques électriques du matériau.

La constitution de la jonction PN engendre un champ électrique interne à l'interface des deux régions, conférant ainsi à cette structure des propriétés fondamentales pour la régulation du flux de courant électrique. Ainsi, la jonction PN constitue le fondement de nombreux dispositifs électroniques, notamment les diodes, les transistors et les cellules photovoltaïques.

La jonction PN occupe donc une fonction essentielle dans les applications relatives à l'électronique contemporaine et à la conversion de l'énergie solaire. [11][13]

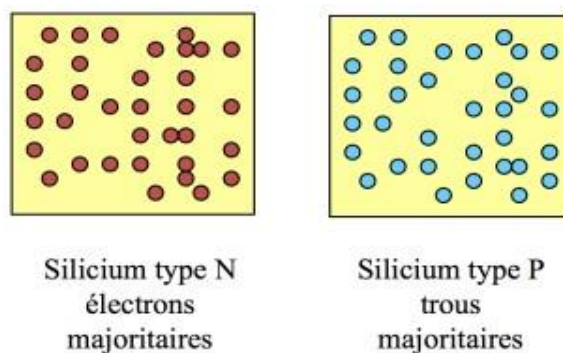


Figure I-3: Jonction PN [13]

# Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

## I.3.3 La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque, désignée aussi sous le terme de photopile, constitue l'unité fondamentale de toute configuration photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semiconducteurs et garantit la conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Sa configuration s'appuie principalement sur une couche mince de semi-conducteur, généralement composée de silicium caractérisé par l'existence d'une bande interdite facilitant la régulation du mouvement des électrons. Cette couche est couplée à une couche antireflet destinée à optimiser l'absorption du rayonnement solaire, ainsi qu'à des contacts métalliques une grille conductrice en surface (cathode) et une électrode métallique à l'arrière (anode), garantissant la collecte du courant électrique.

Les technologies récentes incorporent également des structures réfléchissantes multicouches situées sous le semi-conducteur, ce qui autorise une augmentation de la durée de parcours de la lumière à l'intérieur de la cellule, améliorant par conséquent son efficacité.

Le principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque s'appuie sur l'effet photovoltaïque, phénomène au cours duquel une tension électrique est produite lorsque la cellule est soumise à l'illumination. Cette tension est conditionnée par divers paramètres, notamment la nature du matériau employé, la configuration de la cellule, la température ainsi que son vieillissement, et se situe typiquement entre 0,3 V et 0,7 V. [13][12]

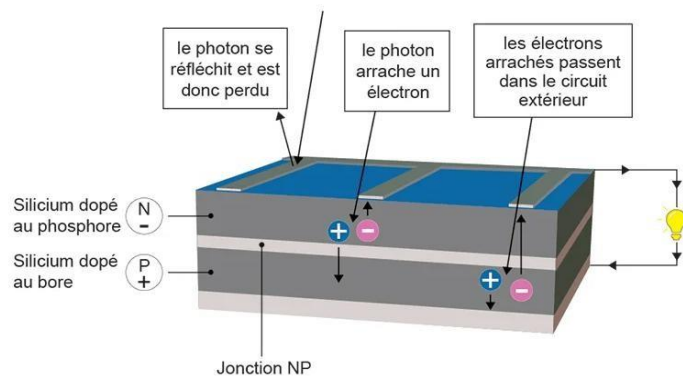


Figure I-4: Cellule photovoltaïque. [13]

## I.4 Les types de panneaux photovoltaïques :

### I.4.1 Les Panneaux monocristallins :

Les panneaux monocristallins sont conçus à partir d'un unique cristal de silicium, ce qui leur assure une structure homogène ainsi qu'une teinte généralement uniforme. Ils affichent un

## **Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

rendement moyen élevé, avoisinant 17 %, ce qui les positionne comme les plus efficaces parmi les technologies conventionnelles. Cependant, leur coût de production demeure important ainsi que leurs performances. se réduisent dans des conditions d'éclairement faible. [14]

### **I.4.2 Panneaux poly cristallins :**

Les panneaux polycristallins, désignés également sous le terme multi cristallins, sont composés de multiples cristaux de silicium perceptibles à la surface. Leur efficacité est légèrement moindre, avoisinant 15 %, toutefois ils présentent un rapport qualité/prix supérieur. La production de ces dispositifs s'appuie fréquemment sur l'utilisation de silicium recyclé, ce qui contribue à diminuer leur coût. À l'instar des monocristaux, leur fabrication est restreinte en présence d'un faible ensoleillement. [14]

### **I.4.3 Panneaux amorphes (couche mince) :**

Les panneaux amorphes sont produits à partir de silicium non cristallin déposé sous forme de couches minces sur différents substrats (verre, métal ou plastique). Leur efficacité est moindre, oscillant entre 5 % et 12 %, néanmoins ils offrent plusieurs avantages :

- Meilleure performance sous faible luminosité,
- Faible sensibilité à la température,
- Coût de production réduit.

Toutefois, ils connaissent une dégradation initiale rapide (environ vingt pour cent de perte au cours des premiers mois), avant de se stabiliser par la suite. [14]

### **I.4.4 Panneaux photovoltaïques souples :**

Les dispositifs photovoltaïques flexibles, habituellement fondés sur la technologie amorphe, se caractérisent par leur souplesse et leur faible poids, autoriser une intégration sur diverses surfaces (toitures, véhicules, bateaux). Ils conviennent particulièrement aux applications mobiles ou itinérantes. Cependant, leur efficacité demeure moindre et leur coût supérieur à celui des panneaux rigides. [14]

### **I.4.5 Panneaux de nouvelle génération :**

Les progrès technologiques ont pour objectif d'optimiser de manière substantielle l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Parmi ces méthodes, l'emploi de concentrateurs solaires, en particulier ceux utilisant des lentilles de Fresnel, permet d'amplifier l'intensité lumineuse et d'obtenir des rendements avoisinant 40 %.

## Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

Parmi les autres avancées, figurent la mise au point de semi-conducteurs novateurs surpassant les performances du silicium, ainsi que l'émergence de concepts tels que la peinture photovoltaïque, apte à générer de l'électricité à partir de la lumière et du rayonnement infrarouge. [15][7]

### I.5 Influence des conditions environnementales :

Les performances des cellules photovoltaïques sont étroitement conditionnées par les paramètres environnementaux, notamment par l'irradiance solaire, relatives à la température et à l'humidité. Ces paramètres conditionnent de manière directe la puissance fournie, l'efficacité énergétique ainsi que la longévité des modules. [16][17]

#### I.5.1 Influence de la température :

La température représente un facteur crucial influençant le comportement des cellules photovoltaïques. Les figures 9 et 10 démontrent le comportement du module sous un éclairage stable de  $1 \text{ W/m}^2$ , présentant des températures comprises entre  $0^\circ\text{C}$  et  $75^\circ\text{C}$ . Il est constaté que le courant s'accroît légèrement avec l'augmentation de la température, tandis que la tension en circuit ouvert diminue. Cette réduction de la tension entraîne une diminution de la puissance maximale délivrée par le module. [17][18]

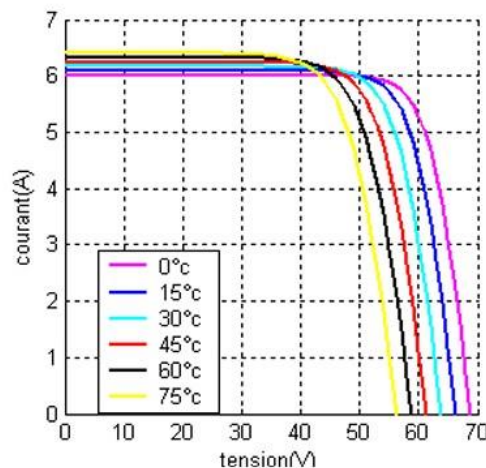


Figure I-5: Caractéristique  $I=f(V)$  d'un module pour différentes valeurs de température [17]

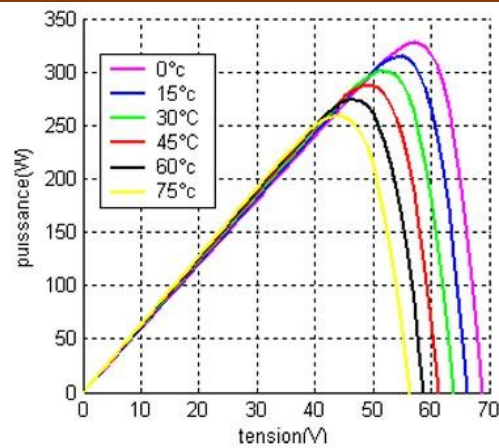


Figure I-6: Caractéristique  $P=f(V)$  d'un module pour différentes valeurs de température[17]

### I.5.2 Influence de l'éclairement :

L'intensité lumineuse constitue un facteur fondamental dans le fonctionnement d'un module photovoltaïque. Lorsque l'irradiance s'accroît, le courant généré par le module augmente de façon notable, alors que la tension ne s'accroît que faiblement. Cette augmentation du courant provoque une hausse significative de la puissance fournie, se traduisant par un déplacement du point de puissance maximale vers des niveaux supérieurs. Ainsi, une intensité lumineuse accrue permet au module photovoltaïque de générer une puissance supérieure, optimisant par conséquent ses performances globales. [16][18]

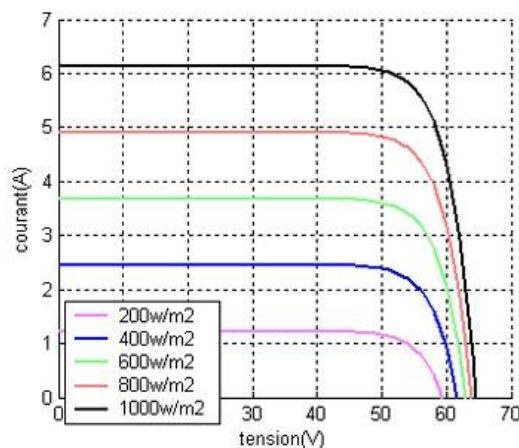


Figure I- 7: Caractéristique  $I(V)$  d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement [16]

# Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

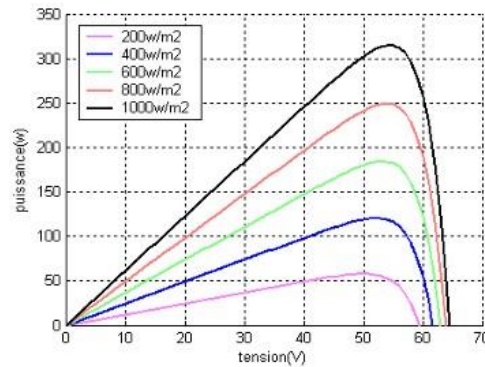


Figure I-8: Caractéristique  $P(V)$  d'un module pour différentes valeurs de l'éclairement [16]

## I.6 Les stations météorologiques :

### I.6.1 Définition :

La météorologie constitue la discipline scientifique dédiée à l'analyse des phénomènes atmosphériques à court terme, principalement au sein des basses couches de l'atmosphère. La météorologie constitue la discipline scientifique dédiée à l'analyse des phénomènes atmosphériques à court terme, principalement au sein des basses couches de l'atmosphère. Il devient envisageable d'approfondir la compréhension des mécanismes atmosphériques, d'optimiser les prévisions et d'étudier les variations climatiques.

Une station météorologique constitue un dispositif regroupant des capteurs destinés à la mesure et à l'enregistrement de paramètres atmosphériques tels que la température, l'humidité, la vitesse du vent et les précipitations. Ces informations sont recueillies, conservées et occasionnellement transmises en vue d'une analyse. [19]

### I.6.2 Les types de stations météorologiques :

#### I.6.2.1 Classique :

Il s'agit de stations météorologiques de dimensions réduites, généralement dotées d'une sonde de température, offrant la possibilité d'analyser les conditions climatiques actuelles et de prévoir leur évolution.

On distingue dans ce domaine deux catégories principales :

- les stations météorologiques locales
- les stations météorologiques régionales [19]

#### I.6.2.1.1 Les stations météorologiques locales :

Les stations météorologiques locales ont pour objectif de fournir des données climatiques exactes concernant un lieu déterminé. Elles sont habituellement dotées d'un baromètre mécanique et servent principalement à la mesure de la température.

## Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

Néanmoins, en fonction des modèles, leurs capacités peuvent être étendues : Certains dispositifs incorporent un hygromètre afin d'évaluer l'humidité ambiante, tandis que certains présentent des données additionnelles telles que les phases lunaires, particulièrement pertinentes en horticulture. Par ailleurs, Certaines stations sont équipées de capteurs externes, autorisant la surveillance de la température ambiante ainsi que la détection de phénomènes tels que le gel ou les conditions orageuses.

### I.6.2.1.2 Les stations météorologiques régionales :

Les stations météorologiques régionales offrent la possibilité de fournir des prévisions fiables s'étendant sur plusieurs jours, généralement de trois à quatre jours, pour une zone géographique spécifique. Elles se fondent sur des données météorologiques officielles pour délivrer des informations exactes.

Plusieurs modèles incorporent en outre des dispositifs d'alerte en présence de conditions météorologiques défavorables. Ce type de station s'avère particulièrement pertinent pour les individus organisant des déplacements, tels que des voyages ou des missions professionnelles, en leur offrant la possibilité de prévoir les conditions météorologiques de la zone sélectionnée.

[19]



Figure I-9: stations météorologiques classique[19]

### I.6.2.2 Professionnelle :

Les stations météorologiques professionnelles sont élaborées afin de fournir des données climatiques d'une grande précision et fiabilité, conformément aux normes internationales. Les stations météorologiques professionnelles sont élaborées afin de fournir des données climatiques d'une grande précision et fiabilité, conformément aux normes internationales.

## Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique

Elles incorporent des capteurs sophistiqués capables de quantifier divers paramètres, notamment la température, l'humidité, la pression, la vitesse du vent, les précipitations et, occasionnellement, la qualité de l'air. Par ailleurs, elles sont équipées de dispositifs de transmission et d'enregistrement des données en temps réel, permettant la couverture étendue de vastes zones via des réseaux de stations interconnectées.

Certaines stations professionnelles intègrent aussi des capacités d'analyse et de notification, ce qui facilite la prise de décision. Ce type de station convient particulièrement aux organismes gouvernementaux, aux entreprises, aux exploitants agricoles, ainsi qu'aux gestionnaires d'infrastructures critiques telles que les aéroports. [19]



Figure I-10: station météorologique professionnelle [19]

### I.6.3 Paramètres météorologiques mesurés :

#### I.6.3.1 La température :

La température correspond au niveau d'énergie thermique contenu dans l'air, elle est associée à l'énergie thermique ainsi qu'au déplacement des particules. Elle est habituellement quantifiée en degrés Celsius (°C), bien que l'unité officielle du Système international soit le kelvin (K). Le degré Fahrenheit (°F) demeure également employé dans certains pays. [19]

#### I.6.3.2 L'humidité :

L'humidité désigne la concentration de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère, elle s'exprime en pourcentage sous la forme d'humidité relative, correspondant au rapport entre la vapeur d'eau effectivement présente et la quantité maximale que l'air est capable de contenir.

Une humidité relative de cent pour cent correspond à un air saturé, propice à la formation de précipitations ou de brouillard, elle est quantifiée à l'aide d'un hygromètre ou d'un psychromètre. [19]

# **Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

## **I.6.3.3 Pression atmosphérique :**

La pression atmosphérique correspond à la force exercée par la colonne d'air située audessus d'un point spécifique. Elle se mesure en pascal (Pa) ou en hectopascal (hPa). Les basses pressions correspondent habituellement à des conditions météorologiques instables, alors que les hautes pressions (au-delà de 1020 hPa) indiquent fréquemment un temps stable et ensoleillé. [19]

## **I.6.3.4 Ensoleillement :**

L'ensoleillement correspond à la quantité d'énergie solaire incidente sur une surface durant une période déterminée. Il est exprimé en mégajoules par mètre carré (MJ/m<sup>2</sup>) ou en wattheures par mètre carré (Wh/m<sup>2</sup>), conformément aux directives émises par les organismes météorologiques internationaux.

