



Université de Bouira
Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : ELN M2

Spécialité : ESE



Autorisation de déposer un mémoire de Master
-après soutenance et levé des réserves-
(Une autorisation/mémoire)

Je soussigné, l'enseignant : Yassa Nacera

Encadreur de l'étudiant (nom et prénom) : 1- Yahiaoui Amir

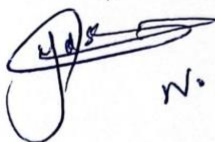
2- Hamoumi Lamine

Ayant soutenu le mémoire de master intitulé : Réalisation d'une mini station météo solaire à base de ESP32 avec communication Pybrico

Inscrit dans la faculté des sciences et des sciences appliquées dans la spécialité citée en haut, promotion : 2024/2025.

Et après avoir vu et consulté le mémoire dans sa forme finale (après soutenance et levé des réserves), nous autorisons les étudiants à l'imprimer et le déposer aux bibliothèques centrale et de la faculté.

Signature du rapporteur


N. JASSAT

Signature du président de jury


Bouira le : 15/07/2025






ID: jcv0rz-196677

Rapport d'analyse de la similarité textuelle

- Nom du document: **Mémoire de fin d'étude .docx.pdf**
- Soumis par: **Aggoun Ghania** Enseignant
- Date de soumission: **2025-06-10**



Taux global de similarité

- 15.8% Similarité Forte
- 0.0% Exclu manuellement



Nombre de sources

149 sources internet
31 sources Thèses-Algérie
0 sources dépôt privé



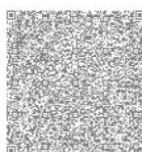
Passages surlignés

15047 mots
107071 caractères
0.7% de citations

Ce document est un rapport d'analyse et de détection de similarité textuelle qui peut fournir des preuves pour l'établissement d'un rapport de plagiat. Il revient à l'examineur, l'encadrant ou bien au comité déontologique de l'université ou de l'école d'émettre un avis quant au statut de plagiat du document analysé.

© Consultez l'arrêté N° 1082 du 27 Décembre 2020 fixant les règles relatives à la prévention et la lutte contre le plagiat pour en savoir plus concernant ce qui est considéré comme étant un acte de plagiat, les procédures ainsi que les sanctions.

Signature d'intégrité



Cachet et Signature



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
Spécialité : Electronique des systèmes embarqués

Réalisé par :

HAMOUMI Lamine
Et
YAHIAOUI Amir

Thème

Réalisation d'une mini station météo solaire à base de ESP32
avec communication hybride

Soutenu le : 08 / 07 / 2025

Devant les membres de Jury :

● Mr MEDJEDOUB Smail	M.A.A	Université de Bouira	Président
● Mr ISSAOUNI Salim	M.A.A	Université de Bouira	Examineur
● Mme YASSA Nacera	M.C.A	Université de Bouira	Encadreur
● Mr FERGANI Okba	M.C.B	Université de Bouira	Co-encadreur

Année Universitaire : 2024 - 2025

Dédicaces

Je dédie ce travail :

À mes parents bien-aimés, qui m'ont toujours encouragé dans mes études malgré les difficultés. Votre fierté est ce qui me motive chaque jour.

À mes frères et soeurs, merci pour votre soutien inconditionnel pendant ces années. Même lorsque je doutais, vous étiez là pour me redonner confiance.

À mes enseignants du département de génie électrique de l'Université de Bouira, pour leur engagement, leur précieuse guidance et les connaissances qu'ils m'ont transmises durant mes années de Licence et de Master.

À mes amis, pour leur amitié sincère, leur soutien indéfectible et les moments partagés qui ont enrichi cette aventure.

Merci à chacun d'entre vous pour avoir contribué à l'aboutissement de ce thème.

HAMOUMI Lamine

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

À mes chers parents, dont le soutien et l'encouragement tout au long de mes années d'études ont été essentiels à ma réussite, ainsi qu'à toute ma famille.

À l'ensemble de mes professeurs et enseignants, qui m'ont accompagné tout au long de mon parcours scolaire et ont contribué à mon succès académique.

À tous mes amis et amies, pour leur précieuse présence.

À toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont apporté leur aide à la réalisation de ce travail.

YAHIAOUI Amir

Remerciements

Avant tout, nous exprimons notre profonde gratitude à ALLAH, Le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la volonté et le courage d'accomplir notre parcours universitaire et de mener ce travail à son terme, malgré les défis rencontrés.

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui nous ont soutenus et accompagnés tout au long de ce projet, en particulier :

- **Mme YASSA Nacera** et **M. FERGANI Okba**, notre encadreur et co-encadreur, pour leur accueil bienveillant, leur disponibilité constante et leurs précieux conseils. Grâce à leur accompagnement et à leur orientation, nous avons pu mener à bien ce travail et surmonter les difficultés rencontrées. Leur engagement a été un élément clé de la réussite de ce projet.
- Tous nos **enseignants**, qui ont partagé avec nous leur savoir et ont contribué à notre formation tout au long de notre cursus universitaire.
- Les **membres du jury**, pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant notre travail avec bienveillance et professionnalisme.

Enfin, nos sincères remerciements vont à nos familles et amis, dont le soutien et les encouragements ont été une source précieuse de motivation tout au long de cette aventure.

Résumé

Ce projet vise à réaliser une mini station météo solaire autonome basée sur un microcontrôleur ESP32. Alimentée par un panneau solaire associé à une batterie LiPo rechargeable par ce panneau, la station collecte des données environnementales (température, humidité, luminosité, pluie, quantité de précipitation) à l'aide des capteurs adaptés. Les données sont traitées par l'ESP32 et transmises en temps réel selon deux modes complémentaires grâce à une communication hybride : pour l'envoi vers la plateforme ThingSpeak, nous utilisons le Wi-Fi, permettant une visualisation à distance et en ligne des conditions météorologiques sous forme de graphiques et d'historiques ; pour l'interaction par SMS vers un téléphone portable, nous faisons appel au module GSM. Tous les composants sont protégés dans un boîtier étanche, assurant un fonctionnement fiable en extérieur. Ce dispositif constitue une solution autonome, écologique et connectée pour la surveillance des conditions climatiques.

Mots clés : Mini station météo solaire, ESP32, panneau solaire, capteurs, module GSM, ThingSpeak, Wi-Fi

Abstract

This project aims to build a solar-powered autonomous mini weather station based on an ESP32 microcontroller. Powered by a solar panel connected to a rechargeable LiPo battery, the station collects environmental data (temperature, humidity, light intensity, rainfall, precipitation level) using appropriate sensors. The data is processed by the ESP32 and transmitted in real time using a hybrid communication system: Wi-Fi is used to send the data to the ThingSpeak platform for remote and online visualisation in the form of graphs and history logs, while SMS communication with a mobile phone is handled via a GSM module. All components are enclosed in a waterproof case, ensuring reliable outdoor operation. This device offers an autonomous, ecological, and connected solution for monitoring weather conditions.

Keywords: Mini solar weather station, ESP32, solar panel, sensors, GSM module, ThingSpeak, Wi-Fi

الملخص

يهدف هذا المشروع إلى إنجاز محطة أرصاد جوية مصغرة وذاتية التشغيل تعتمد على المتحكم الدقيق ESP32. يتم تزويدها بالطاقة عبر لوحة الطاقة الشمسية المتصلة ببطارية LiPo قابلة لإعادة الشحن من خلال نفس اللوحة. تقوم المحطة بجمع البيانات البيئية مثل درجة الحرارة، نسبة الرطوبة، شدة الإضاءة، حالة المطر وكمية التساقطات، وذلك باستخدام مستشعرات مخصصة لكل معطى مناخي. تتم معالجة هذه البيانات بواسطة وحدة ESP32 ثم تُرسل في الوقت الفعلي عبر طريقتين متكاملتين باستخدام اتصال هجين: الأولى عبر شبكة Wi-Fi نحو منصة ThingSpeak، ما يسمح بعرض البيانات عن بُعد على الإنترنت في شكل رسوم بيانية وسجلات؛ والثانية عبر رسائل SMS تُرسل إلى هاتف محمول باستخدام وحدة GSM. جميع المكونات محمية داخل علبة مقاومة للماء، لضمان التشغيل المستقر في الظروف الخارجية. يُعد هذا النظام حلاً مستقلاً، بيئياً ومتصلاً لمراقبة الأحوال الجوية.