## **I.6.3.5 Le vent :**

Le vent correspond au déplacement horizontal de l'air. Il est caractérisé par sa direction et sa vitesse. Cette grandeur est couramment exprimée en mètres par seconde (m/s), en kilomètres par heure (km/h) ou en nœuds. La vitesse du vent est déterminée au moyen d'un anémomètre.

## **I.6.3.6 Les précipitations :**

Les précipitations englobent l'ensemble des formes d'eau, qu'elles soient liquides ou solides, qui se déposent de l'atmosphère à la suite de la condensation. Elles englobent principalement les précipitations telles que la pluie, la neige et la grêle.

- La formation de la pluie résulte de la coalescence de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace qui subissent une fusion au cours de leur descente.
- La neige provient de l'agrégation de cristaux de glace qui constituent les flocons.
- La grêle est formée de particules de glace dont la taille varie et qui peuvent atteindre des vitesses considérables.
- Le grésil désigne des particules qui ont partiellement fondu puis se sont regelées au cours de leur chute. [1][19]

## **I.7 La surveillance des systèmes photovoltaïques :**

La surveillance des installations photovoltaïques s'appuie sur l'emploi d'appareils destinés à quantifier des grandeurs électriques, notamment le courant et la tension, en conjonction avec des modules de contrôle spécialisés. Certains équipements, tels que les modules de type

# **Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

Solarcheck, permettent la surveillance des circuits photovoltaïques afin d'identifier d'éventuelles anomalies. [3][20]

La surveillance des systèmes photovoltaïques s'appuie sur l'emploi d'appareils permettant de mesurer des grandeurs électriques telles que le courant et la tension, en liaison avec des modules de supervision spécialisés. Certains équipements, tels que les modules de type Solarcheck, permettent le contrôle des chaînes photovoltaïques en vue d'identifier d'éventuelles anomalies. [21][22]

## **I.8 Systèmes de surveillance sans fil :**

Avec le développement des systèmes photovoltaïques, la nécessité de disposer de solutions de surveillance à la fois efficaces et économiques s'est imposée comme primordiale. Les systèmes filaires, qui étaient autrefois prédominants pour la transmission des données, engendrent des coûts importants et des contraintes substantielles en termes de déploiement, particulièrement dans le cadre de la surveillance en temps réel. Ainsi, une évolution graduelle vers les dispositifs de surveillance sans fil s'est réalisée au cours des dernières années.

Les technologies sans fil présentent divers avantages, incluant une flexibilité accrue, une diminution des coûts de maintenance, une couverture de communication élargie ainsi qu'une sécurité renforcée grâce à l'implémentation de protocoles spécialisés. Par ailleurs, elles assurent un contrôle performant des systèmes photovoltaïques au sein de divers environnements. [4][23]

### **I.8.1 Wi-Fi :**

La technologie Wi-Fi, fondée sur la norme IEEE 802.11, est couramment employée pour les réseaux locaux sans fil. Elle se caractérise par une vitesse de transmission élevée ainsi qu'une forte notoriété. Dans les systèmes photovoltaïques, cette technologie assure la transmission des données collectées par les capteurs (courant, tension, etc.) vers des plateformes de supervision à l'aide de modules tels que l'ESP32 ou l'ESP8266. Cependant, son champ d'action demeure restreint (environ 100 m) et elle est susceptible de exposer des failles en matière de sécurité. [4]

### **I.8.2 Réseau GSM :**

Le GSM constitue une technologie de communication mobile assurant une couverture étendue ainsi qu'une fiabilité élevée. Il autorise la transmission de données sur de vastes distances, généralement sous forme de SMS ou par l'intermédiaire de réseaux mobiles.

Dans les systèmes photovoltaïques, il est employé afin de garantir une surveillance à distance et en temps réel, en particulier dans les régions éloignées. Malgré ses bénéfices, le

# **Chapitre I: Systèmes photovoltaïques et station météorologique**

---

GSM peut être soumis à des problèmes de latence, de congestion du réseau et de fiabilité lors de la transmission simultanée des données. [25][24]

## **I.9 Conclusion :**

Ce chapitre a exposé les notions essentielles relatives aux systèmes photovoltaïques et aux stations météorologiques, en soulignant leur rôle crucial dans le cadre contemporain de la transition énergétique. L'analyse du rayonnement solaire, des diverses technologies de cellules photovoltaïques et des catégories d'installations correspondantes a démontré l'importance fondamentale de l'énergie solaire en tant que source d'énergie propre et renouvelable et pérenne.

L'examen des paramètres environnementaux, notamment la température et l'éclairement, a contribué à une meilleure compréhension de leur incidence directe sur le rendement des systèmes photovoltaïques. Dans ce contexte, les stations météorologiques avec ses différents types se révèlent être des instruments essentiels pour la collecte de données climatiques rigoureuses, participant ainsi à l'optimisation et au contrôle des installations.

Enfin, l'incorporation de dispositifs de surveillance, notamment sans fil grâce aux technologies Wi-Fi et GSM, permet de développer des solutions intelligentes et interconnectées, garantissant un suivi performant et instantané des systèmes photovoltaïques. [7][19]



## **Chapitre II Matériel et logiciels utilisés**

## **Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés**

---

### **II.1 Introduction :**

L'essor mondial de l'énergie solaire photovoltaïque a engendré un besoin croissant de systèmes de surveillance fiables et performants. En effet, la surveillance continue des installations photovoltaïques permet de garantir leur bon fonctionnement, de détecter rapidement toute anomalie et d'optimiser la production d'énergie. C'est dans ce contexte que l'Internet des Objets (IoT) s'impose aujourd'hui comme une solution technologique incontournable, offrant la possibilité de collecter, transmettre et visualiser les données en temps réel à distance, tout en réduisant les coûts d'exploitation et de maintenance.

Dans le cadre de ce projet, nous avons conçu un système de surveillance basé sur le microcontrôleur ESP32, intégrant plusieurs capteurs de mesure ainsi que différents modules de communication afin d'assurer une transmission des données fiable même en cas de défaillance du réseau de communication principal. Ce chapitre a pour objectif de présenter et de décrire l'ensemble des composants matériels et logiciels retenus pour la réalisation de ce système. [11] [18]

### **II.2 Objectif du projet :**

- Mesurer en temps réel les paramètres d'un panneau photovoltaïque et son environnement : Tension, courant, puissance, température, humidité et luminosité.
- Transmettre les données mesurées vers une plateforme Cloud pour permettre une supervision à distance.
- Permettre l'accès aux données depuis un ordinateur ou un smartphone Android.
- Assurer la continuité de communication grâce aux technologies WiFi, GSM et LoRa.

### **II.3 Cahier des charges :**

Pour un projet de surveillance photovoltaïque intelligent basé sur l'ESP32, on a :

#### **II.3.1 Spécifications techniques :**

- Utilisation d'un ESP32 comme microcontrôleur principal.
- Utilisation des capteurs DHT11, TSL2561 et INA219 pour les différentes mesures.

## **Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés**

---

- Transmission des données via WiFi et affichage des données sur une interface Web accessible à distance.
- Utilisation du module SIM800L comme solution de secours GSM.
- Utilisation des modules LoRa RA-02 pour la communication longue portée.

### **II.3.2 Fonctionnalités :**

- Mesure et affichage en temps réel des données photovoltaïques.
- Calcul automatique de la puissance produite.
- Envoi des données vers le Cloud.
- Basculement automatique entre WiFi, GSM et LoRa selon la disponibilité du réseau.
- Supervision continue depuis un PC ou une application Android.

### **II.3.3 Livrables attendus :**

- Diagramme bloc de l'architecture.
- Schéma de connexion du système.
- Interface ThingSpeak fonctionnelle et interface Android.
- Documentation technique du système.

## **II.4 Conception matérielle :**

Notre système prend forme grâce à un ensemble d'éléments électroniques qui collectent, analysent puis envoient les informations. Dans notre cas, nous utilisons les capteurs chargés de mesurer les grandeurs électriques et climatiques, accompagnés du cerveau logique une carte programmable tout comme les interfaces dédiées à l'échange de données. [16]

### **II.4.1 Le DHT11 :**

#### **II.4.1.1 Caractéristiques Principales :**

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

Le DHT11 est un capteur composite intégré (Integrated Sensor Module) combinant deux transducteurs distincts au sein d'un même boîtier :

**Tableau 1:Caractéristiques Principales de DHT11 :**

| Paramètre                          | Spécification                                                 |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------|
| Humidité relative (RH)             | Plage : 20–90% RH                                             |
| Précision RH                       | $\pm 4\%$ RH (à 25°C) ; $\pm 5\%$ RH (0–50°C)                 |
| Température                        | Plage : 0–50°C                                                |
| Précision température              | $\pm 1^\circ\text{C}$ (typique) ; $\pm 2^\circ\text{C}$ (max) |
| Résolution                         | 8 bits pour les deux grandeurs                                |
| Temps de réponse                   | 6–30 s (constante de temps $\tau = 63\%$ )                    |
| Période d'échantillonnage minimale | 1 seconde                                                     |
| Alimentation                       | 3,0–5,5 VCC                                                   |
| Consommation                       | 0,5 mA (mesure) ; 100–150 $\mu\text{A}$ (veille)              |

Le DHT11 intègre trois composants fondamentaux :

- **Élément sensible à l'humidité** : capteur résistif à couche mince (resistive-type humidity measurement component).
- **Élément sensible à la température** : thermistance CTN (NTC — Negative Temperature Coefficient).
- **Microcontrôleur 8 bits embarqué** : responsable de la conversion A/N, de la calibration et du formatage des données. [26]

### II.4.1.2 Principe de Fonctionnement:

**Humidité** : L'humidité active un polymère qui attire l'eau. Ce changement altère la façon dont le courant passe à travers le matériau. Quand les molécules s'accrochent au film sensible, cela ralentit ou accélère les charges électriques. Une résistance plus faible ou plus forte apparaît alors selon le niveau d'humidité ambiant. Un microcontrôleur convertit cette différence en données lisibles. La mesure finale dépend de ces ajustements continus dans le réseau du capteur.

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

**Température :** La thermistance CTN repose sur la dépendance exponentielle de la résistivité d'un **semiconducteur dopé** avec la température, selon la relation de Steinhart-Hart :

$$R(T) = R_0 \cdot e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}$$

Où :  **$R(T)$** : Résistance de la thermistance à la température souhaitée (en Ohms,  $\Omega$ ).

**$R_0$**  : Résistance nominale de la thermistance à la température de référence (généralement à 25°C).

**$B$**  : Constante Bêta du matériau (exprimée en Kelvin, fournie par le fabricant).

**$T$**  : Température mesurée en Kelvin.

**$T_0$**  : Température de référence en Kelvin (généralement 25°C = 298,15 K).

### Protocole de Communication : Bus Série Monofilaire (Single-Wire Serial Interface)

Le DHT11 utilise un protocole de communication asynchrone half-duplex sur une ligne unique bidirectionnelle. [27]



Figure II-11:Le DHT11[27]

### II.4.2 Le TSL2561 :

Le TSL2561 est un capteur numérique de luminosité ambiant produit par Texas Advanced Optoelectronic Solutions (TAOS), désormais intégré au groupe Texas Instruments. Il fait partie de la famille des convertisseurs lumière-numérique TSL256x et se caractérise par une interface de communication I<sup>2</sup>C Fast-Mode pouvant atteindre une fréquence d'horloge de jusqu'à 400 kHz. On le trouve dans plusieurs types de boîtiers : TMB-6, Chipscale (CS), Dual Flat No-Lead (FN) et ChipLED (CL). [28]

#### II.4.2.1 Caractéristiques principales :

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

- **Interface de communication** : I<sup>2</sup>C Fast-Mode jusqu'à 400 kHz, compatible SMBus 1.1 et 2.0, permettant le raccordement direct au microcontrôleur ESP32 sans circuit de conditionnement externe.
- **Résolution et plage dynamique** : sortie numérique 16 bits avec une dynamique effective de 20 bits couvrant une large gamme d'éclairements de 0,1 lux à environ 40 000 lux.
- **Tension d'alimentation** : fonctionne à une tension comprise entre 2,7 V et 3,6 V pour une tension nominale de 3 V, parfaitement compatible avec la sortie 3,3 V de l'ESP32.
- **Consommation** : consommation active typique très faible de 0,75 mW, avec un mode veille disponible abaissant la consommation à 3,2  $\mu$ A, ce qui en fait un composant idéal pour les systèmes embarqués à faible consommation.
- **Temps d'intégration programmable** : trois valeurs disponibles 13,7 ms, 101 ms et 402 ms pour adapter la vitesse de mesure aux besoins de l'application.
- **Gain analogique commutable** : 2 modes de gain possibles (faible gain (1 $\times$ ) et fort gain (16 $\times$ ) pour s'ajuster aux conditions lumineuses ( $>$  ou  $\leq$  10 Lux). [28]

### II.4.2.2 Description des broches :

- **VDD (broche 1)** : Power supply of the sensor, which can be powered with a voltage between 2.7 V to 3.6 V, with a nominal voltage of 3 V.
- **GND (broche 2)** : broche de référence de masse, commune à tous les composants du circuit.
- **SCL (broche 3)** : entrée du signal d'horloge du bus I<sup>2</sup>C. Cette broche reçoit le signal d'horloge fourni par le maître du bus afin de synchroniser les échanges de données.
- **SDA (broche 4)** : ligne de données bidirectionnelle I<sup>2</sup>C permettant la transmission et la réception des données entre le capteur et le microcontrôleur maître sur le bus.
- **INT (broche 5)** : sortie d'interruption à drain ouvert, active à l'état bas. Elle s'enclenche automatiquement quand la valeur mesurée dépasse les limites hautes ou basses définies par l'utilisateur, ce qui évite au microcontrôleur de devoir surveiller en permanence le capteur. [28]

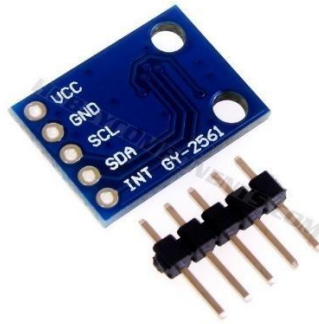


Figure II-2: Capteur TSL2561 [28]

### II.4.3 Capteur de tension et de courant INA219:

L'INA219 est un moniteur numérique de courant et de puissance à dérive nulle produit par Texas Instruments. C'est un capteur de type shunt côté haut (high-side) qui permet de mesurer simultanément la tension de shunt, la tension de bus et la puissance consommée, avec une interface de communication I<sup>2</sup>C compatible SMBus. Il se présente en deux boîtiers : SOT23-8 et SO-8. [29]

#### II.4.3.1 Caractéristiques principales :

- **Mesure de la tension de bus** : plage de mesure de 0 V à 26 V, avec deux gammes pleine échelle configurables 16 V ou 32 V ce qui le rend adapté à la surveillance des panneaux photovoltaïques basse et moyenne tension.
- **Mesure du courant** : par détection de la tension aux bornes d'une résistance shunt externe. La plage de gain programmable (PGA) permet quatre sensibilités :  $\pm 40$  mV,  $\pm 80$  mV,  $\pm 160$  mV et  $\pm 320$  mV, ce qui autorise l'adaptation de la mesure à différentes plages de courant.
- **Mesure de la puissance** : un registre interne multiplie automatiquement la valeur du courant par celle de la tension de bus pour calculer la puissance en watts, sans charge supplémentaire sur le microcontrôleur.
- **La précision** : erreur maximale de mesure de  $\pm 1$  % sur la totalité de la plage de température de fonctionnement, avec une résolution ADC de 12 bits et un pas de quantification de 10  $\mu$ V pour la tension de shunt et de 4 mV pour la tension de bus.
- **Interface de communication** : bus compatible I<sup>2</sup>C SMBus, prenant en charge les modes standard (100 kHz), rapide (400 kHz) et haute vitesse (3,4 MHz), avec 16 adresses d'esclave programmables grâce aux broches A0 et A1.

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

- **Tension d'alimentation** : travaille avec une tension d'alimentation comprise entre 3 V et 5,5 V, indépendante de la tension du bus surveillé, et peut donc être alimenté directement depuis la sortie 3,3 V d'un microcontrôleur.
- **La consommation** : courant de repos typique de 0,7 mA en mode actif, avec un mode veille réduisant la consommation à seulement 6  $\mu$ A.
- **Température de fonctionnement** : plage opérationnelle de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $+125^{\circ}\text{C}$ , garantissant un fonctionnement fiable dans les conditions extérieures d'une installation photovoltaïque. [29]

### II.4.3.2 Description des broches :

- **VIN+ (broche 1)** : entrée différentielle positive, reliée au côté positif de la résistance shunt, c'est-à-dire du côté de la source d'alimentation ou du panneau photovoltaïque.
- **VIN- (broche 2)** : entrée différentielle négative, connectée au côté négatif de la résistance de shunt, c'est-à-dire du côté de la charge. La tension du bus s'évalue entre cette broche et la masse.
- **GND (broche 3)** : broche de masse de référence commune à tous les éléments du circuit.
- **VCC (pin 4)** : broche d'alimentation du capteur, qui accepte une tension comprise entre 3 V et 5,5 V, indépendamment de la tension du bus mesuré.
- **SCL (broche 5)** : entrée du signal d'horloge du bus I<sup>2</sup>C, recevant le signal de synchronisation produit par le microcontrôleur maître.
- **SDA (pin 6)** : ligne de données I<sup>2</sup>C bidirectionnelle qui permet l'échange de données entre le capteur et le microcontrôleur maître.
- **A0 (pin 7)** : broche de sélection d'adresse I<sup>2</sup>C. En se connectant à GND, VCC, SDA ou SCL, on peut définir les bits de poids faible de l'adresse esclave parmi les 16 combinaisons possibles.
- **A1 (pin 8)** : deuxième broche de sélection d'adresse I<sup>2</sup>C, utilisée avec A0 afin de définir l'adresse complète du capteur sur le bus. [29]

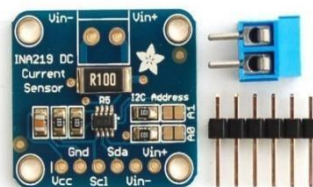


Figure II-3 :Capteur INA219[29]

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

### II.4.4 Module LoRa:

Le Semi LoRa Ra-02 est un module de communication sans fil basé sur le chipset SX1278 de Semtech. Il est fabriqué et distribué par 7Semi, une entreprise indienne d'électronique basée à Mumbai. En fait, ce module est une version breakout du module AiThinker Ra-02 très courant dans la communauté maker et les projets IoT industriels. Il fonctionne sur la bande de fréquence 433 MHz et utilise la technologie LoRa (Long Range), qui permet de transmettre sur de longues distances avec une très faible consommation d'énergie. [30] [31]

#### II.4.4.1 Caractéristiques principales :

##### Caractéristiques du module LoRa Ra-02 :

- **Plage de fréquence** : 410 MHz – 525 MHz (typiquement 433 MHz).
- **Modulation** : LoRa Spread Spectrum (CSS)
- **Débit de données** : 0.018 kbps à 37.5 kbps
- **Puissance de transmission** : Jusqu'à +20 dBm (100 mW)
- **Sensibilité** : -148 dBm
- **Portée de communication** : Jusqu'à 10 km (ligne de vue)
- **Consommation** : Faible, adapté aux appareils sur batterie
- **Interface** : Le module LoRa Ra-02 utilise l'interface **SPI** pour communiquer avec l'ESP32 via quatre lignes (SCK, MOSI, MISO, NSS), permettant la configuration du chipset SX1278 et le transfert des données.
- **Caractéristiques du chipset SX1278** :
- **Chipset** : Semtech SX1278
- **Plage de fréquence** : 410 MHz – 525 MHz (typiquement 433 MHz).
- **Distance de transmission** : Jusqu'à 10 km (en zone ouverte).
- **Tension d'alimentation** : 1.8V – 3.3V (typiquement 3.3V).
- **Température de fonctionnement** : -40°C à +85°C
- **Connecteur antenne** : IPEX (U.FL).
- **Sensibilité** : Jusqu'à -148 dBm
- **Dimensions du breakout** : 27.7 mm × 20.4 mm [32]

#### II.4.4.2 Description des broches :

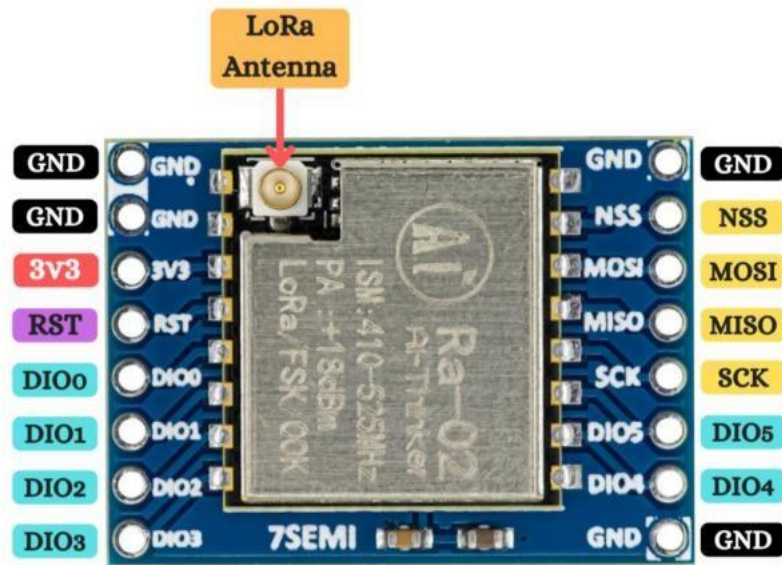


Figure II-4: Les broches de LoRa RA-02[30]

- **GND** : Connexion à la masse.
- **3V3** : Alimentation 3.3V.
- **RST** : Réinitialisation du module.
- **DIO0/DIO1/DIO2/DIO3/DIO4/DIO5** : Entrée/Sortie numérique pour interruptions.
- **SCK** : Horloge SPI.
- **MISO** : Données SPI sortantes (esclave vers maître).
- **MOSI** : Données SPI entrantes (maître vers esclave).
- **NSS** : Sélection du circuit SPI (Chip Select). [31]

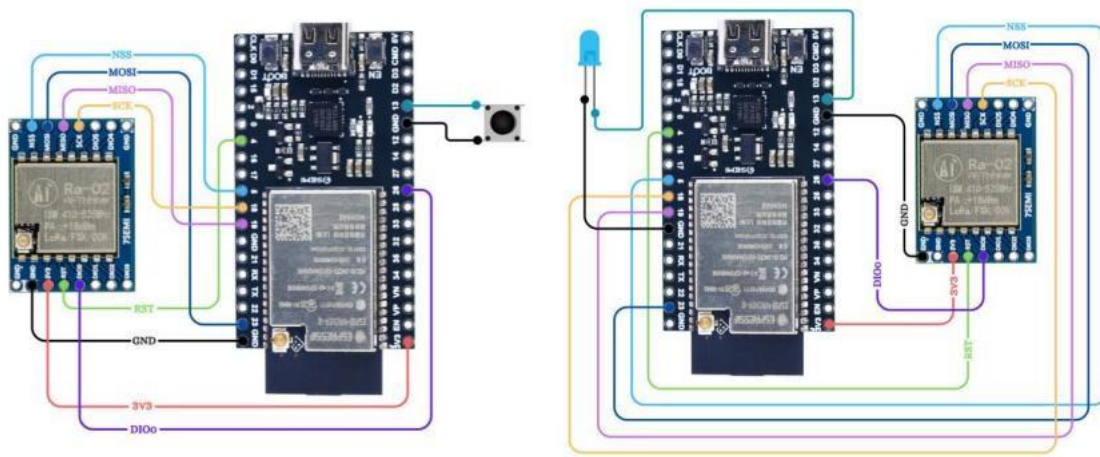


Figure II-5: Schéma de câblage du module LoRa Ra-02 avec l'ESP32[30]

### II.4.4.3 Principe de fonctionnement :

#### II.4.4.3.1 Architecture générale du transceiver :

Le SX1278 est un transceiver demi-duplex à basse fréquence intermédiaire (low-IF). Le signal RF reçu est tout d'abord amplifié par un Low Noise Amplifier (LNA) à entrée unique, puis converti en signaux différentiels pour améliorer la linéarité et le rejet des harmoniques. L'étage mélangeur décompose ensuite le signal en ses composantes en phase et en quadrature (I/Q) avant la numérisation . [21]

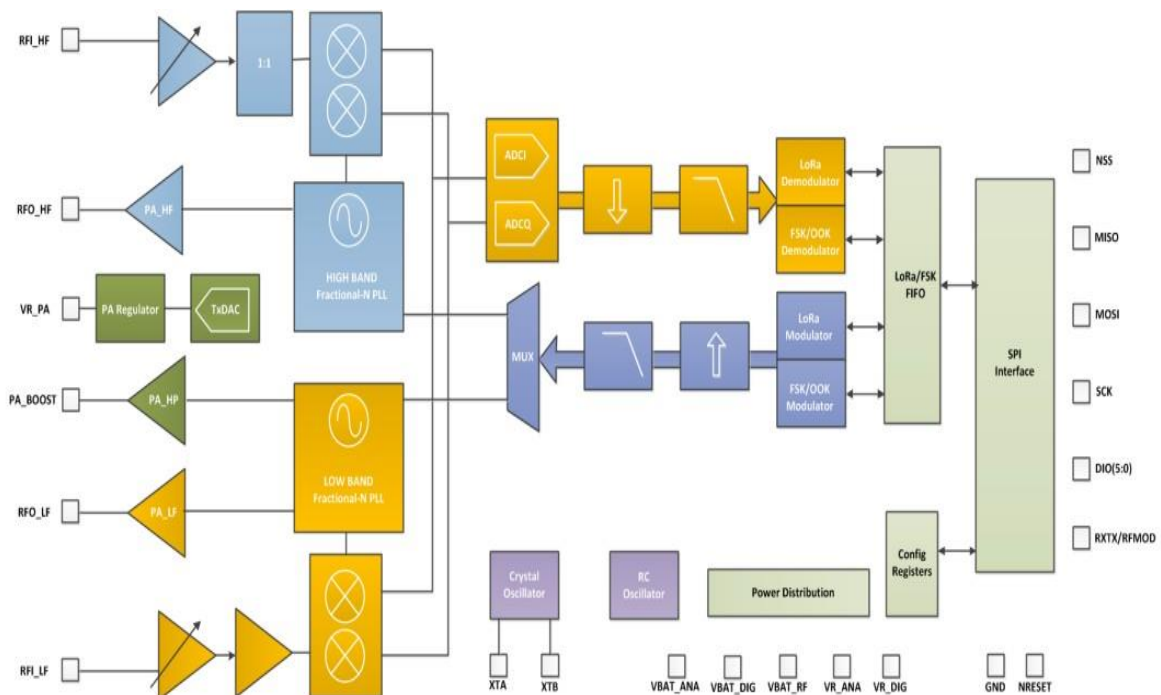


Figure II-6: Schéma fonctionnel simplifié du SX1278[30]

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

### II.4.4.3.2 Paramètres de transmission configurables :

Trois paramètres principaux permettent d'optimiser la liaison radio selon les contraintes de l'application :

- **Spreading Factor (SF)** : il détermine le nombre de chips par symbole (64 pour SF6 et 4096 pour SF12) et fixe directement la sensibilité du récepteur et le SNR minimum requis qui varient de -5 dB pour SF6 à -20 dB pour SF12.
- **La bande passante (BW)** : programmable entre 7,8 kHz et 500 kHz. Une bande passante plus grande permet un débit plus élevé, mais diminue la sensibilité. Le débit LoRa suit la relation :

$$Rs = \frac{BW}{2^{SF}}$$

Où : **Rs** : le débit symbole.

**BW** : la bande passante programmée en Hz.

**SF** : le facteur d'étalement.

- **Coding Rate (CR)** : correspond au taux de codage du code correcteur d'erreurs FEC (Forward Error Correction) qui varie de 4/5 à 4/8. Un taux plus faible (4/8) donne plus de redondance et donc une meilleure résistance aux interférences, au prix d'un débit réduit.

### II.4.4.3.3 Structure et format du paquet LoRa

Un paquet LoRa se compose de trois parties. Le préambule est une série de symboles qui sert à synchroniser le récepteur sur le signal qui arrive ; sa longueur peut être réglée et varie de 6 à 65535 symboles. L'entête est facultatif selon le mode choisi : en mode explicite (mode par défaut), l'entête contient la longueur du payload, le coding rate et la présence d'un CRC ; en mode implicite, l'entête est supprimé et ces paramètres doivent être configurés manuellement des deux côtés du lien. Enfin, le payload contient les données à transmettre, avec un CRC optionnel pour contrôler l'intégrité des données reçues.

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

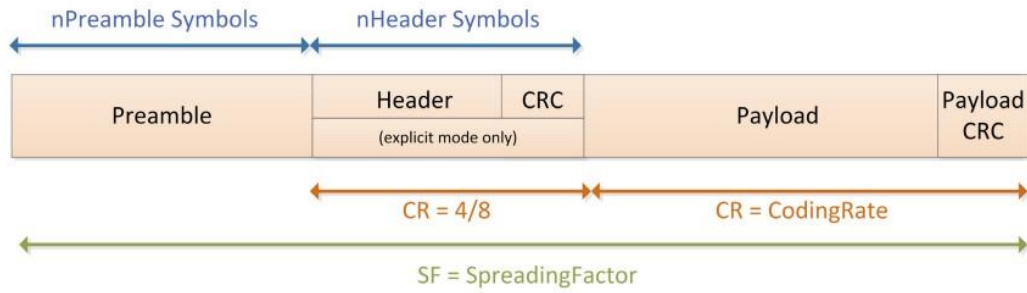


Figure II-7:LoRaTM Packet Structure[31]

### II.4.5 Le module GSM SIM800L :

Le SIM800L est un module GSM/GPRS quadribande conçu par SIMCom Wireless Solutions (Shanghai, Chine), une filiale de SIM Tech. Il fonctionne aux fréquences GSM 850, EGSM 900, DCS 1800 et PCS 1900 MHz. Avec ses dimensions de seulement  $17,8 \times 15,8 \times 2,4$  mm et un poids de 1,35 g, c'est l'un des modules GSM les plus compacts du marché. Il est monté en boîtier LGA à 88 plots et communique avec le microcontrôleur grâce à une interface UART et des commandes AT. [27]



Figure II-8:Le SIM800L[24]

#### II.4.5.1 Caractéristiques principales :

- **Bandes de fréquence** : GSM 850 / EGSM 900 / DCS 1800 / PCS 1900 MHz.
- **Tension d'alimentation** : 3.4V – 4.4V (typiquement 4.0V).
- **Courant de pointe** : Jusqu'à 2A (en burst TX).
- **Courant en veille** : 1.04 mA (Sleep mode).