الكلمات المفتاحية : محطة أرصاد جوية مصغرة، ESP32 ، لوحة الطاقة الشمسية، المستشعرات، وحدة GSM Wi-Fi ، ThingSpeak

Table des matières

Remerciements	I
Résumé	II
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux	X
Listes des Acronymes et Symboles	XI
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralité sur les stations météorologiques	3
1. Introduction	4
2. La définition d'une station météorologique	4
3. Historique de la météorologie et des stations météorologiques	4
4. Les types de stations météorologiques existantes	5
4.1. La station météo analogique	5
4.2. La station météo professionnelle	6
4.3. La station météo portable	7
4.4. La station météo agricole	8
4.5. La station météo marine	9
4.6. La station météo domestique (personnelle)	10
4.7. La station météo routière	11
5. Les paramètres météorologiques à mesurer	11
5.1. La température	12
5.2. L'humidité	12
5.3. La pression atmosphérique	13
5.4. Le vent	13
5.5. L'intensité lumineuse	14
5.6. Les précipitations	14

6. Les instruments de mesure des paramètres météorologiques	15
6.1. Le thermomètre	15
6.2. L'hygromètre	16
6.3. Le baromètre	17
6.4. L'anémomètre	18
6.5. La girouette	19
6.6. Le pluviomètre	20
6.7. Le pyranomètre	21
6.8. Le ceilomètre	22
6.9. La radiosonde	23
7. Conclusion	24
Chapitre 2 : La conception de la station météo solaire	25
1. Introduction	26
2. Les capteurs	26
2.1. La définition d'un capteur	26
2.2. Les caractéristiques principales d'un capteur	27
2.3. Les différentes classes des capteurs	27
2.3.1. Classification selon la nature du signal de sortie	27
2.3.2. Classification selon le mode de détection	28
2.3.3. Classification selon l'apport énergétique	28
2.3.4. Classification selon la grandeur physique mesurée	29
3. La description des capteurs de la station météo solaire	30
3.1. Capteur de température et d'humidité (DHT22)	30
3.1.1. Description	30
3.1.2. Fonctionnement	31
3.1.3. Caractéristiques techniques	31

3.2. Capteur de pluie (FC-37)	32
3.2.1. Description	32
3.2.2. Fonctionnement	32
3.2.3. Caractéristiques techniques	33
3.3. Capteur de niveau d'eau (T1592 P)	33
3.3.1. Description	33
3.3.2. Fonctionnement	34
3.3.3. Caractéristiques techniques	34
3.4. Capteur de lumière (BH1750)	34
3.4.1. Description	34
3.4.2. Fonctionnement	35
3.4.3. Caractéristiques techniques	35
4. Alimentation de la station météo solaire	36
4.1. Caractéristiques techniques du panneau solaire JZ-PV130215Z	37
4.2. Caractéristiques techniques de la batterie LiPo 606090	38
5. La carte ESP32	38
5.1. La description de l'ESP32	38
5.2. Les caractéristiques principales de l'ESP32	39
5.3. Les modèles de la carte ESP32	40
5.4. L'environnement de développement de l'ESP32	45
5.4.1. L'Arduino IDE	45
5.4.2. PlatformIO	45
5.4.3. ESP-IDF	45
5.4.4. MicroPython	46
6. Choix de l'ESP32	47
7. Le module GSM SIM800L EVB	48

7.1. Description	48
7.2. Fonctionnement	48
7.3. Alimentation	48
7.4. Caractéristiques techniques	49
7.5. Applications typiques	50
8. Gestionnaire d'énergie solaire DFRobot (5V/1A)	50
8.1. Description	50
8.2. Fonctionnement	51
8.3. Caractéristiques techniques	51
9. Le module RTC (Real time clock) ELEGOO DS1307 MODULE-V03	52
9.1. Description	52
9.2. Fonctionnement	52
9.3. Caractéristiques techniques	53
10. Les convertisseurs de la station météo	53
10.1. Convertisseur DC-DC STEP DOWN LM2596S-ADJ 3A	53
11. L'application ThingSpeak pour l'affichage des résultats	54
11.1. Définition	54
11.2. Configuration de ThingSpeak	55
12. Conclusion	56
Chapitre 3 : La réalisation de la station météo solaire	57
1. Introduction	58
2. La description détaillée de la station météo réalisé	58
2.1. Les composants principaux	58
2.1.1. Capteurs	58
2.1.2. Module de communication	59
2.1.3. Gestion de l'alimentation	59

2.1.4. Gestion du temps et de la synchronisation	59
2.2. Déroulement des opérations du système	59
2.2.1. Initialisation du système	59
2.2.2. Collecte des données environnementales	59
2.2.3. Transmission des données	60
2.2.4. Interaction à distance	60
2.2.5. Gestion de l'énergie	60
2.3. Fonctionnement de l'alimentation selon les périodes jour/nuit	60
2.3.1. Pendant la journée	60
2.3.2. Pendant la nuit	61
3. Le schéma synoptique et l'organigramme de la station météo réalisé	61
4. Le branchement des composants	64
5. Le schéma électrique sous le logiciel " Cirket Designer IDE "	67
6. Vue finale de la station météo réalisé	68
7. Les résultats obtenus par la station météo solaire	68
7.1. Les résultats obtenus sous forme d'un SMS sur le téléphone portable	68
7.2. Les résultats obtenus dans la plateforme ThingSpeak	71
8. Conclusion	75
Conclusion générale	76
Perspectives	77
Références bibliographiques	78

Liste des figures

Figure 1 : La station météo analogique	6
Figure 2 : Quelques modèles de station météo professionnelle	7
Figure 3 : Une station météo portable	8

Figure 4 : Une station météo agricole	9
Figure 5 : Une station météo marine	10
Figure 6 : Quelques modèles de station météo domestique	10
Figure 7 : Une station météo routière	11
Figure 8 : Les différents paramètres météorologiques à mesurer	12
Figure 9 : Thermomètre à cadran et aiguille	16
Figure 10 : Hygromètre à cheveux	17
Figure 11 : Le baromètre anéroïde	17
Figure 12 : L'anémomètre à coupelles	18
Figure 13 : La girouette	19
Figure 14 : Pluviomètre à lecture directe	21
Figure 15 : Le pyranomètre	22
Figure 16 : Le ceilomètre	23
Figure 17 : Ballon avec radiosonde pour effectuer un radiosondage	24
Figure 18 : Le fonctionnement d'un capteur	27
Figure 19 : Schéma bloc d'un capteur passif	29
Figure 20 : Schéma bloc d'un capteur actif	29
Figure 21 : Capteur de Température et d'Humidité (DHT22)	32
Figure 22 : Capteur de détection de pluie (FC-37)	33
Figure 23 : Capteur de niveau d'eau (T1592 P)	33
Figure 24 : Capteur de lumière (BH1750)	34
Figure 25 : Le panneau solaire “ JZ-PV130215Z ”	37
Figure 26 : La batterie “LiPo 606090”	38
Figure 27 : Les broches de la carte ESP32 DEV KIT V1	40
Figure 28 : Interface de logiciel Arduino IDE	47
Figure 29 : Le module GSM “ SIM800L EVB ”	50

Figure 30 : Le module “ Solar power manager DFRobot (5V/1A) ”	51
Figure 31 : Le module RTC “ ELEGOO DS1307 MODULE-V03 ”	53
Figure 32 : Le convertisseur “ DC DC STEP DOWN LM2596S-ADJ 3A ”	54
Figure 33 : Le schéma synoptique de la station météo	61
Figure 34 : L'organigramme de fonctionnement général	62
Figure 35 : Le schéma électrique de la station météo réalisé	67
Figure 36 : Vue finale de la station météo réalisé	68
Figure 37 : Les résultats obtenus via un SMS	69
Figure 38 : Les résultats affichés sur la plateforme ThingSpeak via le Web	71
Figure 39 : Les résultats affichés sur l'application ThingSpeak	72

Liste des tableaux

Table 1 : Les modèles de la carte ESP32	45
Table 2 : Résumé des outils de développement disponibles	46
Table 3 : Branchement de capteur de température et d'humidité (DHT22)	65
Table 4 : Branchement de capteur de lumière (BH1750)	65
Table 5 : Branchement de capteur de pluie (FC-37)	65
Table 6 : Branchement de module RTC (DS1307)	65
Table 7 : Branchement de capteur de niveau d'eau (T1592 P)	66
Table 8 : Branchement de module Solar Power Manager DFRobot (5V/1A)	66
Table 9 : Branchement de module GSM SIM800L EVB	66
Table 10 : Branchement de convertisseur DC DC STEP Down	66
Table 11 : Les résultats obtenus prennent la forme d'un tableau	73

Listes des Acronymes et Symboles

Liste des Acronymes :

AO	Analogue Output (Sortie analogique)
CVC	Chauffage, Ventilation et Climatisation
DC	Direct Current (Courant continu)
DO	Digital Output (Sortie numérique)
GPIO	General Purpose Input/Output
GND	Ground (La terre)
GPRS	General Packet Radio Service
GRUAN	Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network
GSM	Global System for Mobile Communications
I2C	Inter-Integrated Circuit
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
LiPo	Lithium Polymère
LIDAR	Light Detection and Ranging
LVDT	Linear Variable Differential Transformer
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor
NIST	National Institute of Standards and Technology
OMM	Organisation météorologique mondiale
PWM	Pulse Width Modulation
RTC	Real-Time Clock
RWIS	Road Weather Information Systems
RX	Receiver (Récepteur)

SCL	Serial Clock (Horloge série)
SDA	Serial DATA (Données en série)
SPI	Serial Peripheral Interface
TCP/IP	Transmission Control Protocol / Internet Protocol
TOR	Capteur Tout Ou Rien
TX	Transmitter (Émetteur)
USB	Universal Serial Bus
VCC	Voltage Common Collector (Tension au collecteur commun)

Liste des symboles :

°C	Température en degré Celsius
°F	Température en Fahrenheit
°K	Température en Kelvin
hPa, Pa	Hectopascal, Pascal
Km/h	Vitesse du vent en kilomètre par heure
MHz	Mégahertz
MJ/m²	Mégajoules par mètre carré
mmHg	Millimètre de mercure
m/s	Vitesse du vent en mètre par seconde
N/m²	Newton par mètre carré
Wh/m²	Watt-heure par mètre carré

Introduction générale

Les stations météorologiques sont construites dans le but de collecter des données quantitatives sur les conditions météorologiques d'un lieu. La surveillance des conditions météorologiques dans un environnement est considérée comme très importante de nos jours en raison des changements météorologiques incertains qui se produisent quotidiennement.