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

- **Débit GPRS descendant :** Max. 85.6 kbps.
  - **Débit GPRS montant :** Max. 85.6 kbps.
  - **Interface microcontrôleur :** UART (TXD, RXD, RTS, CTS, DTR).
  - **Température de fonctionnement :** -40°C à +85°C.
  - **Dimensions :** 17.8 × 15.8 × 2.4 mm.
  - **SMS :** MT, MO, CB, Text et PDU.
  - **Carte SIM :** 1.8V et 3V. [26]
- II.4.5.2 Les broches du module SIM800L :**
- **NET :** Connexion antenne GSM.
  - **VCC :** Alimentation 3.7V – 4.2V.
  - **RST :** Réinitialisation du module.
  - **RXD :** Réception UART
  - **TXD :** Émission UART
  - **GND :** Masse.
  - **SPK- :** Sortie haut-parleur négative. • **SPK+ :** Sortie haut-parleur positive.
  - **MIC- :** Entrée microphone négative. • **MIC+ :** Entrée microphone positive.
  - **DTR :** Contrôle du mode veille (Sleep Mode).
  - **RING :** Indicateur d'appel entrant ou de réception de SMS. [24]

### II.4.5.3 Principe de fonctionnement :

#### II.4.5.3.1 Architecture générale :

Le SIM800L comporte une bande de base analogique et numérique, un bloc RF GSM, une unité de gestion d'alimentation, et plusieurs interfaces numériques (UART, SIM, GPIO, ADC, PWM). Le microcontrôleur dialogue avec le module grâce à l'interface UART en envoyant des commandes AT normalisées qui permettent de gérer les appels, les SMS ainsi que les connexions GPRS.

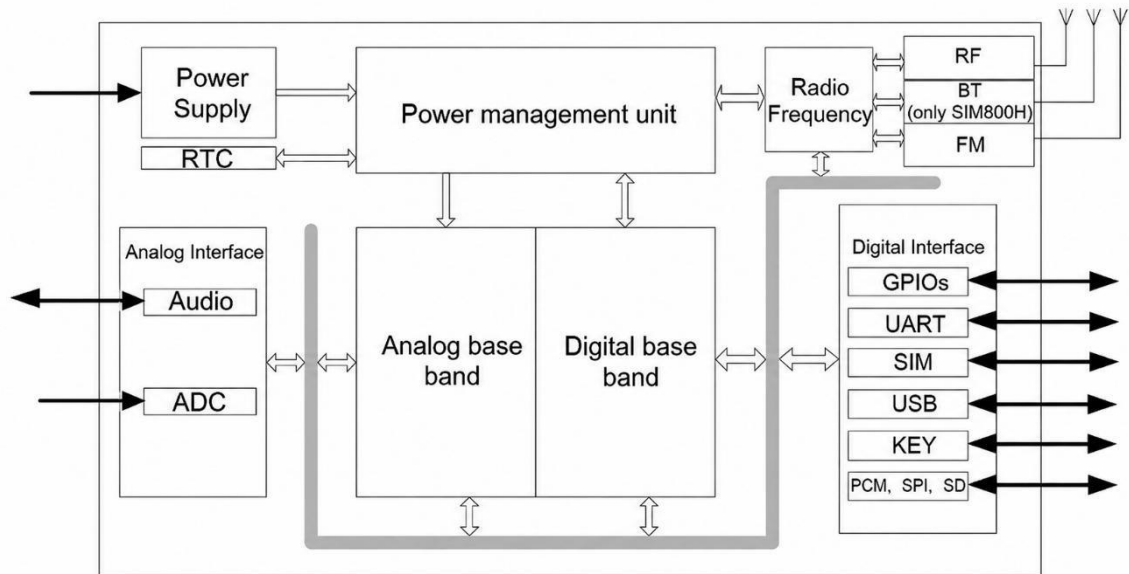


Figure II-9:Diagramme fonctionnel du SIM800L [24]

### II.4.5.3.2 Interface UART et commandes AT :

La communication avec l'ESP32 se fait uniquement sur le port UART (TXD, RXD) avec des vitesses comprises entre 1200 et 460800 bps. Le module fonctionne en mode DCE (Data Communication Equipment) et reconnaît les commandes AT standardisées suivantes : AT+CSQ pour la qualité du signal, AT+CMGF pour le mode SMS, AT+CMGS pour envoyer un SMS, AT+SAPBR et AT+CIPSTART pour les connexions GPRS/TCP. L'état réseau de la broche NETLIGHT est indiquée visuellement par un LED qui clignote avec des fréquences différentes selon si on est connecté ou pas. [24]

### II.4.5.3.3 Transmission et réception GSM/GPRS :

Le SIM800L supporte la transmission RF sur quatre bandes simultanément avec une puissance de sortie de 2 W (33 dBm) en GSM 850/900 et de 1 W (30 dBm) en DCS 1800/PCS 1900. La sensibilité de réception est meilleure que -108 dBm. En mode GPRS, il prend en charge la classe multi-slot 12 avec un débit maximum de réception et d'envoi de 85,6 kbps.

[24]

## II.4.6 Module de développement ESP32 :

### II.4.6.1 Carte de Développement ESP32-DevKitC V4 :

L'ESP32-DevKitC V4 est une carte de développement compacte basée sur le microcontrôleur ESP32 et fabriquée par Espressif Systems. Elle vise à simplifier le prototypage et le développement d'applications IoT. Presque toutes les broches d'entrée/sortie du module

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

ESP32 sont disponibles grâce à des connecteurs à double rangée placés sur chaque côté de la carte : elles permettent donc de brancher directement des fils, ou bien de monter la carte sur un breadboard.

La carte intègre le module ESP32-WROOM-32 (ou ses variantes équivalentes selon la version commandée), cœur du système. Ce module est soudé surface sur la carte DevKitC et contient le SoC ESP32-D0WDQ6 ainsi que sa mémoire Flash SPI externe de 4 Mo [5]

### II.4.6.1.1 Caractéristiques de la Carte ESP32-DevKitC V4 :

#### Composants Principaux :

- **LED d'alimentation 5V** : S'allume dès qu'une alimentation USB ou 5V externe est connectée à la carte
- **Connecteurs I/O** : La majorité des broches du module ESP32 sont exposées sur les headers pour permettre l'activation de fonctions PWM, ADC, DAC, I2C, I2S, SPI, etc.
- **Module ESP32-WROOM-32** : Module principal intégrant le SoC ESP32. Voir section dédiée ci-dessous.
- **Pont USB-to-UART** : Circuit pont USB/UART unique, offrant des taux de transfert allant jusqu'à **3 Mbps**.
- **Bouton Boot** : Bouton de téléchargement. En maintenant Boot enfoncé puis en appuyant sur EN, le mode Firmware Download est activé via le port série.
- **Port USB-to-UART (Micro-USB)** : Port Micro-USB servant à la fois d'alimentation de la carte et d'interface de communication avec le module.
- **Bouton EN** : Bouton de réinitialisation (Reset)

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

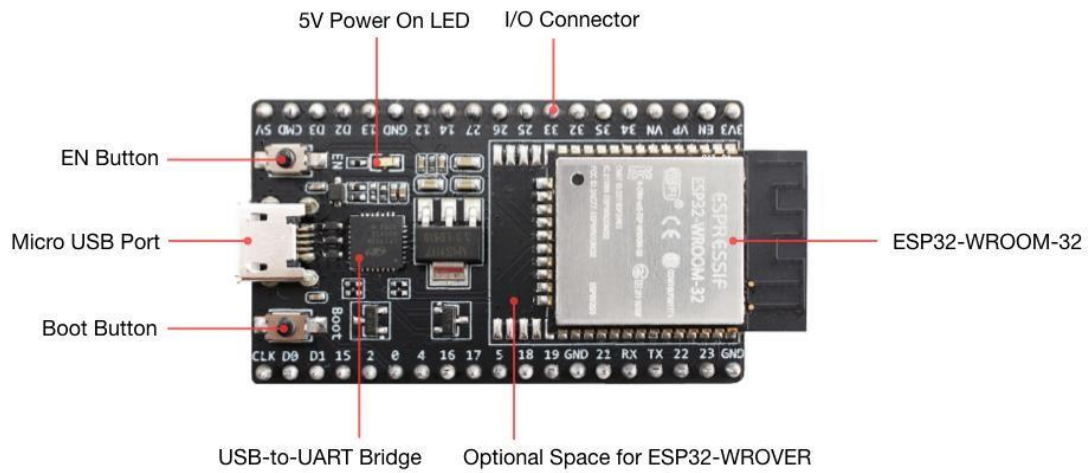


Figure II-10: Carte ESP32-DevKitC V4 avec le module ESP32-WROOM-32E[5]

### Options d'Alimentation :

La carte ESP32-DevKitC V4 accepte trois modes d'alimentation, qui sont mutuellement exclusifs :

- **Port Micro-USB** : Alimentation par défaut.
- **Broches 5V et GND** du header
- **Broches 3V3 et GND** du header

**Les broches de la carte :**

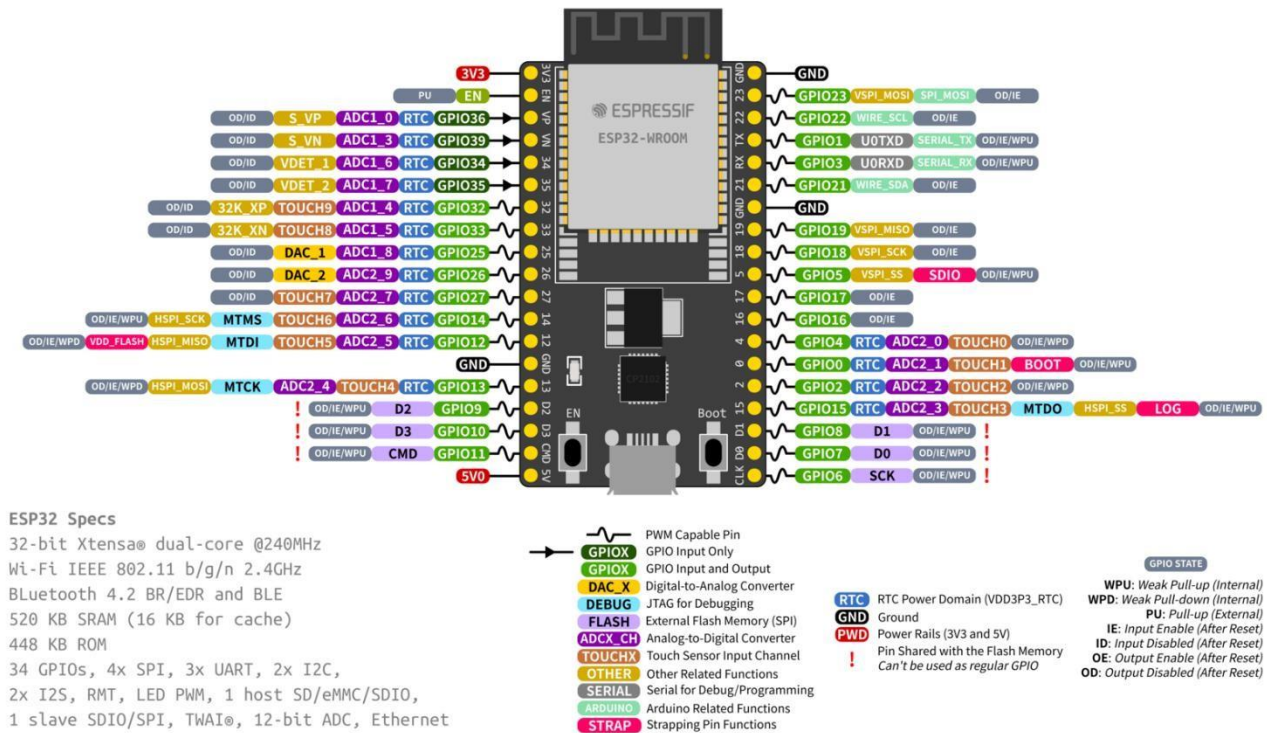


Figure II-11: Les broches de la carte ESP 32-DevKitC V4[5]

#### II.4.6.2 Module ESP32-WROOM-32 :

L'ESP32-WROOM-32 est un module Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth LE grand public, conçu et fabriqué par Espressif Systems. Il convient à un large éventail d'applications, allant des réseaux de capteurs basse consommation aux tâches exigeantes comme l'encodage vocal, le streaming audio ou le décodage MP3.

Ce module est un boîtier métallique blindé de  $18 \times 25,5 \times 3,1$  mm qui intègre au centre le SoC ESP32-D0WDQ6, un oscillateur à quartz 40 MHz, une mémoire SPI Flash de 4 Mo et une antenne PCB intégrée. Ce blindage métallique protège contre les interférences électromagnétiques (EMI). [5]

##### II.4.6.2.1 Caractéristiques du Module ESP32-WROOM-32 :

- **Processeur** : Xtensa® dual-core 32-bit LX6
- **Fréquence maximale** : 240 MHz
- **ROM** : 448 KB.
- **SRAM** : 520 KB.

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

- **SRAM RTC** : 8 KB.
- **Flash SPI externe** : 4 MB (intégrée dans le module). [5]

### Wi-Fi :

Le module ESP32-WROOM-32 permet d'utiliser le Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n sur la bande de 2,4 GHz (2412–2484 MHz) jusqu'à 150 Mbps au maximum. Il regroupe plusieurs paquets en une seule transmission grâce à l'agrégation A-MPDU/A-MSDU, ce qui réduit la surcharge protocolaire. L'intervalle de garde de 0,4  $\mu$ s réduit au minimum les interférences entre symboles. Ces optimisations assurent une communication stable et efficace, même dans les environnements perturbés. [4] **Bluetooth :**

Le module ESP32-WROOM-32 inclut le Bluetooth 4.2, compatible avec les modes classique (BR/EDR) et basse consommation (BLE). Il intègre les trois classes de puissance d'émission (1, 2 et 3) et les codecs audio CVSD et SBC pour la transmission voix/multimédia. L'AFHO (Adaptive Frequency Hopping) évite les canaux perturbés automatiquement, pour une connexion stable même en cas d'interférences. [29] **Périphériques Intégrés du SoC ESP32 :**

Le SoC ESP32-D0WDQ6 embarqué dans le module intègre un ensemble riche de périphériques numériques et analogiques :

#### ○ Périphériques numériques :

- 4 contrôleurs SPI (SPI0/1 réservés Flash, SPI2=HSPI, SPI3=VSPI)
- 3 interfaces UART
- 2 interfaces I<sup>2</sup>C (standard 100 kbps / rapide 400 kbps, jusqu'à 5 MHz)
- 2 interfaces I<sup>2</sup>S (master/slave, full-duplex)
- Contrôleur LED PWM : 16 canaux indépendants, résolution 20 bits
- Contrôleur Motor Control PWM : 3 timers, 6 sorties PWM
- Périphérique Remote Control (RMT) : 8 canaux
- Contrôleur TWAI® (compatible ISO 11898-1 / CAN 2.0)
- Compteur d'impulsions (PCNT) : 8 unités
- Interface Ethernet MAC (IEEE 802.3-2008)
- Contrôleur SD/SDIO/MMC host

#### ○ Périphériques analogiques :

- 2 convertisseurs ADC 12 bits (SAR) — 18 canaux au total (ADC1 : 8 canaux, ADC2 : 10 canaux)

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

- 2 convertisseurs DAC 8 bits (GPIO25 et GPIO26)
- 10 capteurs tactiles capacitifs (Touch Sensor) [29]

### II.5 Les logiciels et plateformes utilisées :

#### II.5.1 Arduino IDE :

L'Arduino IDE (Integrated Development Environment) est l'environnement de développement officiel fourni par Arduino pour programmer les cartes microcontrôleuses de la famille Arduino ainsi que d'autres plateformes compatibles telles que l'ESP32. C'est un logiciel gratuit et open-source, utilisable sous Windows, macOS et Linux. L'IDE comprend un éditeur de code avec coloration syntaxique, un gestionnaire de cartes facilitant l'ajout de nouveaux microcontrôleurs, un compilateur intégré, ainsi qu'un moniteur série pour le débogage en temps réel.

On écrit les programmes dans un langage C/C++ simplifié, avec des bibliothèques déjà installées qui cachent la complexité du matériel. Pour l'ESP32, l'utilisateur ajoute simplement

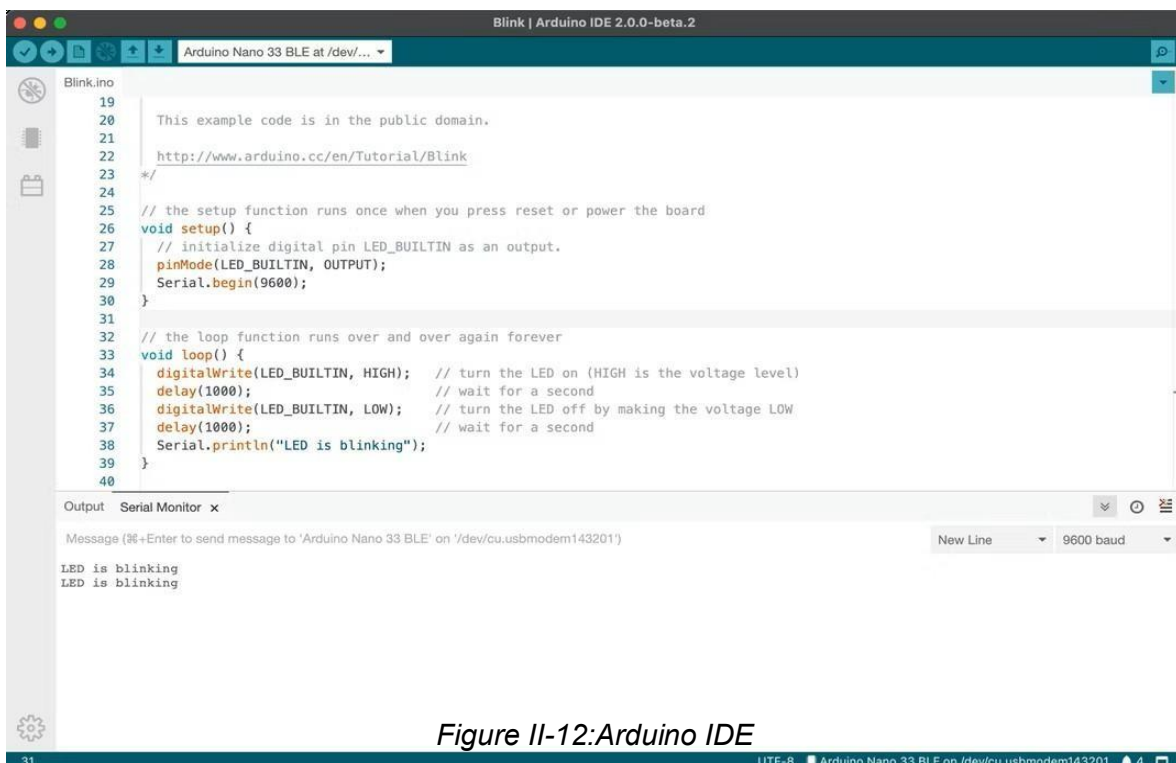


Figure II-12: Arduino IDE

l'URL du gestionnaire de cartes Espressif dans les préférences, puis installe le package « ESP32 by Espressif Systems » à partir du gestionnaire de cartes. [33]

## Chapitre II: Matériel et logiciels utilisés

---

Une fois configuré, l'IDE permet de télécharger directement des programmes via USB, d'afficher les messages de la console série, et d'utiliser les bibliothèques communautaires (des milliers) pour les capteurs, modules GSM, Wi-Fi, protocoles IoT. [30]

### II.5.2 ThingSpeak :

ThingSpeak est une plateforme d'Internet des Objets (IoT) développée par MathWorks, la société éditrice de MATLAB. Lancée en 2010, elle permet de recueillir, stocker, analyser et visualiser en temps réel des données provenant de capteurs et de dispositifs connectés. Le fonctionnement est basé sur des « channels » (canaux) accessibles par une API RESTful : chaque canal comporte jusqu'à huit champs de données auxquels on envoie des valeurs grâce à des requêtes HTTP GET ou POST. ThingSpeak permet d'utiliser les fonctionnalités d'analyse qu'offre MATLAB, à créer des algorithmes de traitement, à déclencher des alertes (React), et permet de générer des graphiques et tableaux de bord publiques ou privées. Elle fonctionne avec les microcontrôleurs Wi-Fi, tels que l'ESP32, qui envoient directement les données aux serveurs ThingSpeak par le biais de requêtes HTTP. [34]

### II.6 Conclusion :

Ce chapitre a décrit tous les composants matériels et logiciels de notre système de surveillance photovoltaïque basé sur l'ESP32. Nous avons cité les capteurs DHT11, TSL2561 et INA219 qui mesurent les paramètres climatiques et électriques de l'installation, ainsi que les modules de communication WiFi, GSM SIM800L et LoRa Ra-02 qui assurent ensemble une transmission fiable des données vers la plateforme ThingSpeak. Sans oublier l'ESP32, le cœur du système, nous avons également présenté une analyse détaillée de ses caractéristiques techniques et de sa compatibilité avec l'ensemble des composants retenus.

Le chapitre suivant portera sur la mise en œuvre concrète du système, en traitant de l'intégration matérielle et logicielle de l'ensemble de ces éléments afin d'arriver à un système fonctionnel, fiable et adapté aux conditions d'un environnement extérieur.

# Chapitre III Conception et réalisation

## III.1 Introduction :

Pour la mise en place d'un système de surveillance photovoltaïque, il faut intégrer des capteurs qui permettent de mesurer la température, l'humidité, l'éclairement solaire, ainsi que la tension et le courant des panneaux solaires. Pour faire face aux contraintes des sites isolés où la connectivité n'est pas toujours garantie, notre système s'appuie sur une architecture de communication redondante à trois niveaux : WiFi vers ThingSpeak en mode normal, GSM via le SIM800L en cas de défaillance, et une antenne radio longue portée comme dernier recours assurant la continuité de la transmission.

Ce chapitre détaille la conception et la mise en œuvre de ce système, le câblage des éléments à la logique de commutation automatique des différents moyens de communication, en passant par les interfaces de supervision Windows et Android. Nous terminons ce chapitre par la présentation et discussion des différents résultats expérimentaux acquis au cours des phases de test et de validation. [4][5]

## Chapitre III : Conception et réalisation

---

### III.2 Objectifs du système de surveillance :

Le système de surveillance développé dans ce projet vise à atteindre les objectifs suivants :

- Assurer une mesure continue et simultanée des paramètres météorologiques (température, éclairement) et les données électriques (courant, tension, puissance) afin de disposer d'une vision globale et cohérente de l'état du panneau photovoltaïque et son environnement.
- Garantir la disponibilité permanente des données collectées grâce à une architecture de communication redondante à trois niveaux WiFi, GSM et LoRa qui permet la transmission des mesures permanente et l'envoi d'alertes même dans des environnements à connectivité dégradée.
- Offrir à l'utilisateur deux modes de supervision complémentaires : un tableau de bord PC pour une analyse approfondie des données avec un historique détaillé, et une application mobile Android pour un accès instantané aux mesures en temps réel.
- Détecter automatiquement tout dépassement des seuils critiques et avertir l'utilisateur par un SMS, afin de permettre une intervention rapide face aux situations à risque sans une présence physique sur le site.
- Concevoir une base de données à long terme pour analyser le comportement du panneau solaire en fonction des variations saisonnières et climatiques de la région. [4][31]

### III.3 Organigramme et schéma synoptique du système :

Le schéma synoptique ci-dessous, représente de façon claire et structurée le fonctionnement global du système de surveillance photovoltaïque basé sur une architecture duale ESP32, intégrant une communication redondante à trois niveaux : WiFi, GSM et LoRa.

[5][34]

## Chapitre III : Conception et réalisation

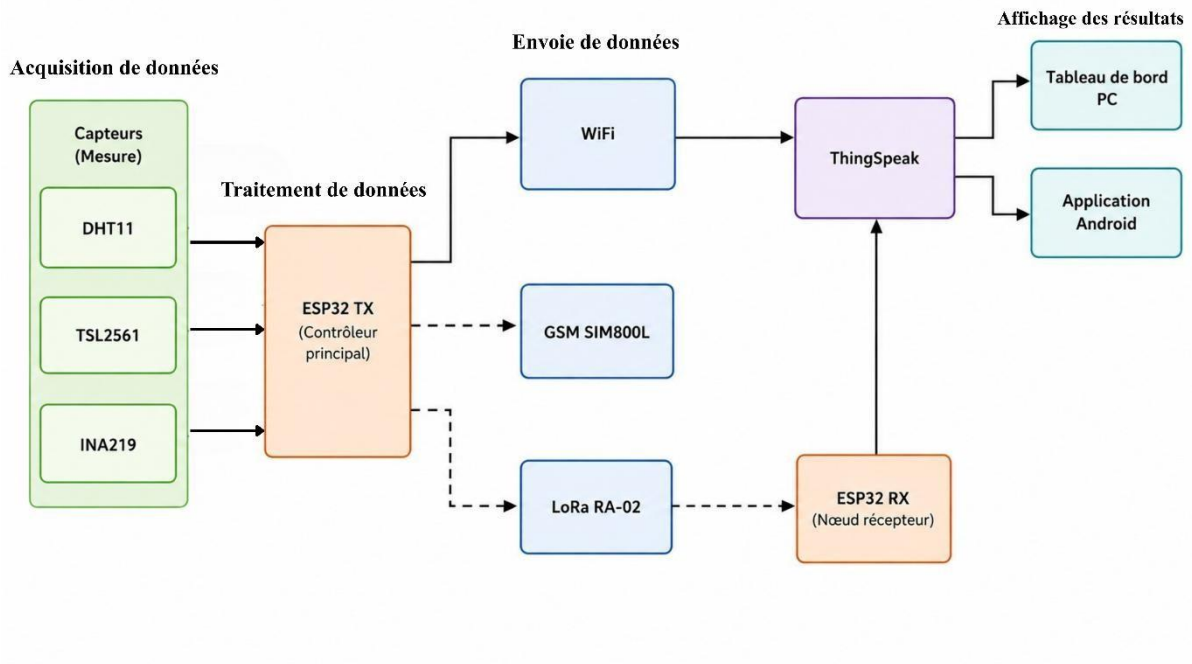


Figure III-1:Schéma synoptique du système de surveillance photovoltaïque

La figure suivante explique clairement la hiérarchie le déroulement du processus développé :

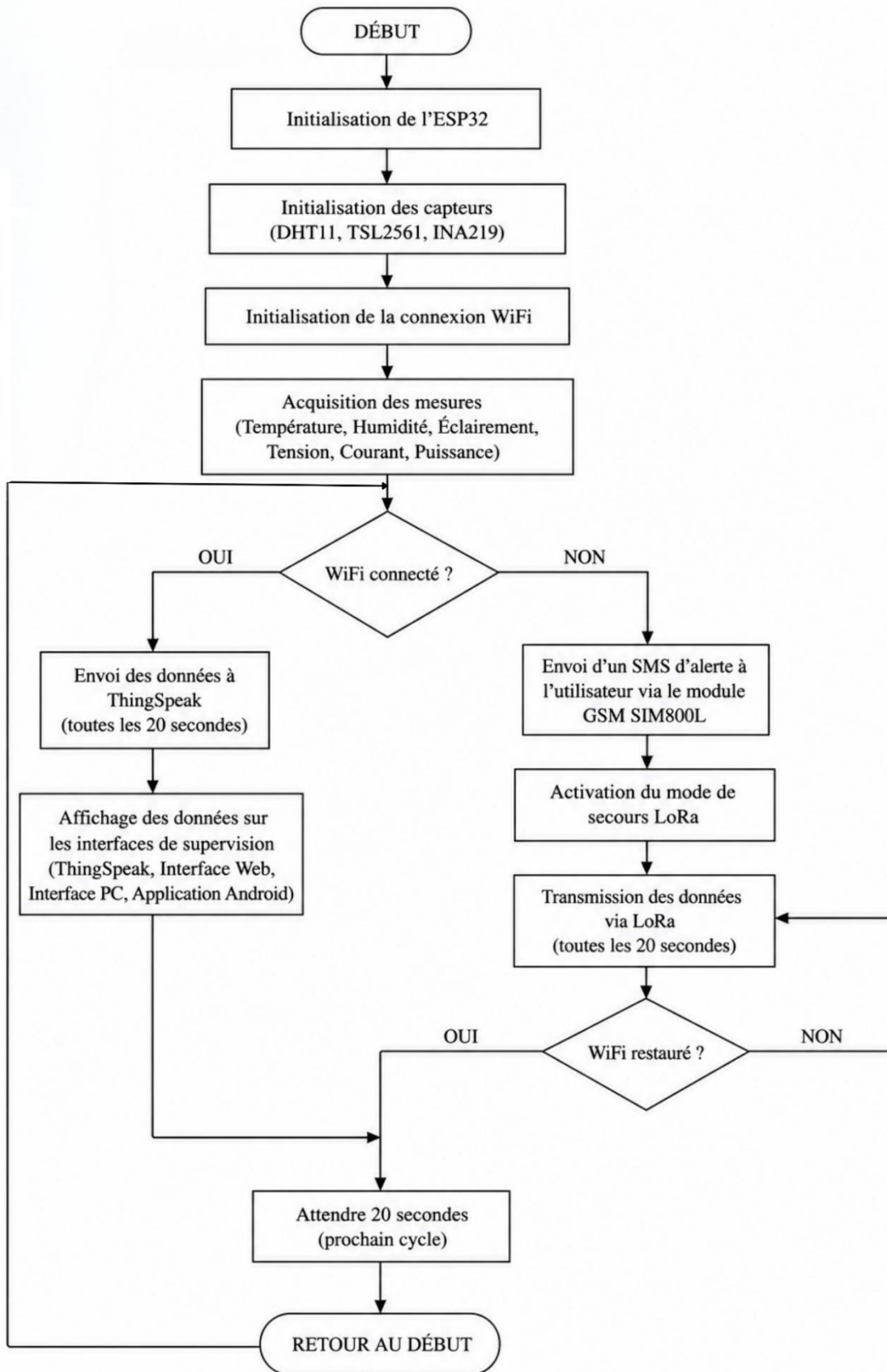


Figure III-2: L'organigramme de fonctionnement général

## Chapitre III : Conception et réalisation

---

### III.4 Conception et réalisation du système de mesure :

La conception de la station de surveillance du système photovoltaïque et son environnement repose sur deux étapes clés. La première étape implique d'initialiser les capteurs DHT11, TSL2561 et INA219 avec la carte ESP32, puis de télécharger le programme dans le microcontrôleur afin de récupérer les données environnementales et électriques. [5]

La deuxième étape permet de transmettre les mesures vers la plateforme cloud ThingSpeak. Le module WiFi intégré à l'ESP32 permet cette transmission en établissant la connexion Internet. Si le WiFi n'est pas disponible, le module GSM SIM800L prend la relève et en cas de défaillance de celui-ci également, le module LoRa Ra-02 envoie les données à un autre ESP32 esclave afin d'assurer la continuité de la communication. [32]

### III .5 Composants et modules nécessaires pour la réalisation :

#### III.5.1 Les capteurs : Ils sont détaillés dans le chapitre précédent

- **Capteur de température et d'humidité (DHT11) :** Fournit des mesures de la température ambiante et du taux d'humidité pour l'analyse des conditions environnementales du panneau photovoltaïque. [27]
- **Capteur d'intensité lumineuse (TSL2561) :** Évaluez les niveaux de luminosité en lux, cruciaux pour estimer l'irradiance solaire et déterminer l'efficacité du panneau. [28]
- **Capteur de tension et de courant (INA219) :** Mesure la tension de sortie, le courant débité et la puissance électrique du panneau photovoltaïque. [29]