La météo est l'étude des conditions atmosphériques qui entourent notre planète. Elle joue un rôle crucial dans notre vie quotidienne en influençant les activités extérieures, l'agriculture, les transports et bien d'autres domaines. Et de nos jours, il est essentiel d'accéder en temps réel aux informations sur les paramètres environnementaux locaux [1].

Notre projet vise à offrir ces données de manière simple et accessible à toute personne souhaitant se tenir régulièrement informée des conditions météorologiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette perspective, en présentant la conception et la réalisation d'une mini station météo solaire, basée sur la carte de développement ESP32. Cette station est conçue pour être autonome sur le plan énergétique grâce à l'utilisation d'un panneau solaire associé à une batterie lithium-polymère (LiPo), ce qui permet son déploiement dans des zones isolées sans accès à une alimentation électrique conventionnelle. L'ESP32, connu pour sa faible consommation d'énergie et ses capacités de connectivité (Wi-Fi, Bluetooth), constitue le cœur du système et assure le traitement, l'enregistrement et la transmission des données environnementales collectées par différents capteurs.

Le système est capable de transmettre les données collectées en temps réel grâce à une communication hybride reposant sur deux technologies complémentaires. D'une part, les données environnementales sont envoyées via Wi-Fi vers la plateforme en ligne ThingSpeak à l'aide du microcontrôleur ESP32, permettant une visualisation à distance sous forme de graphiques et d'historiques consultables depuis un ordinateur ou une application mobile. D'autre part, le système utilise un module GSM pour envoyer des SMS directement vers le téléphone portable de l'utilisateur, assurant une interactivité instantanée même en l'absence de réseau Internet. Cette double modalité de communication offre une grande flexibilité d'utilisation, adaptée aux besoins spécifiques de l'utilisateur ainsi qu'aux contraintes de connectivité du site d'installation.

L'ensemble des composants est intégré dans un boîtier étanche, garantissant une protection efficace contre les conditions extérieures et assurant un fonctionnement fiable sur le long terme. Ce projet illustre donc une solution technologique moderne, écologique et accessible, en réponse aux enjeux actuels liés à la surveillance de l'environnement.

Le premier chapitre présente les généralités sur les stations météorologiques, leurs types, les paramètres mesurés et les instruments associés. Le deuxième chapitre aborde la conception de la station météo solaire, en détaillant les capteurs, l'alimentation, la carte ESP32 et les modules utilisés. Le troisième chapitre est consacré à la réalisation pratique de la station, en décrivant les composants, les branchements, le fonctionnement et les résultats obtenus.

Enfin, une conclusion générale qui résume l'ensemble de travaux de ce mémoire et on présente les perspectives envisagées.

Chapitre 1 : Généralité sur les stations météorologiques

1. Introduction

La météorologie joue un rôle fondamental dans de nombreux domaines de la vie quotidienne, tels que l'agriculture, le transport, la gestion des ressources naturelles, ou encore la prévention des catastrophes naturelles. À la base de toute prévision ou analyse météorologique se trouve un dispositif essentiel : la station météorologique. Cet outil permet de collecter et d'enregistrer, de manière continue et précise, les différentes données climatiques telles que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, le vent ou encore les précipitations.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord définir ce qu'est une station météorologique, puis retracer brièvement l'évolution historique de la météorologie et des dispositifs associés. Nous présenterons ensuite les différents types de stations météorologiques existantes, chacun répondant à des besoins spécifiques selon le domaine d'application. Enfin, nous détaillerons les principaux paramètres météorologiques à mesurer ainsi que les instruments utilisés pour leur acquisition, afin de mieux comprendre le fonctionnement global des systèmes de mesure météorologique modernes.

2. La définition d'une station météorologique

Le terme « station météo » désigne de manière générale un ensemble de dispositifs conçus pour mesurer et transmettre différentes données physiques liées aux conditions climatiques. Parmi ces paramètres figurent notamment la température, l'humidité de l'air, la vitesse du vent ainsi que le niveau des précipitations, entre autres. Les capteurs chargés de collecter ces données sont intégrés dans une structure dédiée, et connectés à une unité centrale qui assure l'enregistrement, le stockage et parfois la transmission automatique des informations vers une base de données pour traitement et analyse [2].

3. Historique de la météorologie et des stations météorologiques

Les stations météorologiques ont une histoire riche et évolutive, reflétant les progrès scientifiques et technologiques au fil des siècles.

La météorologie est une science relativement récente. Bien que les savants de la Grèce antique, notamment Aristote au IV^e siècle av. J.-C., aient manifesté un vif intérêt pour l'étude de l'atmosphère, comme en témoigne son traité « Étude des éléments de l'air », dont une large partie est dédiée aux phénomènes atmosphériques, les avancées dans ce domaine sont restées

limitées jusqu'à l'époque moderne. Ce n'est qu'à partir du milieu du XVII^e siècle que les premières observations scientifiques au sol deviennent possibles, grâce à l'invention des instruments de mesure essentiels : le thermomètre de Galilée (1641), le pluviomètre de Castelli (1639), le baromètre de Torricelli (1643), ainsi que l'anémomètre et l'hygromètre de Hooke (1667). Ces progrès vont de pair avec le développement des lois physiques des gaz et de la mécanique des fluides. En 1646, Pascal reprend l'expérience de Torricelli et, deux ans plus tard, confirme la notion de pression atmosphérique. Au XVIII^e siècle, Hadley met en évidence l'influence de la rotation terrestre sur les vents, Lavoisier identifie la composition de l'air, et en 1783, un ballon explore l'atmosphère jusqu'à 3 400 mètres d'altitude. À la veille du XX^e siècle, en 1899, le lancement de trois ballons-sondes depuis Trappes permet d'atteindre 1 300 mètres d'altitude et de découvrir la stratosphère. Une trentaine d'années plus tard, les ballons sont dotés d'émetteurs transmettant en temps réel les données de température, de pression et d'humidité grâce aux premières radiosondes. Depuis les années 1950, les progrès technologiques, notamment l'apparition du radar, des avions, des fusées et des satellites artificiels, ont permis d'élargir et d'affiner considérablement les connaissances sur les phénomènes atmosphériques [4].

Ces technologies permettent d'améliorer la prévision météorologique, de mieux comprendre les changements climatiques et d'anticiper les phénomènes météorologiques extrêmes. Ainsi, de l'observation empirique aux modèles climatiques avancés, la météorologie s'est transformée en une discipline scientifique clé pour la gestion des risques et la protection de l'environnement.

4. Les types de stations météorologiques existantes

4.1. La station météo analogique

La station météorologique analogique à usage domestique est conçue pour une utilisation en intérieur. Elle intègre trois instruments essentiels : un baromètre, un thermomètre et un hygromètre, permettant de mesurer respectivement la pression atmosphérique, la température ambiante et le taux d'humidité. Comme illustré dans la figure ci-dessous, cette station se distingue par la présence de pointes en bois qui ajoutent une touche esthétique et moderne à l'ensemble.

Elle est composée de trois cadrans circulaires analogiques, chacun dédié à un paramètre spécifique, disposés dans un design élégant et contemporain. Ce type de station offre des mesures instantanées, précises et faciles à lire, ce qui la rend particulièrement adaptée à divers

environnements tels que les résidences, bureaux, jardins ou même à bord de bateaux. En plus de sa fonctionnalité, elle constitue également un élément décoratif discret et utile pour le suivi des conditions atmosphériques intérieures [5].



Figure 1 : La station météo analogique [18]

4.2. La station météo professionnelle

Ce type de station météorologique, largement répandu, est conçu en mettant l'accent sur la fiabilité, la durabilité et la précision. Les stations météorologiques professionnelles doivent se conformer aux normes météorologiques internationales tout en respectant les exigences de précision établies par le *National Institute of Standards and Technology* (NIST).