#### III.5.2 Modules de communication :

- **Module WiFi intégré ESP32 :** Il assure la transmission des données vers la plateforme cloud ThingSpeak via une connexion Internet sans fil, et constitue le canal de communication principal. [5][32]
- **Module GSM SIM800L :** Utilisé pour envoyer un SMS d'alerte à l'utilisateur lorsque le WiFi est indisponible, contenant les dernières données mesurées. Le système bascule ensuite automatiquement vers le mode LoRa pour la suite de la transmission. [24]
- **Module LoRa Ra-02 :** Prend le relais après l'envoi du SMS GSM pour assurer la transmission continue des données vers l'ESP32 esclave, en dernier recours lorsque le WiFi est indisponible. [30][31]



## Chapitre III : Conception et réalisation

| N°   | Date et heure (UTC) | Température (°C) | Humidité (%) |
|------|---------------------|------------------|--------------|
| 2159 | 2026-06-02 12:43:41 | 28.50            | 23.50        |
| 2160 | 2026-06-02 12:44:00 | 28.20            | 24.70        |
| 2161 | 2026-06-02 12:44:21 | 28.10            | 24.20        |
| 2162 | 2026-06-02 12:44:39 | 28.00            | 24.10        |
| 2163 | 2026-06-02 12:45:00 | 27.90            | 24.40        |
| 2164 | 2026-06-02 12:45:20 | 27.80            | 25.30        |
| 2165 | 2026-06-02 12:45:40 | 27.70            | 24.90        |

[4]

### III.6.1.2 Eclaircement :

Branchement du capteur d'éclaircement TSL2561 est comme suit :

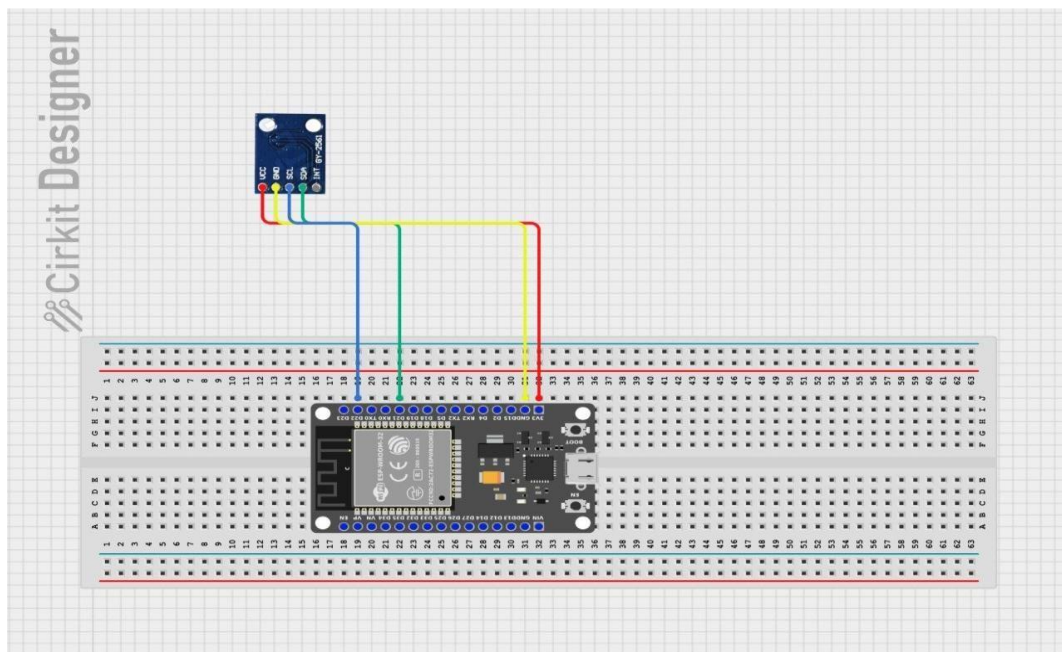


Figure III-5: Branchement de TSL2561

Affichage des valeurs en temps réel sur ThingSpeak :

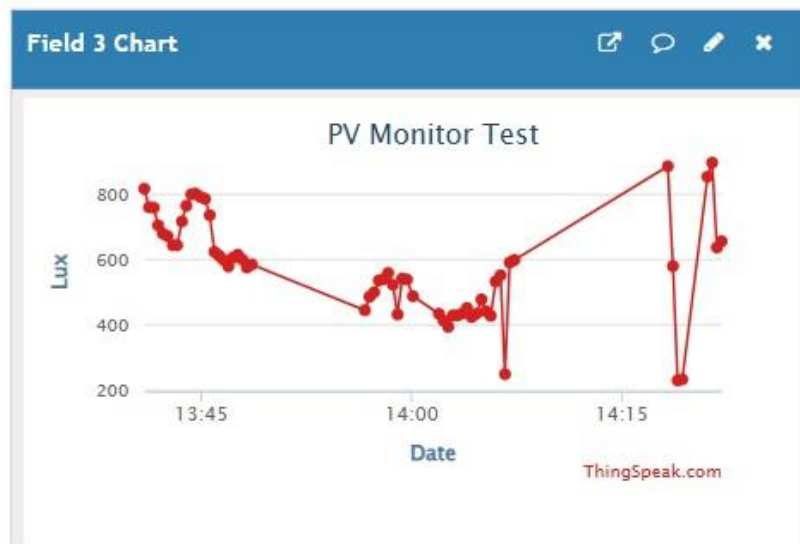


Figure III-6:supervision les valeurs de capteur.

Tableau 3: Valeurs d'éclairément enregistrées sur ThingSpeak

| N°   | Date et heure (UTC) | Éclairément (lux) |
|------|---------------------|-------------------|
| 2159 | 2026-06-02 12:43:41 | 717.00            |
| 2160 | 2026-06-02 12:44:00 | 765.00            |
| 2161 | 2026-06-02 12:44:21 | 800.00            |
| 2162 | 2026-06-02 12:44:39 | 802.00            |
| 2163 | 2026-06-02 12:45:00 | 792.00            |
| 2164 | 2026-06-02 12:45:20 | 786.00            |
| 2165 | 2026-06-02 12:45:40 | 736.00            |

## Chapitre III : Conception et réalisation

### III.6.1.3 Courant et tension :

Branchement du capteur de tension courant INA219 est comme suit :

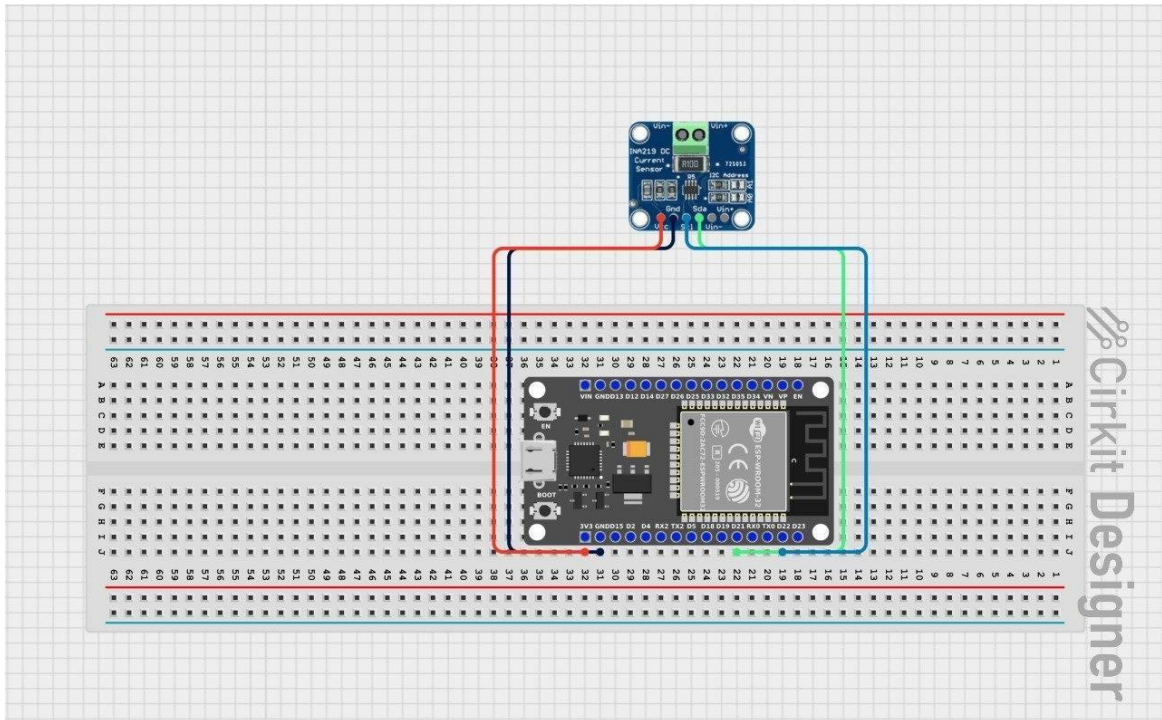


Figure III-7:Branchement de INA219

Affichage des valeurs en temps réel sur ThingSpeak :



Figure III-8:Les résultats de tension et courant affichés sur la plateforme ThingSpeak

Tableau 4: Valeurs de tension et de courant enregistrées sur ThingSpeak

## Chapitre III : Conception et réalisation

| N°   | Date et heure (UTC) | Tension (V) | Courant (mA) |
|------|---------------------|-------------|--------------|
| 2159 | 2026-06-02 12:43:41 | 19.49       | 37.90        |
| 2160 | 2026-06-02 12:44:00 | 19.87       | 46.50        |
| 2161 | 2026-06-02 12:44:21 | 20.76       | 35.80        |
| 2162 | 2026-06-02 12:44:39 | 20.51       | 32.50        |
| 2163 | 2026-06-02 12:45:00 | 20.73       | 20.30        |
| 2164 | 2026-06-02 12:45:20 | 20.68       | 42.90        |
| 2165 | 2026-06-02 12:45:40 | 20.48       | 47.10        |

### III.7 Schéma électrique sous le logiciel “ Cirkuit Designer IDE ” :

#### III.7.1 Branchement de circuit d’émission :

La figure III.9 illustre le schéma de câblage du montage fait sur breadboard, les connexions entre l'ESP32 et les différents modules ont été établies selon les spécifications techniques de chaque composant, en respectant les niveaux de tension ainsi que les protocoles de communication associés (I2C pour le TSL2561 et l'INA219, signal numérique pour le DHT11, SPI pour le module LoRa Ra-02). [30][31]

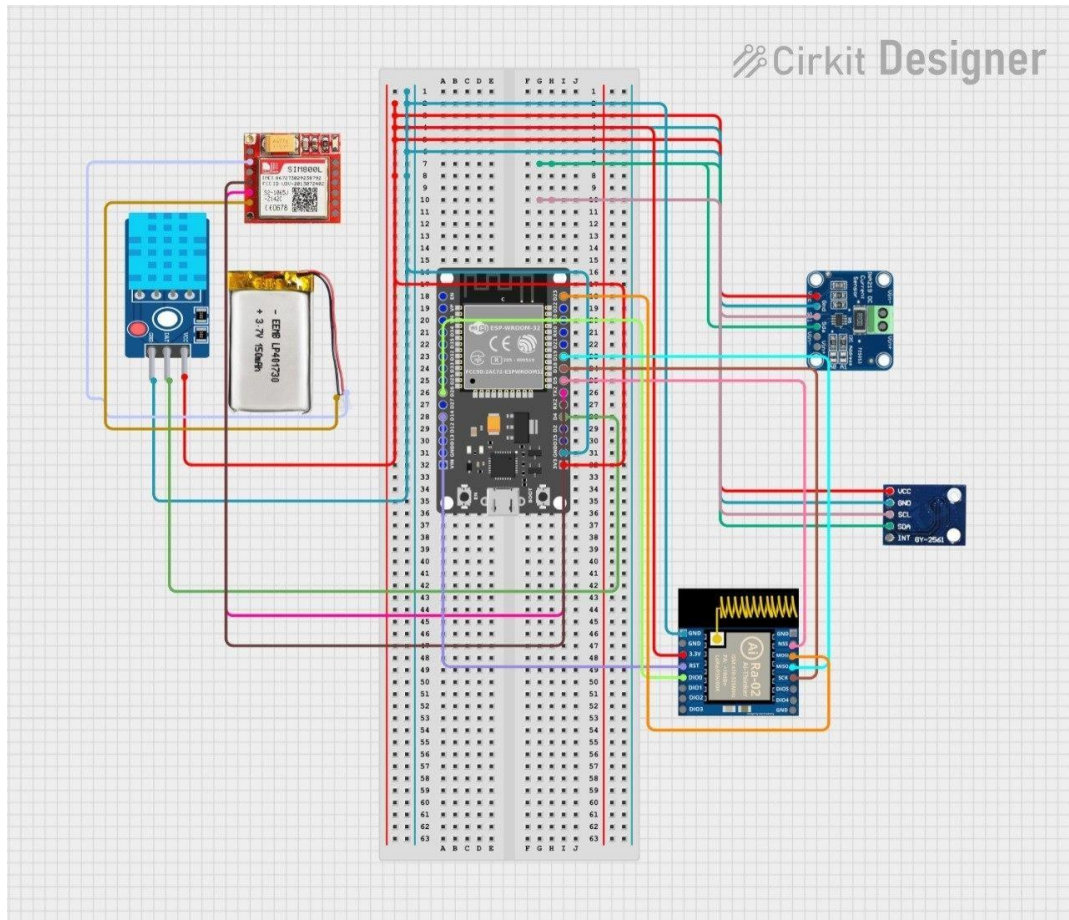


Figure III-9: Circuit d'émission créé par cirkuit designer IDE

### III.7.2 Branchement de circuit réception :

Le schéma de câblage du nœud de réception est expliqué dans la figure III.10, Ce montage se compose uniquement de l'ESP32 RX et du module LoRa Ra-02 connecté via le bus SPI. Le nœud récepteur reçoit les trames LoRa envoyées par le nœud émetteur et les transmet à la plateforme ThingSpeak par le réseau WiFi. [30][31]

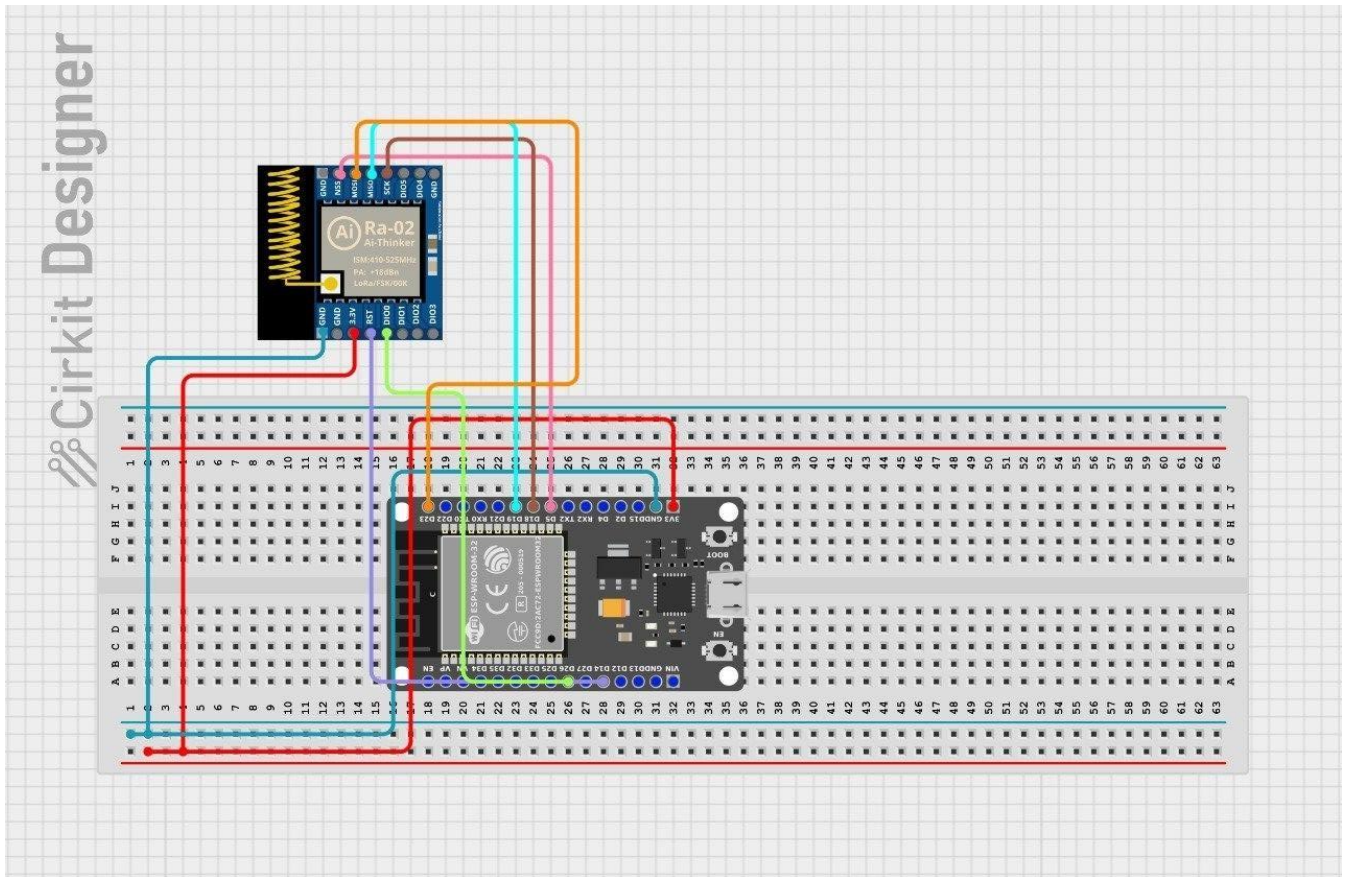


Figure III-10:Circuit de réception complet créé par designer IDE

### III.8 Les résultats obtenus :

#### III.8.1 Vue générale du système réalisé

Les figures III.11 et figure III.12 montrent chacune le montage du nœud émetteur et du nœud récepteur effectués sur breadboard. Le circuit d'émission comprend l'ESP32 TX, les capteurs DHT11, TSL2561 et INA219, les modules LoRa Ra-02 et GSM SIM800L. Le circuit de réception comprend l'ESP32 RX et le module LoRa Ra-02 qui reçoit les trames transmises et les envoie à ThingSpeak par WiFi.

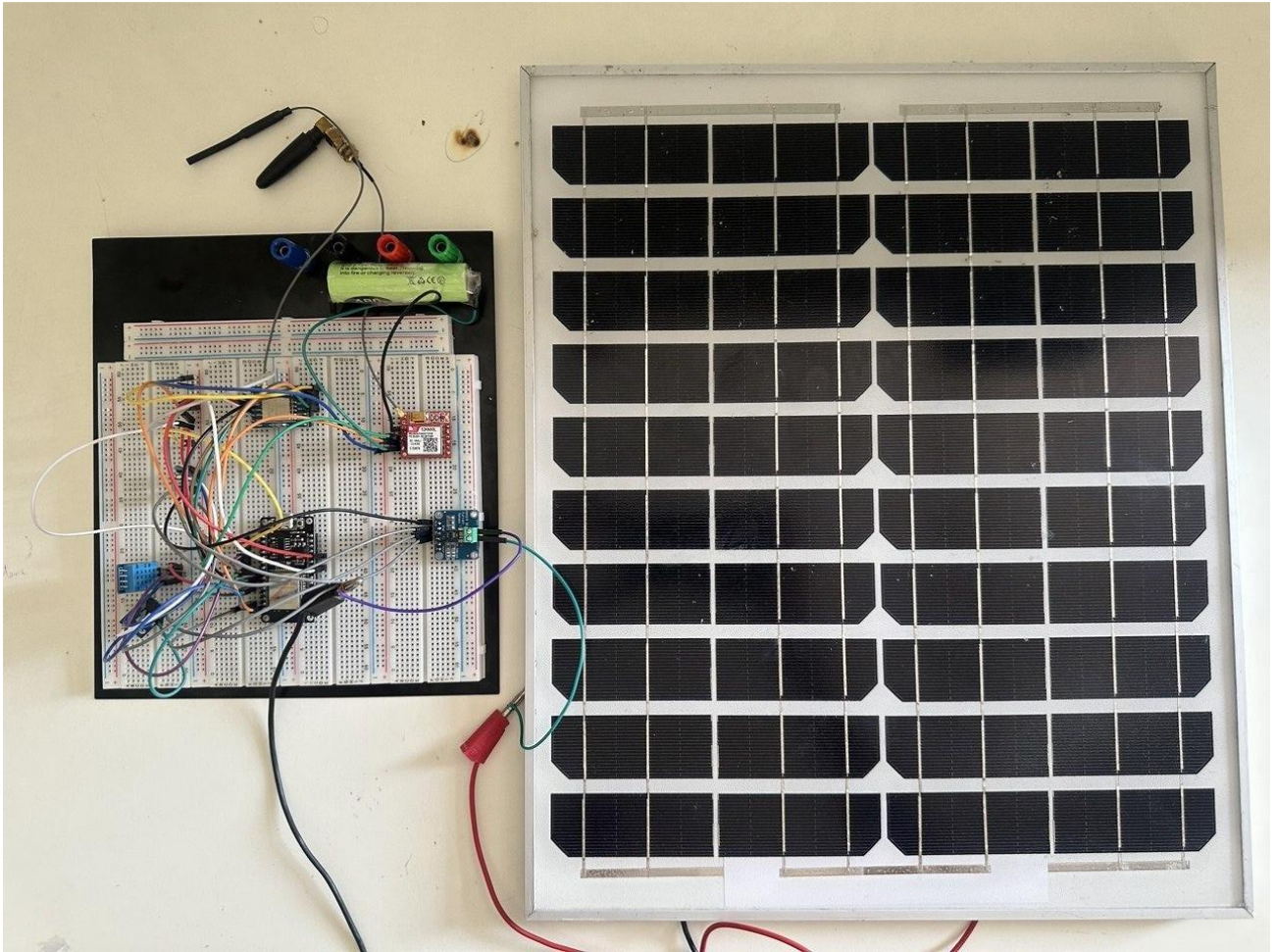


Figure III-11: Circuit du nœud émetteur

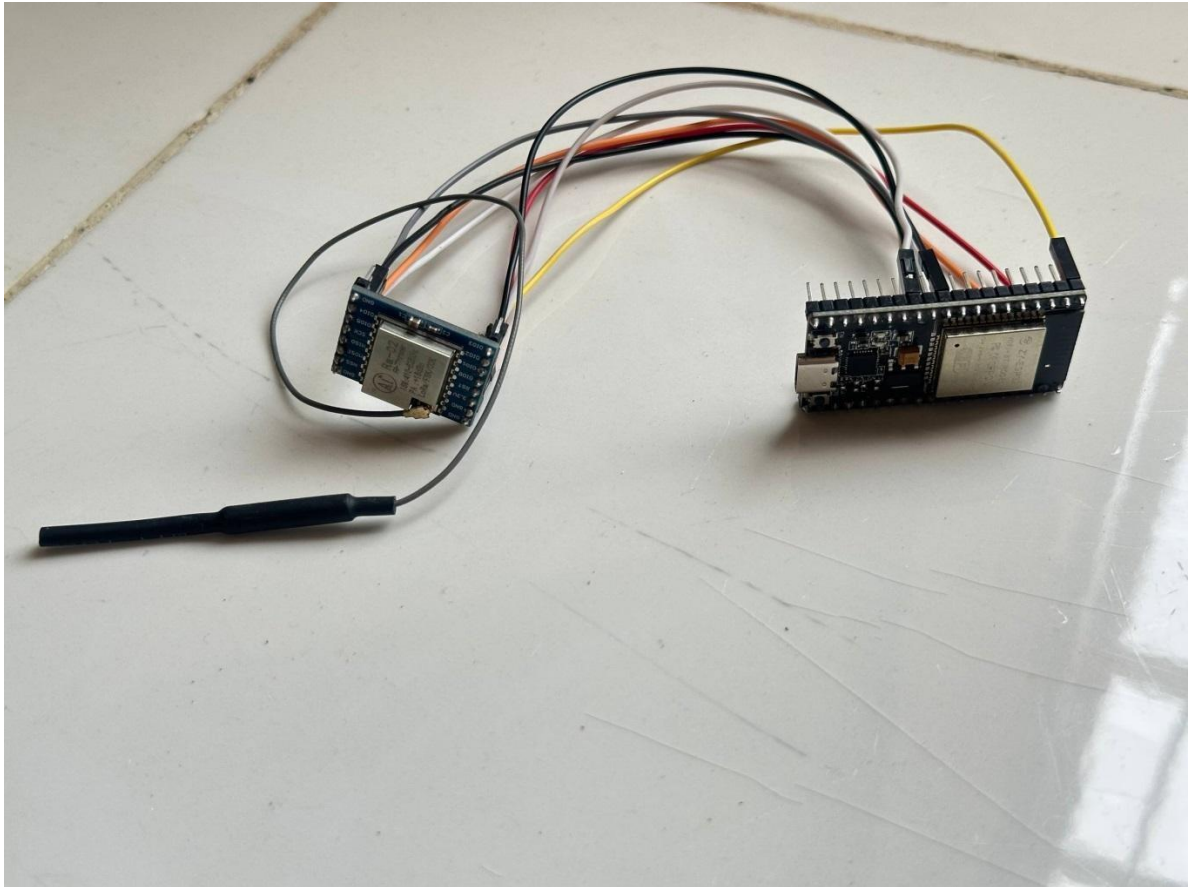


Figure III-12:Circuit du nœud récepteur.

### III.8.2 Interfaces de supervision (Interface PC et application mobile Android)

Deux interfaces de supervision ont été développées dans le cadre de ce projet, offrant à l'utilisateur un accès complet aux données du système de surveillance photovoltaïque.

#### III.8.2.1 Interface PC :

L'interface PC est une application desktop développée en React Native, fournie sous forme de fichier exécutable (.exe). Elle permet de consulter en temps réel l'ensemble des mesures collectées par le système avec un tableau de bord affichant les valeurs des capteurs, une visualisation graphique de l'évolution des données, un bilan énergétique et une fonctionnalité de génération de rapports PDF. Elle comprend aussi un mode sombre et un mode clair, et elle prend en charge plusieurs langues : français, arabe et anglais. [33][34]

## Chapitre III : Conception et réalisation



Figure III-13:Interface de l'application PC

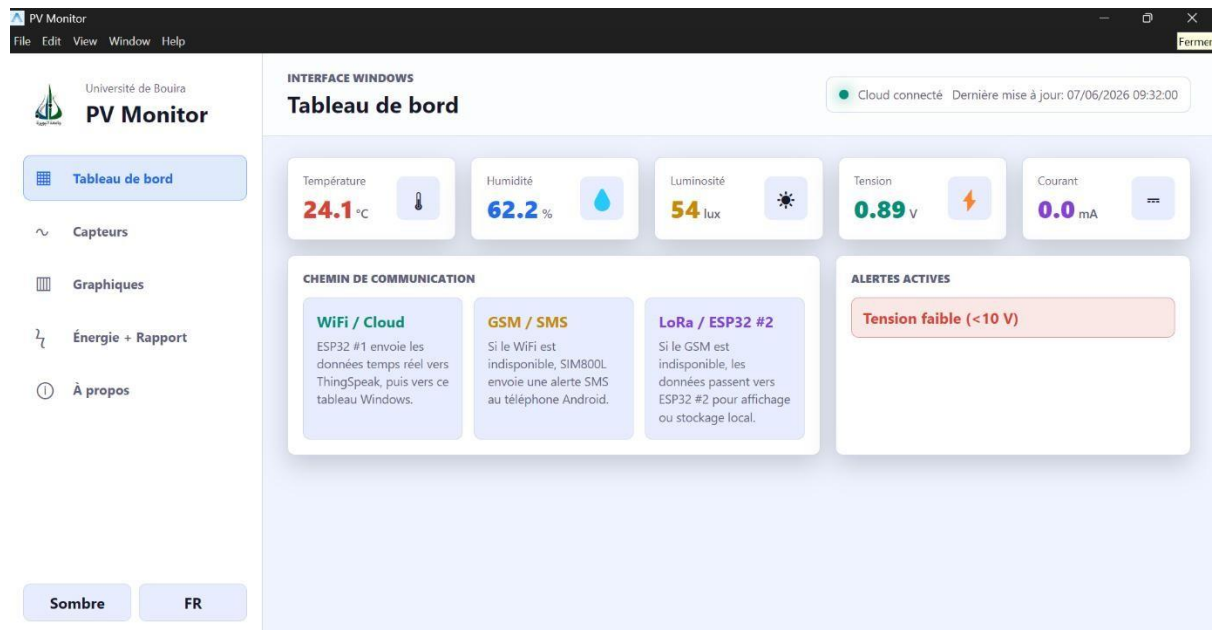


Figure III-14:Résultats affichés sur l'interface PC

### II.8.2.2 Application mobile Android :

## Chapitre III : Conception et réalisation

L'application mobile Android a été développée sous React Native avec le framework Expo, et distribuée en format APK installable sur smartphone. Elle offre les mêmes fonctionnalités que l'interface PC, adaptées à un usage mobile, permettant à l'utilisateur de surveiller son installation photovoltaïque à distance, depuis n'importe où. [33][34]

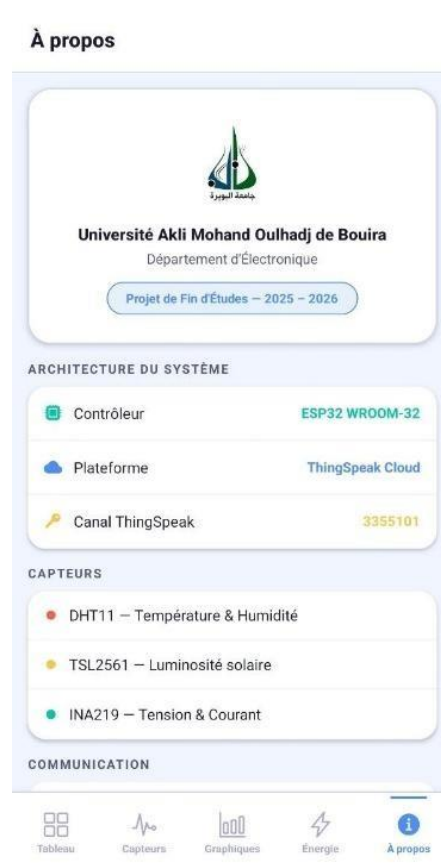


Figure III-15:Interface de l'application

## Chapitre III : Conception et réalisation

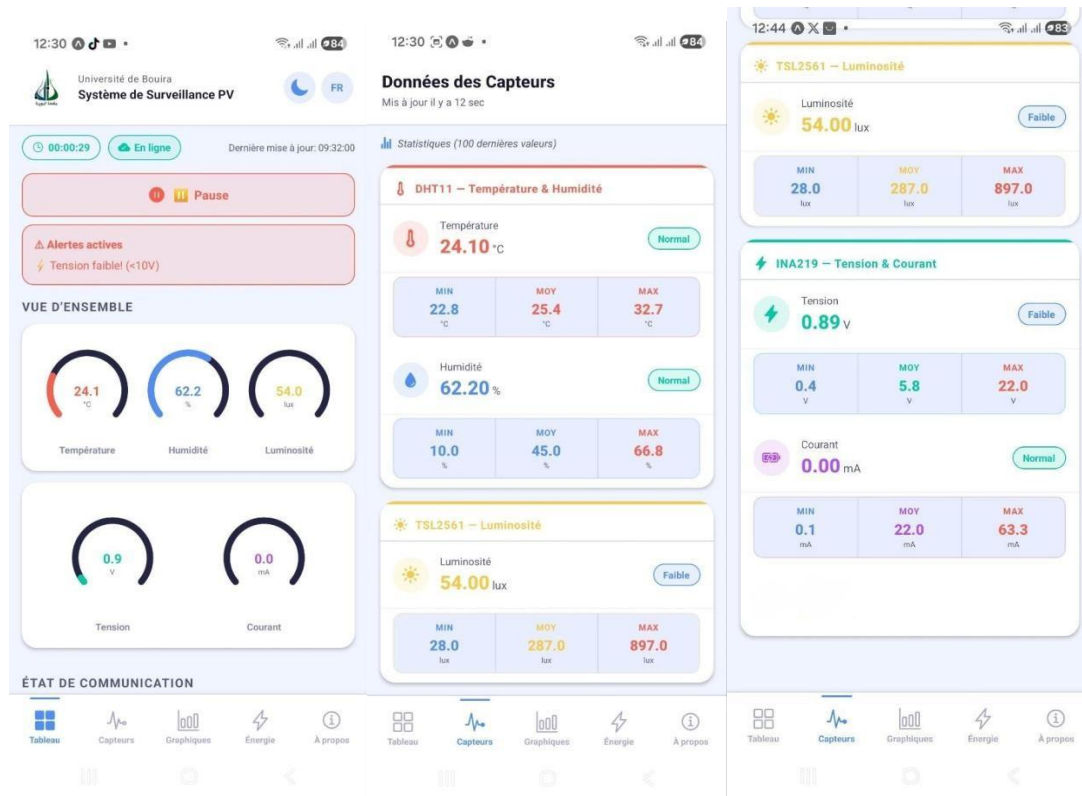


Figure III-16:Supervision des paramètres et résultats des capteurs dans l'application