Les stations météorologiques professionnelles de haute qualité englobent à la fois les meilleures stations météorologiques domestiques et des réseaux multi-stations intégrant des équipements spécialisés. Dans certains cas, des répéteurs sont utilisés afin de transmettre les données météorologiques sur de longues distances [6].

Les données collectées par ces stations sont similaires à celles enregistrées par les meilleures stations météorologiques domestiques, tout en répondant aux exigences spécifiques des utilisateurs finaux. Parmi les paramètres mesurés figurent la température, l'humidité, l'intensité lumineuse et la présence de particules en suspension telles que la poussière ou l'humidité. Par exemple, dans le domaine agricole, l'évaluation de l'efficacité de l'irrigation et du taux d'évaporation de l'eau constitue une donnée essentielle. De même, les gestionnaires d'aéroports et les pilotes doivent disposer d'informations précises sur les conditions météorologiques afin d'assurer la sécurité des opérations aériennes [5].

Qui utilise les stations météorologiques professionnelles ?

- Passionnés de météo
- Entreprises industrielles et commerciales
- Aéroports

- Les agriculteurs
- Organismes gouvernementaux
- Services d'incendie
- Organismes d'événements
- Les compagnies d'assurance
- Ou toute personne ayant besoin d'informations météorologiques précises en temps réel.

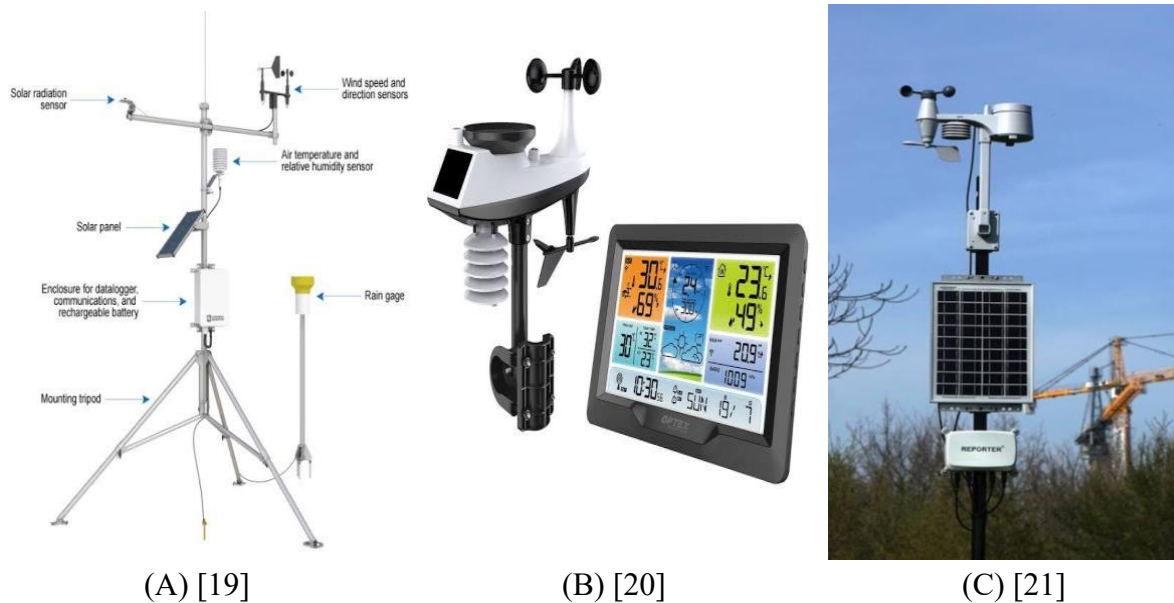


Figure 2 : Quelques modèles de station météo professionnelle

4.3. La station météo portable

Les stations météorologiques portables varient des unités compactes indiquant uniquement la vitesse du vent et la température aux modèles en forme de valise, intégrant l'ensemble des fonctionnalités d'une station météorologique professionnelle ainsi que des capteurs spécialisés, tels que les détecteurs de radiations nucléaires.

Les stations météorologiques portables sont utilisées par :

- Des experts en CVC mesurent le débit d'air et la température.
- Pour les chasseurs et les tireurs, certaines unités incluent un calculateur balistique.
- Les randonneurs et les campeurs trouveront utiles les fonctionnalités haut de gamme comme un altimètre.
- Ils sont utiles lors des courses automobiles pour maintenir les moteurs et les pneus ajustés à la pression barométrique et à la température.
- Les marins et les plaisanciers en ont de nombreuses utilisations.

Les appareils de mesure météorologique portables, de dimensions comparables à celles d'un téléphone mobile, doivent être maintenus en l'air et orientés face au vent. Certains modèles sont équipés de girouettes. Toutefois, ces dispositifs ne permettent pas de mesurer les précipitations, bien que des solutions à cette limitation soient probablement en cours de développement [6].

Les smartphones peuvent également servir de stations météorologiques portables grâce à l'ajout d'accessoires tels qu'un anémomètre ou un thermomètre. De plus, de nombreux téléphones intègrent déjà un baromètre.

Un autre type de station météorologique portable repose sur un enregistreur de données compact, de la taille d'un porte-clés, utilisant la connectivité Bluetooth pour transmettre les informations à un appareil mobile. Ce dispositif intègre diverses fonctionnalités, à l'exception de la mesure du vent et des précipitations [5].



Figure 3 : Une station météo portable [22]

4.4. La station météo agricole

Les stations météorologiques agricoles sont des stations professionnelles spécialement conçues pour répondre aux besoins du secteur agricole. Elles intègrent, en plus des capteurs météorologiques classiques, des capteurs supplémentaires permettant de surveiller des paramètres essentiels pour les cultures.

Parmi ces paramètres figurent la température du sol, l'humidité du sol, l'exposition au rayonnement solaire, ainsi que l'humidité des feuilles et la température de l'eau utilisée pour l'irrigation. Ces mesures sont cruciales pour optimiser les périodes de semis, d'irrigation et de récolte. Les agriculteurs ont également besoin d'être alertés en cas de conditions météorologiques extrêmes telles que le gel, les risques de sécheresse ou d'inondation, afin de

pouvoir protéger rapidement leurs cultures.

Les meilleures stations météorologiques agricoles sont équipées de technologies de communication sans fil qui permettent à des capteurs distants de transmettre leurs données vers une station principale. Cette dernière peut ensuite relayer les informations vers un écran intérieur, un ordinateur ou une application mobile. Grâce à ces dispositifs connectés, les exploitants agricoles peuvent suivre en temps réel l'évolution des conditions climatiques de leurs parcelles, même à distance, ce qui améliore considérablement la gestion agricole de précision [5].



Figure 4 : Une station météo agricole [23]

4.5. La station météo marine

Une station météorologique marine est un dispositif spécialement conçu pour surveiller les conditions atmosphériques et océaniques dans des environnements maritimes. Elle mesure divers paramètres tels que la température de l'air et de la mer, l'humidité relative, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, la hauteur des vagues, la visibilité, ainsi que parfois la salinité et les courants marins. Ces stations peuvent être installées sur des bouées, des plateformes offshore, ou encore sur des navires, et jouent un rôle essentiel dans la navigation, la sécurité maritime, les études climatiques et la prévision des tempêtes. Leur bon fonctionnement repose sur des capteurs robustes, souvent alimentés par énergie solaire, et sur des systèmes de transmission de données en temps réel vers les centres de surveillance [5].

Les environnements proches de l'eau salée sont particulièrement exposés à la corrosion. Ainsi, les stations météorologiques marines doivent présenter une résistance élevée à la corrosion et une étanchéité optimale. Cette exigence concerne aussi bien les stations situées en mer que celles installées sur le littoral. Certains fabricants recommandent d'implanter ces

stations à une distance minimale de 400 mètres du rivage afin de limiter les effets de la corrosion. Par ailleurs, les stations météorologiques de qualité marine se distinguent par leur coût élevé et, pour certaines, par leur esthétique soignée [6].



Figure 5 : Une station météo marine [24]

4.6. La station météo domestique (personnelle)

Destinées aux particuliers et aux passionnés de météorologie, ces stations offrent des mesures locales et en temps réel. Elles sont équipées de capteurs pour surveiller la température, l'humidité, la pression atmosphérique et parfois la qualité de l'air. Certaines versions avancées peuvent se connecter à des réseaux en ligne, permettant le partage des données avec des communautés météorologiques ou l'intégration dans des systèmes domotiques pour optimiser le confort et l'efficacité énergétique du domicile [2].