### III.8.3 Visualisation graphique des données :

Les données collectées par les capteurs sont représentées sous forme de courbes dans un document PDF afin de faciliter leur analyse et leur interprétation. Ces courbes dans la figure III.16 illustrent l'évolution temporelle des paramètres mesurés, tels que la température, l'humidité, et la tension, courant produit. La représentation graphique permet d'identifier rapidement les tendances, les variations périodiques ainsi que les anomalies éventuelles dans les données. [34]

## Chapitre III : Conception et réalisation

### Graphiques

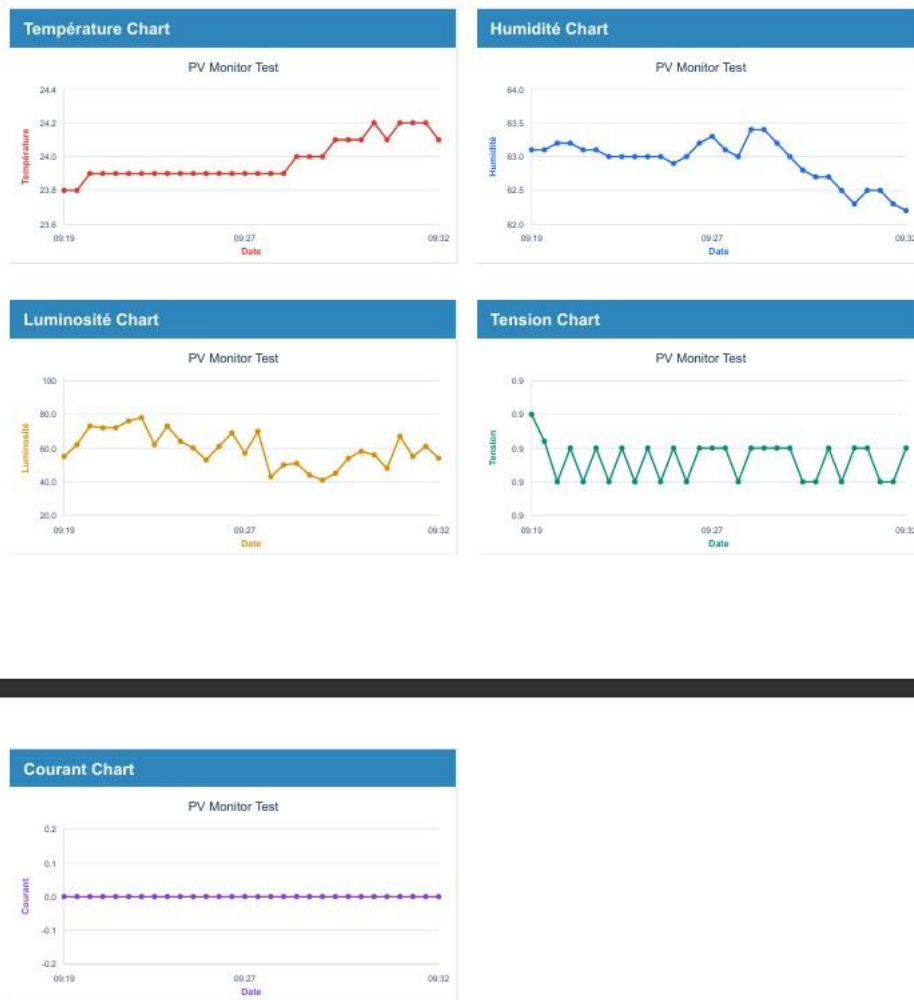


Figure III-17: Représentation graphique des données acquises par le système

### III.8.4 Visualisation des alertes SMS :

Un message d'alerte est transmis automatiquement par le module GSM SIM800L afin de signaler l'indisponibilité du réseau Wifi, En effet, il contient également les dernières mesures enregistrées par les capteurs avant l'interruption de la connexion, permettant ainsi à l'utilisateur de disposer des informations les plus récentes malgré la panne. La figure III.17, montre le message SMS qui s'affiche sur le téléphone de l'utilisateur à la perte du réseau WiFi. [24][34]

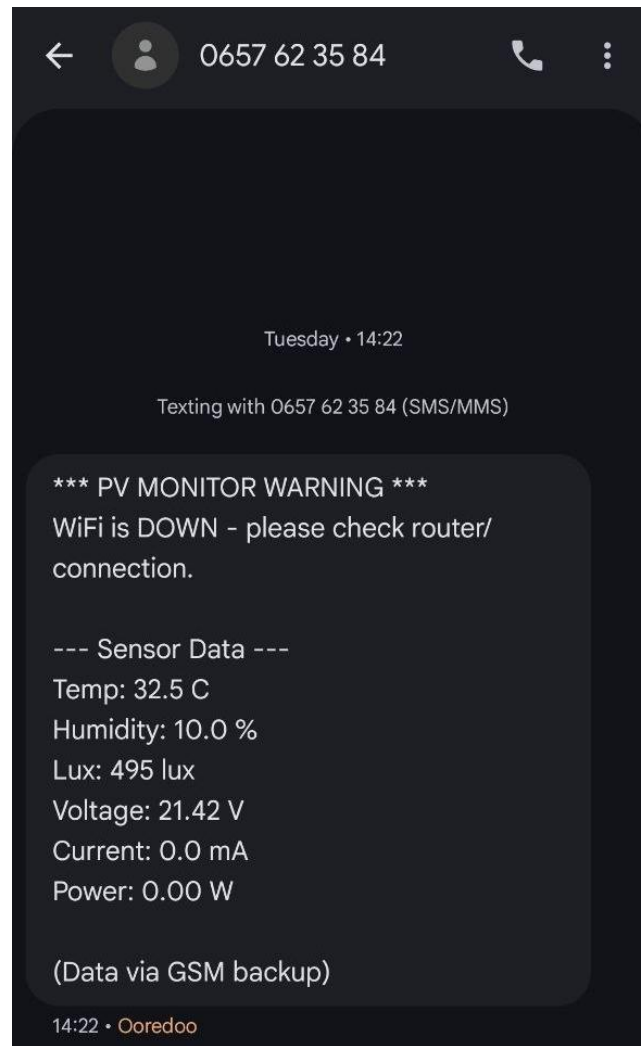


Figure III-18: Les résultats obtenus via un SMS

Notant que les données reçues via la liaison LoRa par le nœud ESP32 RX sont également transmises à ThingSpeak et restent accessibles sur l'interface PC et l'application Android, assurant ainsi une continuité totale de la supervision même en l'absence de réseau WiFi côté émetteur.

### III.9 Conclusion :

Ce chapitre était consacré à la mise en œuvre pratique du système de surveillance photovoltaïque. Le schéma synoptique et l'organigramme nous ont permis de présenter l'architecture globale du système et son fonctionnement. A travers les schémas électriques de câblage réalisés sous Circuit Designer IDE, nous avons détaillé jusqu'à obtenir un montage physique complet sur breadboard.

Les tests expérimentaux menés ont confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble de la chaîne de mesure, depuis l'acquisition des données environnementales et électriques jusqu'à leur

## **Chapitre III : Conception et réalisation**

---

visualisation en temps réel sur les interfaces de supervision PC et Android. Les résultats obtenus démontrent la fiabilité et la précision des mesures collectées par le système.

Le mécanisme de communication redondante a été également validé avec succès. Si le réseau WiFi est inaccessible, le système passe automatiquement au réseau GSM pour l'envoi d'une alerte SMS, puis sur la liaison LoRa pour que la supervision se poursuive. Ces résultats dans leur ensemble constituent une base solide pour d'éventuelles améliorations futures du système. [5][30]

# **Conclusion Générale**

## **Conclusion générale**

Le but de ce travail est la conception et la réalisation d'une station de mesure IoT dédiée à la collecte des données d'un champ photovoltaïque, en réponse au besoin croissant

---

de systèmes de surveillance intelligents, fiables et adaptés aux contraintes des sites isolés. Le système réalisé fonctionne grâce au microcontrôleur ESP32 qui fait office d'unité centrale de traitement, complété par trois capteurs associés : le DHT11 pour la température et l'humidité, le TSL2561 pour l'éclairage solaire et l'INA219 pour la tension, le courant et la puissance électrique. L'architecture de communication adoptée est redondante à trois niveaux (WiFi, GSM SIM800L, LoRa Ra-02) pour garantir la continuité de la transmission des données quel que soit le réseau disponible.

Les résultats expérimentaux obtenus ont confirmé le bon fonctionnement de l'ensemble du système. Les mesures collectées en temps réel ont été transmises avec succès vers la plateforme cloud ThingSpeak et visualisées simultanément sur une interface PC développée avec React Native ainsi que sur une application Android. Le mécanisme de commutation automatique entre les modes de communication a été vérifié en situation. Lorsqu'en situation, le WiFi devient inaccessible, le module GSM alerte par SMS, les dernières mesures sont envoyées, et la liaison LoRa assure la continuité de la supervision.

Ce projet est une contribution concrète à la mise en œuvre de solutions IoT pour la surveillance des systèmes d'énergie renouvelable en Algérie. Il montre que l'on peut mettre en place un système de surveillance peu coûteux, fiable et capable d'utiliser plusieurs canaux, qui s'adapte aux spécificités du territoire algérien.

Pour améliorer le système, on pourrait intégrer des algorithmes d'intelligence artificielle afin de détecter automatiquement les anomalies et de prédire la production d'énergie, ajouter des capteurs supplémentaires comme un anémomètre pour la vitesse du vent et un pluviomètre, et étendre le système à une architecture multi-nœuds pour surveiller des champs photovoltaïques de grande envergure. En utilisant le protocole MQTT plutôt que les requêtes HTTP, on pourrait aussi réduire la consommation énergétique et rendre le système plus réactif.

# **Références Bibliographie**



- [1] CDER. Atlas solaire de l'Algérie. Alger, 2011.
- [2] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Snapshot of Global PV Markets. Annual Report, 2023.
- [3] CHOUDER A., SILVESTRE S. Automatic Supervision and Fault Detection of PV Systems Based on Power Losses Analysis. Energy Conversion and Management, 2010.
- [4] OTHMAN N., IBRAHIM A., HUSSIN M.Z. Photovoltaic System Monitoring via IoT using ESP32 and ThingSpeak. Journal of Physics Conference Series, 2021.
- [5] ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 Series Datasheet Version 3.4. 2022.
- [6] LABOURET A., VILLOZ M. Énergie solaire photovoltaïque. Dunod, Paris, 2010.
- [7] REKIOUA D., MATAGNE E. Optimization of Photovoltaic Power Systems. Springer, Londres, 2012.
- [8] MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES. Programme National des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique à l'Horizon 2030. Alger, 2015.
- [9] BELHADJ MOHAMMED. Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister, Béchar, 2008.
- [10] HANANOU F., ROUABAH A. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque. Mémoire de Master, Ouargla, 2014.
- [11] CHENNI R., MAKHLOUF M., KERBACHE T., BOUZID A. A Detailed Modeling Method for Photovoltaic Cells. Energy, 2007.
- [12] DUFFIE J.A., BECKMAN W.A. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley and Sons, 2013.
- [13] LABOURET A., CUMUNEL P., BRAUN J-P., FARAGGI B. Cellules solaires : les bases de l'énergie photovoltaïque. Dunod, Paris, 2023.
- [14] BRIGNAND SYLVAIN. Installations solaires photovoltaïques. Dunod, Paris, 2012.
- [15] FÉMIAN N., PETRONE G., SPAGNUOLO G., VITELLI M. Power Electronics and Control Techniques for Maximum Energy Harvesting in Photovoltaic Systems. CRC Press, 2012.

- [16] BOURAIOU A., HAMOUDA M., CHAKER A. Analysis and Evaluation of the Impact of Climatic Conditions on PV Modules Performance in Desert Environment. *Energy Conversion and Management*, 2015.
- [17] TOBNAGHI M., MADATOV R., NADERI D. The Effect of Temperature on Electrical Parameters of Solar Cells. *International Journal of Advanced Research in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering*, 2013.
- [18] CHEGAAR M., AZZOUZI G., MIALHE P. Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters. *Solid-State Electronics*, 2007.
- [19] WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Genève, 2021.
- [20] SILVESTRE S., CHOUDER A., KARATEPE E. Automatic Fault Detection in Grid Connected PV Systems. *Solar Energy*, 2013.
- [21] HADDADI M., BOUDGHÈNE STAMBOULI M., DRID S. Conception et réalisation d'un système de supervision pour installation photovoltaïque. *Revue des Énergies Renouvelables*, 2007.
- [22] BOURAIOU A., HAMOUDA M., CHAKER A., SADOK M. Monitoring and Diagnosis of PV Field in Saharan Environment. *Energy Procedia*, 2015.
- [23] DJAMAI M., KHERICI N. Wireless Sensor Network Energy Consumption for Environmental Monitoring. *Procedia Computer Science*, 2013.
- [24] SIMCOM WIRELESS SOLUTIONS. *SIM800L Hardware Design Manual*. 2013.
- [25] YUCEF-ALI F., ZERROUKI H., CHAKER A. Conception d'un système de surveillance à distance d'un générateur photovoltaïque basé GSM. *Séminaire SIENR, Ghardaïa*, 2014.
- [26] SEMAOUI S., ARAB A., BACHA S., AZOUI B. New Strategy of Energy Management for a Photovoltaic System Intended for Remote Housing. *Solar Energy*, 2013.
- [27] AOSONG ELECTRONICS. *DHT11 Technical Data Sheet*. 2010.
- [28] AMS AG. *TSL2561 Light-to-Digital Converter Datasheet*. 2007.
- [29] TEXAS INSTRUMENTS. *INA219 Zero-Drift Current and Power Monitor Datasheet*. 2015.

## Références bibliographiques

---

- [30] SEMTECH CORPORATION. SX1276/77/78/79 LoRa Transceiver Datasheet. 2019.
- [31] LORA ALLIANCE. LoRaWAN Specification Version 1.0.4. 2020.
- [32] ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32-WROOM-32 Datasheet Version 3.2. 2021.
- [33] ARDUINO. Arduino IDE Documentation. 2024.
- [34] MATHWORKS. ThingSpeak Documentation. 2024.