Figure 6 : Quelques modèles de station météo domestique

4.7. La station météo routière

Installées le long des infrastructures routières, les stations météorologiques routières (appelées aussi stations RWIS (Road Weather Information Systems)) sont des dispositifs automatisés destinés à surveiller en temps réel les conditions météorologiques et l'état de la chaussée. Elles collectent des données précises sur la température de l'air, l'humidité, les précipitations, la visibilité, ainsi que sur la température et l'état de la surface routière (présence d'eau, de verglas, de neige ou d'autres éléments glissants). Grâce à des capteurs embarqués ou intégrés dans la chaussée, ces stations permettent une détection rapide des situations potentiellement dangereuses. Les données recueillies sont transmises aux centres de gestion du trafic pour optimiser la sécurité routière, informer les usagers via des panneaux à messages variables, et guider les décisions concernant le déneigement, le salage ou d'autres opérations de maintenance. Ces stations jouent un rôle stratégique, notamment dans les zones exposées aux conditions climatiques extrêmes ou à fort trafic [2].



Figure 7 : Une station météo routière [27]

Chaque type de station météorologique est conçu pour répondre à des besoins spécifiques, qu'il s'agisse de recherches scientifiques, de sécurité publique, d'applications agricoles ou d'usages domestiques...etc. Le choix du type de station dépendra des objectifs visés, des ressources disponibles et du contexte d'utilisation.

5. Les paramètres météorologiques à mesurer

L'étude des phénomènes météorologiques repose sur l'analyse des différentes variables atmosphériques dans le but d'évaluer leur influence et leur évolution au fil du temps, permettant ainsi l'élaboration de prévisions. Parmi ces variables, les plus déterminantes sont généralement

la température, l'humidité, la pression atmosphérique, la vitesse et la direction du vent, l'intensité lumineuse ainsi que les précipitations.

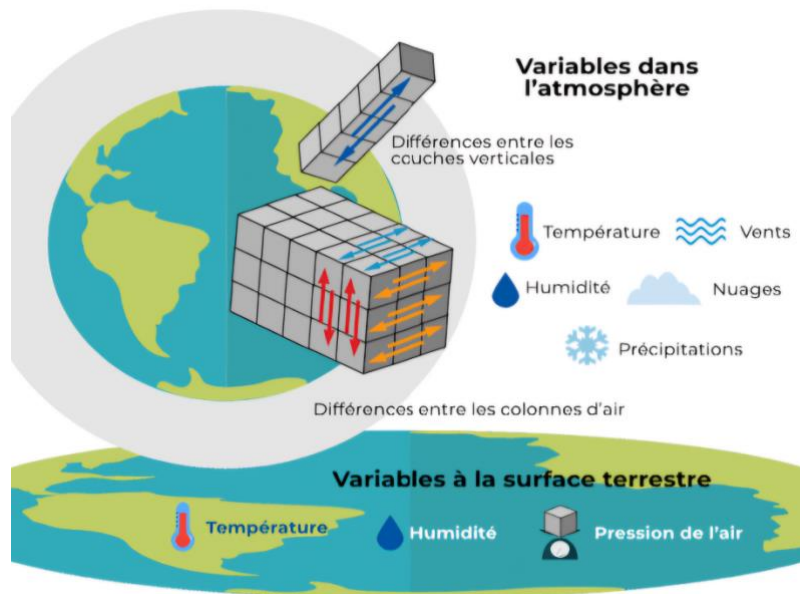


Figure 8 : Les différents paramètres météorologiques à mesurer [28]

5.1. La température

La température est considérée comme une grandeur physique liée à la perception immédiate de la chaleur et du froid. Elle reflète, à l'échelle macroscopique, l'agitation des atomes et des molécules. Ainsi, une température élevée traduit une forte excitation de ces particules.

L'unité de mesure de la température dans le système international est le Kelvin ($^{\circ}\text{K}$). En Europe, l'échelle Celsius ($^{\circ}\text{C}$) est couramment utilisée, tandis que les pays anglo-saxons, notamment les États-Unis, privilégient le Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$).

Dans l'échelle Celsius, la température minimale est de $-273,15^{\circ}\text{C}$, correspondant à 0 K . Les conversions entre ces unités se font selon les formules suivantes :

- $^{\circ}\text{C} = 0,55 \times (^{\circ}\text{F} - 32)$
- $^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273,15$
- $^{\circ}\text{F} = 32 + (1,8 \times ^{\circ}\text{C})$ [6]

5.2. L'humidité

L'humidité désigne la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air. Elle varie en fonction de la température et de la pression atmosphérique. Plus l'air est chaud, plus il peut contenir de

vapeur d'eau. Lorsque l'air atteint sa capacité maximale de rétention de vapeur d'eau à une température et une pression donnée, il est dit saturé.

L'humidité relative correspond au rapport entre la quantité de vapeur d'eau réellement présente dans l'air et la quantité maximale qu'il peut contenir lorsqu'il est saturé. Par exemple, si l'air contient la moitié de cette quantité maximale, l'humidité relative est de 50 %. Une atmosphère chargée de nuages et de brouillard est saturée d'humidité, ce qui signifie que l'humidité relative atteint 100 %. De même, l'air situé au-dessus de l'océan est presque saturé lorsque l'humidité atteint ce niveau. À l'inverse, dans les régions désertiques comme le Sahara, l'humidité relative peut descendre jusqu'à 10 % [6].

Par ailleurs, on distingue l'humidité absolue, qui correspond à la masse de vapeur d'eau (exprimée en grammes) contenue dans un mètre cube d'air humide, pour une température et une pression donnée. Elle peut également être obtenue en multipliant l'humidité relative par l'humidité absolue de saturation [38].

5.3. La pression atmosphérique

La pression atmosphérique correspond à la force exercée par une colonne d'air en un point donné. Elle se mesure en Pascal (Pa), une unité équivalente à un Newton par mètre carré (N/m^2). Au niveau de la mer, la pression barométrique moyenne est d'environ 1 013,25 hectopascals (hPa), et pour 1 hPa = 100 Pa. Cette pression équivaut à celle exercée par une colonne d'eau de plus de 10 mètres de hauteur. Lorsqu'elle descend en dessous de 1 010 hPa, les météorologues parlent de cyclones, généralement associés à un temps orageux dans les latitudes moyennes. À l'inverse, une pression supérieure à 1 020 hPa indique la présence de hautes pressions, favorisant un temps ensoleillé aux mêmes latitudes [6].

5.4. Le vent

En météorologie, le vent se définit comme le déplacement horizontal des masses d'air au sein de l'atmosphère. Ce phénomène naturel résulte principalement des différences de pression atmosphérique entre différentes zones géographiques. La caractérisation du vent repose sur deux paramètres essentiels : sa direction, qui indique l'orientation d'où il souffle, et sa vitesse, également appelée force du vent.

La vitesse du vent est généralement exprimée en kilomètres par heure (km/h) ou en mètres par seconde (m/s). Toutefois, dans les domaines de la navigation maritime et aérienne, les professionnels privilégient l'utilisation des nœuds comme unité de mesure. Un nœud

équivalent à 1,852 km/h.

Il est important de noter que la mesure du vent repose toujours sur une moyenne calculée sur une période donnée, afin d'obtenir une valeur représentative de son intensité. Pour quantifier précisément la vitesse du vent, on utilise un instrument spécifique appelé anémomètre. Cet appareil, couramment employé dans les stations météorologiques, permet d'obtenir des données essentielles pour la prévision du temps, la navigation et l'aéronautique [7].

5.5. L'intensité lumineuse

L'intensité lumineuse, également désignée sous le terme d'insolation, correspond à la quantité de rayonnement solaire reçue par une surface donnée sur une période déterminée. Il constitue un paramètre essentiel en météorologie et en climatologie, influençant divers domaines tels que l'agriculture, l'énergie solaire et le confort thermique des bâtiments.

Cette mesure est généralement exprimée selon les recommandations de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en mégajoules par mètre carré (MJ/m²). Une autre unité couramment utilisée est le watt-heure par mètre carré (Wh/m²), notamment dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque [7].

L'ensoleillement dépend de plusieurs facteurs, dont la latitude, la saison, l'altitude, ainsi que les conditions atmosphériques comme la couverture nuageuse ou la pollution. Il joue un rôle clé dans l'évaluation du potentiel solaire d'une région, permettant d'optimiser la production d'énergie renouvelable et d'adapter les pratiques agricoles aux conditions climatiques locales.

5.6. Les précipitations

La précipitation désigne la chute des gouttes d'eau ou des cristaux de glace formés dans les nuages après condensation et agglomération. Lorsqu'ils deviennent trop lourds pour rester en suspension dans l'air, ils tombent au sol. Il existe plusieurs types de précipitations, parmi lesquels les plus courants sont :

- **La pluie** : Elle résulte de gouttelettes d'eau ou de cristaux de glace qui, en tombant, ne traversent pas de zones où la température est inférieure au point de congélation. La taille des gouttes varie : si elles sont inférieures à 1,5 mm, on parle de bruine ; au-delà, c'est de la pluie.
- **La grêle** : Il s'agit de billes de glace pouvant atteindre une vitesse de chute de 160 km/h. Leur taille peut être impressionnante, parfois proche de celle d'une balle de tennis.

- **Le grésil** : Le grésil désigne une forme de précipitations résultant de la congélation complète de gouttes de pluie en traversant une épaisse couche d'air dont la température est inférieure à 0 °C. Les particules de glace, de forme généralement sphérique, mesurent moins de 5 mm de diamètre et ont tendance à rebondir au sol.
- **La neige** : Elle se forme lorsque la vapeur d'eau se transforme directement en cristaux de glace qui s'agglomèrent pour former des flocons. Ces derniers traversent des couches d'air suffisamment froides pour ne pas fondre avant d'atteindre le sol [7].

6. Les instruments de mesure des paramètres météorologiques :

Les instruments de mesure météorologiques jouent un rôle essentiel dans l'observation et la prévision des conditions atmosphériques. Ils sont utilisés dans divers domaines, notamment la météorologie, l'agriculture, l'aviation et la recherche climatique. Les principaux instruments sont :

6.1. Le thermomètre

Un thermomètre est un instrument destiné à mesurer la température d'un corps ou d'un milieu en exploitant l'une des grandeurs physiques qui varient de manière prévisible avec la température (dilatation, effet Seebeck, résistance électrique, émission rayonnante) [8].

La classification des thermomètres se divise en deux grandes familles principales :

- **Les thermomètres de contact** : ils nécessitent un contact direct avec l'objet ou le milieu dont on veut mesurer la température. Cette catégorie comprend les thermomètres à dilatation (comme les thermomètres à liquide ou à gaz), les thermorésistances (RTD), les thermistances (NTC/PTC), les thermomètre à cadran et aiguille ainsi que les thermocouples. Ces instruments sont largement utilisés pour leur précision et leur adaptabilité dans de nombreux domaines industriels et scientifiques [8].
- **Les thermomètres sans contact** : ils mesurent la température à distance, en se basant sur le rayonnement infrarouge émis par les corps. On y trouve notamment les pyromètres infrarouges, les pyromètres optiques et les capteurs à fibre optique. Ces dispositifs sont particulièrement adaptés aux environnements dangereux, aux objets en mouvement ou aux températures très élevées [8].

Cette classification permet d'adapter le choix de l'instrument de mesure en fonction des conditions d'utilisation, de la précision souhaitée et de la nature de l'application.



Figure 9 : Thermomètre à cadran et aiguille

6.2. L'hygromètre

L'hygromètre est un instrument servant à mesurer l'humidité de l'air. Il existe plusieurs types :

- **Capacitifs** : mesurent l'humidité en détectant les variations de la constante diélectrique d'un matériau sensible. Ils sont précis, compacts et largement utilisés dans l'industrie et la domotique [3].
- **Résistifs** : basés sur la variation de résistance d'un matériau avec l'humidité. Simples mais moins stables à long terme [3].
- **À point de rosée** : très précis, utilisés en laboratoire, ils détectent la température où la vapeur d'eau se condense [3].
- **Psychromètres** : utilisent deux thermomètres (sec et humide) pour déduire l'humidité relative. Méthode ancienne mais encore utilisée dans certaines applications [3].
- **Mécaniques (ou à cheveux)** : utilisent les propriétés hygroscopiques de matériaux organiques (cheveux humains ou fibres animales) qui se dilatent ou se contractent selon l'humidité. Simples, robustes, mais moins précis que les capteurs modernes.

Les capteurs modernes sont fabriqués à partir de polymères ou de céramiques, avec des temps de réponse rapides et une bonne sensibilité. On les retrouve dans les domaines de la météorologie, de l'agriculture, de la conservation du patrimoine, ou encore dans les réseaux de capteurs intelligents [10].



Figure 10 : Hygromètre à cheveux

6.3. Le baromètre

Le baromètre est un instrument utilisé pour mesurer la pression atmosphérique. Il repose sur l'équilibre entre la colonne de fluide (pour les modèles à mercure) ou la déformation d'un élément élastique (pour les baromètres anéroïdes) et la pression exercée par l'air ambiant. Connaître la pression précise est essentiel pour évaluer et prévoir les changements météorologiques [11].

Les baromètres sont classés en plusieurs types selon leur principe de fonctionnement :

- **Baromètre à mercure** : C'est le type le plus ancien, inventé par Evangelista Torricelli au XVII^e siècle. Il fonctionne à partir d'une colonne de mercure dont la hauteur varie selon la pression atmosphérique. Malgré sa précision, son utilisation est limitée par la toxicité du mercure et son encombrement [11].
- **Baromètre anéroïde** : Il repose sur une capsule métallique flexible appelée cellule anéroïde, qui se contracte ou se dilate en fonction des variations de la pression. Ce type est très utilisé en navigation maritime, en météorologie classique, et dans les altimètres, car il est plus léger, robuste et ne contient pas de liquide [11].
- **Baromètre à enregistrement (barographe)** : Ce type est dérivé du baromètre anéroïde, mais équipé d'un système d'enregistrement mécanique (stylet sur tambour) qui trace en continu les variations de pression sur une bande de papier. Il est utile pour surveiller l'évolution de la pression sur plusieurs heures ou jours [11].
- **Baromètre électronique** : À l'époque, ce type de baromètre, utilisant des capteurs à semi-conducteurs, était déjà intégré dans certains équipements météorologiques

professionnels. Il offrait une mesure précise et une lecture numérique, bien qu'il fût encore en phase de développement pour des usages miniaturisés [11].



Figure 11 : Le baromètre anéroïde

6.4. L'anémomètre

Le baromètre de vent, ou anémomètre, est un instrument destiné à mesurer la vitesse du vent, généralement de son composante horizontale, indispensable en météorologie et en applications industrielles. Selon Harrison (2014), on distingue plusieurs catégories principales :

- **Anémomètres cinétiques** : ils exploitent l'énergie cinétique du vent.
 - Anémomètres à coupelles (cup anemometers) : des coupelles montées sur un axe vertical tournent à une vitesse proportionnelle à celle du vent.
 - Anémomètres à hélice (propeller anemometers) : une hélice orientée face au vent mesure simultanément la vitesse et la direction [12].
- **Anémomètres à pression** : basés sur la pression dynamique du flux d'air.
 - Anémomètres à tube de Pitot (pressure tube anemometers) et à plaque (pressure plate anemometers) : le vent exerce une force mesurée par une différence de pression qui est convertie en vitesse [12].
- **Anémomètres thermiques** : ils utilisent le refroidissement d'un fil chauffé (hot-wire anemometers) ou d'un film (hot-film anemometers) pour déduire la vitesse du vent à partir de la variation de résistance électrique [12].
- **Anémomètres soniques** : ils mesurent la vitesse du vent par la vitesse du son dans l'air, en comparant les temps de transit de signaux ultrasonores envoyés dans deux directions opposées [12].

Chacune de ces techniques présente des compromis en termes de précision, de plage de mesure, de rapidité de réponse et de résistance aux conditions environnementales (gel, poussière, turbulence), guidant le choix de l'anémomètre selon l'application visée.



Figure 12 : L'anémomètre à coupelles

6.5. La girouette

La girouette est un instrument, le plus souvent en métal, installé en hauteur (généralement sur un toit) et composé d'un élément mobile monté sur un axe vertical fixe. Son rôle principal est d'indiquer la direction d'origine du vent, avec une précision sur le point cardinal d'où il souffle, ce qui la différencie de la manche à air [13].

Cette fonction est rendue possible grâce à sa forme asymétrique, souvent représentée par une flèche ou un coq. La partie avant (la tête ou la pointe), plus courte que la partie arrière, s'oriente naturellement face au vent, indiquant ainsi sa provenance. Traditionnellement, l'axe supportait une croix directionnelle marquant les quatre points cardinaux. Toutefois, dans les modèles plus récents, cette croix est remplacée par un système électronique qui affiche automatiquement la direction du vent sur un écran [13].



Figure 13 : La girouette

6.6. Le pluviomètre

Dans l'étude de Shi et Wang (2023), le pluviomètre est défini comme un dispositif de mesure permettant de quantifier la hauteur d'eau précipitée sur une surface donnée, exprimée en millimètres, chaque millimètre correspondant à un litre par mètre carré. Les auteurs distinguent principalement trois catégories :

- **Pluviomètre manuel** : simple récipient gradué où l'opérateur relève ponctuellement le volume collecté [14].
- **Pluviomètre à auget basculant** : deux petits seaux se remplissent alternativement et basculent lorsqu'ils atteignent un certain volume (généralement 0,2 mm), ce qui génère un signal électronique pour un enregistrement continu [14].
- **Pluviomètre à pesée** : mesure directement la masse des précipitations recueillies grâce à une cellule de charge, offrant une grande précision même pour la neige fondue ou la grêle [14].
- **Disdromètre optique** : bien que parfois classé à part, il utilise un faisceau lumineux interrompu par les gouttes pour estimer simultanément leur taille, leur vitesse et leur fréquence, complétant ainsi les mesures de quantité d'eau [14].



Figure 14 : Pluviomètre à lecture directe

6.7. Le pyranomètre

Le pyranomètre est un instrument utilisé pour mesurer le rayonnement solaire global (en W/m^2) ou l'irradiance (en Wh/m^2). Il fonctionne de manière similaire au bolomètre, en intégrant une thermopile composée de plusieurs thermocouples, une double coupelle en verre, ainsi qu'un système d'enregistrement de la tension générée par l'énergie rayonnante. Les

couppelles de verre servent à filtrer la plage de longueurs d'onde mesurées (généralement de 0,3 à 3 μm) tout en limitant la condensation de la vapeur d'eau [15].

Il existe deux principaux types de pyranomètres, selon le mode de transfert thermique utilisé :

- **Pyranomètre à thermopile avec échanges thermiques horizontaux :**

Ce type mesure la différence de température entre une surface noire et une surface blanche placées côte à côte. Sous l'effet du soleil, la surface noire chauffe plus que la blanche. Cette différence de chaleur produit une petite tension électrique, proportionnelle à l'intensité du rayonnement solaire reçu [15].

- **Pyranomètre à thermopile avec échanges thermiques verticaux :**

Ici, la température est comparée entre une surface noire exposée au soleil et le boîtier du capteur. Lorsque la surface noire chauffe, un écart de température apparaît entre différentes parties internes du capteur, ce qui génère également une tension proportionnelle à l'énergie reçue [15].



Figure 15 : Le pyranomètre

6.8. Le ceilomètre

Le ceilomètre est un instrument optique utilisé principalement pour mesurer la hauteur de la base des nuages ainsi que la structure verticale des particules atmosphériques comme les aérosols. Il fonctionne en envoyant un faisceau laser ou infrarouge vers le ciel, puis en analysant le signal rétrodiffusé par les particules en suspension dans l'air [16].

Selon la technologie employée, on distingue plusieurs types de ceilomètres :

- **Céilomètre à diode laser impulsionnelle :**

Utilise des impulsions laser pour fournir une haute résolution verticale ; c'est le type le plus courant aujourd'hui dans les réseaux météorologiques modernes [16].

- **Céilomètre à lampe flash (xénon) :**

Ancienne génération d'instruments utilisant des lampes à décharge ; largement utilisés dans les stations météorologiques plus anciennes [16].

- **Céilomètre à onde continue (continuous wave) :**

Émet un faisceau continu ; moins courant, adapté principalement aux mesures de proximité près du sol [16].

Ces instruments jouent un rôle essentiel dans la surveillance de l'atmosphère, l'analyse de la couche limite et l'amélioration des prévisions météorologiques.



Figure 16 : Le ceilomètre

6.9. La radiosonde

La radiosonde est un instrument météorologique embarqué sur un ballon gonflé à l'hélium ou à l'hydrogène, utilisé pour mesurer les paramètres atmosphériques verticaux tels que la température, la pression, et l'humidité relative. Ces données sont transmises en temps réel à une station au sol via un émetteur radio [17].

Dans leur étude, Dirksen et al. (2014) présentent un traitement de données de qualité de référence pour la radiosonde Vaisala RS92, utilisée dans le réseau GRUAN (Global Climate Observing System Reference Upper-Air Network). Ce réseau vise à produire des mesures de l'atmosphère traçables, reproductibles et corrigées des biais connus (comme le rayonnement solaire ou les effets de dérive).

Les radiosondes modernes, comme la RS92, comportent :

- un capteur de température à thermistance,

- un capteur de pression barométrique,
- un capteur d'humidité capacitif,
- un GPS pour le suivi de l'altitude et du vent [17].

Le traitement GRUAN applique des corrections rigoureuses pour améliorer la précision des mesures, notamment :

- la correction de la réponse lente des capteurs d'humidité,
- la compensation du chauffage radiatif en plein jour,
- la prise en compte du temps de réponse différé entre montée et descente [17].



Figure 17 : Ballon avec radiosonde pour effectuer un radiosondage

Ces instruments sont indispensables aux stations météorologiques et aux scientifiques pour analyser les tendances climatiques et améliorer la précision des prévisions météorologiques.

7. Conclusion

Dans ce premier chapitre, nous avons exploré la notion de station météorologique en définissant son rôle et son importance dans l'observation et l'analyse des phénomènes atmosphériques. Nous avons retracé son évolution historique, mettant en évidence les progrès technologiques qui ont permis d'améliorer la précision des mesures et la diversité des stations météorologiques existantes.

Nous avons également présenté les principaux types de stations météorologiques, qu'elles soient analogiques, professionnelle, portable, agricole, marine, domestique ou routière

chacune adaptée à des besoins spécifiques en matière de collecte de données. Enfin, nous avons détaillé les paramètres météorologiques essentiels à mesurer, tels que la température, l'humidité, la pression atmosphérique, la vitesse du vent, l'intensité lumineuse ainsi que les précipitations, en mettant en lumière les instruments utilisés pour ces mesures, allant du thermomètre au baromètre, en passant par l'anémomètre et le pluviomètre.

Ces éléments fondamentaux constituent la base nécessaire pour comprendre le fonctionnement des stations météorologiques et leur contribution à l'analyse du climat et des prévisions météorologiques. Cette introduction théorique nous permet ainsi d'aborder les aspects plus techniques et pratiques dans le deuxième et le troisième chapitre.

Chapitre 2 : La conception de la station météo solaire

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la conception matérielle de notre mini station météo solaire à base de l'ESP32. L'objectif est de décrire les composants choisis et leur rôle au sein du système, notamment les capteurs environnementaux, le module de communication, la carte microcontrôleur, l'alimentation solaire, ainsi que les modules de gestion et d'horodatage.

Nous commençons par une introduction générale aux capteurs, leurs caractéristiques et leur classification, avant de détailler ceux utilisés dans notre projet : capteur de température et d'humidité, capteur de pluie, capteur de niveau de l'eau et le capteur de lumière.

Ensuite, nous présentons les éléments d'alimentation (panneau solaire, batterie et gestionnaire d'énergie) et la carte ESP32, en expliquant ses fonctionnalités et les environnements de développement compatibles.

Nous abordons également la transmission des données environnementales traitées par l'ESP32 à l'aide du module GSM, la synchronisation temporelle avec le module RTC, ainsi que les convertisseurs nécessaires pour l'interconnexion des composants.

Ce chapitre constitue la base technique de la station, avant de passer à l'implémentation logicielle et la réalisation.

2. Les capteur

2.1. La définition d'un capteur

Un capteur est un dispositif conçu pour convertir une grandeur physique mesurable en un signal électrique, lequel sera ensuite converti en données binaires interprétables par un système informatique. Diverses grandeurs sont mesurées par les capteurs, notamment la température, l'humidité, la luminosité, l'accélération, la distance, les mouvements, la position, la pression, la détection de gaz, la vision (capture d'image), le son, etc. La définition des capteurs a évolué au fil du temps en raison de l'élargissement de leur champ d'application. Les capteurs initiaux étaient conçus pour une seule mesure spécifique, tandis que les capteurs modernes intègrent plusieurs dispositifs permettant de mesurer diverses grandeurs physiques. En outre, en plus de ces diverses possibilités de mesures, les capteurs actuels ont été dotés de fonctionnalités leur permettant non seulement d'enregistrer et de détecter des événements mesurables, mais aussi de traiter ces données et de les transmettre à un autre dispositif [29].

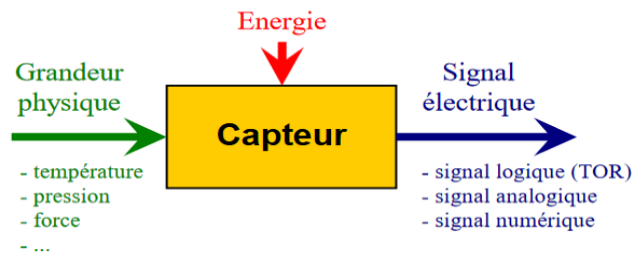


Figure 18 : Le fonctionnement d'un capteur [38]

2.2. Les caractéristiques principales d'un capteur

Les capteurs sont caractérisés par plusieurs critères, notamment :

1. **La grandeur physique mesurée** : par exemple, température, pression, humidité, luminosité.
2. **La gamme de mesure** : l'étendue des valeurs que le capteur peut détecter.
3. **La sensibilité** : la capacité du capteur à détecter de petites variations de la grandeur mesurée.
4. **La précision** : le degré de fidélité entre la valeur mesurée et la valeur réelle.
5. **Le temps de réponse** : la rapidité avec laquelle le capteur réagit aux changements de la grandeur mesurée.
6. **La linéarité** : la relation proportionnelle entre la grandeur mesurée et le signal de sortie.
7. **L'hystérésis** : la différence de réponse du capteur lors de l'augmentation ou de la diminution de la grandeur mesurée.
8. **La reproductibilité** : la capacité du capteur à fournir les mêmes résultats sous les mêmes conditions.

Pour assurer des mesures fiables, il est souvent nécessaire de procéder à l'étalonnage du capteur et de connaître les incertitudes associées à ses mesures.

2.3. Les différentes classes des capteurs

La classification des capteurs peut s'effectuer selon plusieurs critères, chacun répondant à des exigences techniques spécifiques, notamment la nature du signal de sortie, le mode de détection, l'apport énergétique, ou encore la grandeur physique mesurée.

2.3.1. Classification selon la nature du signal de sortie

Les capteurs se distinguent tout d'abord par le type de signal qu'ils délivrent en sortie :

- **Capteurs analogiques** : ils produisent un signal continu proportionnel à la grandeur physique mesurée. Ce signal varie de manière linéaire ou non selon l'amplitude de la variable détectée. Ces capteurs sont largement utilisés dans les systèmes de mesure classiques.

Exemple : un capteur de température analogique délivrant une tension proportionnelle à la température ambiante [31].

- **Capteurs numériques** : ces capteurs génèrent un signal codé, souvent binaire, qui peut être traité directement par un système informatique. Ils offrent une grande immunité au bruit et permettent des communications précises avec les microcontrôleurs ou systèmes embarqués.

Exemple : les capteurs de température numériques de type DS18B20 [30].

- **Capteurs TOR (ou tout-ou-rien)** : ils indiquent uniquement deux états possibles (présence ou absence d'un phénomène) sous forme d'un signal binaire (0 ou 1). Ces capteurs sont fréquemment employés dans les systèmes de détection simples. Exemple : un détecteur de proximité à sortie logique [31].

2.3.2. Classification selon le mode de détection

Les capteurs peuvent également être différenciés selon qu'ils nécessitent ou non un contact physique avec le phénomène à mesurer :

- **Capteurs à contact** : leur fonctionnement repose sur un contact direct avec le milieu mesuré. Bien que leur conception soit simple, leur durée de vie peut être limitée par l'usure mécanique.

Exemple : les capteurs de force à film résistif.

- **Capteurs sans contact** : ils mesurent une grandeur physique à distance, ce qui élimine les problèmes d'usure mécanique et permet des mesures dans des environnements difficiles d'accès ou potentiellement dangereux.

Exemple : les capteurs optiques, inductifs ou à ultrasons [30].

2.3.3. Classification selon l'apport énergétique

Un autre critère de distinction repose sur la capacité du capteur à générer ou non un signal sans source d'énergie externe :

- **Capteurs passifs** : ces dispositifs nécessitent une alimentation électrique externe pour fonctionner. Ils modifient une propriété électrique (résistance, capacité, tension, etc.)

en fonction de la grandeur mesurée.

Exemple : une thermistance dont la résistance varie selon la température.



Figure 19 : Schéma bloc d'un capteur passif [32]

- **Capteurs actifs** : ils génèrent eux-mêmes un signal exploitable sans besoin d'alimentation externe, souvent par conversion directe d'énergie. Exemple : un thermocouple qui produit une tension par effet Seebeck.



Figure 20 : Schéma bloc d'un capteur actif [32]

2.3.4. Classification selon la grandeur physique mesurée

Enfin, les capteurs peuvent être classés en fonction de la nature de la grandeur physique qu'ils mesurent. Cette approche est la plus couramment utilisée dans les applications concrètes :

- **Température** : thermocouples, thermistances, capteurs infrarouges.
- **Pression** : capteurs à membrane, piézorésistifs ou capacitifs.
- **Humidité** : capteurs capacitifs ou résistifs.
- **Lumière** : photodiodes, photorésistances.
- **Gaz** : capteurs chimiques, électrochimiques ou à semi-conducteurs.
- **Position et déplacement** : potentiomètres, capteurs LVDT, codeurs optiques.
- **Vitesse et accélération** : tachymètres, accéléromètres.
- **Présence ou mouvement** : capteurs infrarouges passifs, ultrasons, radars [31].

Cette diversité de capteurs permet de répondre aux exigences spécifiques de nombreuses applications industrielles, scientifiques et environnementales, notamment dans le domaine de la météorologie.

Remarque :

En instrumentation, plusieurs effets physiques sont couramment exploités pour la conception et le fonctionnement des capteurs. Parmi les plus fréquents, on peut citer :

- L'effet thermoélectrique
- L'effet piézoélectrique
- L'effet d'induction électromagnétique
- L'effet photoélectrique
- L'effet Hall
- L'effet photovoltaïque [38]

3. La description des capteurs de la station météo solaire

Le monde qui nous entoure est rempli d'une multitude de capteurs, aux formes et aux fonctions variées, chacun conçu pour répondre à des besoins spécifiques. Dans cette optique, il est essentiel d'équiper notre projet de plusieurs capteurs afin de permettre une collecte de données précise et adaptée aux différentes situations.

3.1. Capteur de température et d'humidité (DHT22)

3.1.1. Description

Le DHT22, également identifié sous le nom AM2302, est un capteur numérique économique permettant de mesurer à la fois la température ambiante et le taux d'humidité de l'air. Il fonctionne grâce à un capteur capacitif d'humidité combiné à une thermistance, ce qui lui permet d'acquérir les données environnementales et de les transmettre sous forme numérique via un bus série. Les mesures sont mises à jour environ toutes les deux secondes.

Bien que très proche du DHT11, le DHT22 se distingue par une meilleure précision ainsi qu'une plage de mesure plus étendue. En contrepartie, il est légèrement plus onéreux et un peu plus volumineux.

Il est généralement fourni avec une résistance de pull-up comprise entre 4,7 k Ω et 10 k Ω , à placer entre la broche de données (DATA) et l'alimentation VCC pour assurer une communication stable [29].

3.1.2. Fonctionnement

Le capteur fonctionne sur le principe de la mesure capacitive de l'humidité et d'un thermistor pour la température. Il contient un microcontrôleur qui convertit les signaux analogiques en données numériques, puis les transmet via un protocole de communication série (single-wire digital signal). Le processus typique est le suivant :

1. Le microcontrôleur envoie un signal de démarrage.
2. Le capteur répond avec un signal d'accusé de réception.
3. Ensuite, il envoie 40 bits de données (16 bits pour l'humidité, 16 bits pour la température, 8 bits de checksum) [29].

3.1.3. Caractéristiques techniques

- **Tension d'alimentation** : 3.3 V à 6 V
- **Consommation électrique** :
 - En fonctionnement : jusqu'à 1,5 mA
 - Au repos : environ 50 μ A
- **Plage de mesure** :
 - Température : de -40 °C à +80 °C
 - Humidité relative : de 0 % à 100 %
- **Précision** (l'écart maximal entre la valeur mesurée par le capteur et la valeur réelle) :
 - Température : $\pm 0,5$ °C
 - Humidité : ± 2 % HR (Humidité Relative)
- **Résolution** (la plus petite variation que le capteur peut détecter et afficher dans sa mesure) :
 - Température : 0,1 °C
 - Humidité : 0,1 % HR
- **Temps de réponse** : environ 2 secondes
- **Dimensions** : environ 25 mm x 15 mm x 9 mm
- **Poids** : environ 5 g
- **Interface de communication** : signal numérique via une seule broche de données [33].



Figure 21 : Capteur de Température et d'Humidité (DHT22) [33]

3.2. Capteur de détection de pluie (FC-37)

3.2.1. Description

Ce capteur est parfait pour détecter la présence ou l'absence de pluie, particulièrement dans les projets domotiques appliqués à l'agriculture. Il est fourni avec un module d'interfaçage comprenant un potentiomètre pour ajuster la sensibilité, ainsi que des bornes permettant de choisir entre une sortie numérique et une sortie analogique [38].

Le FC-37 composé de deux éléments principaux :

1. **Plaque de détection** : une surface conductrice exposée qui détecte les gouttes de pluie.
2. **Module de contrôle** : une carte électronique équipée d'un comparateur (généralement le LM393) qui traite les signaux provenant de la plaque de détection et fournit des sorties numériques et analogiques [34].

3.2.2. Fonctionnement

Le fonctionnement du capteur repose sur la variation de résistance électrique de la plaque de détection en fonction de sa mouillure :

- **Surface sèche** : la résistance entre les pistes conductrices est élevée, ce qui entraîne une sortie analogique élevée et une sortie numérique indiquant l'absence de pluie.
- **Surface mouillée** : la présence d'eau réduit la résistance entre les pistes, diminuant la sortie analogique et activant la sortie numérique pour signaler la détection de pluie.

Le module de contrôle ajuste la sensibilité de la sortie numérique via un potentiomètre, permettant de définir le seuil de détection en fonction des besoins spécifiques de l'application [34].

3.2.3. Caractéristiques techniques

- **Tension de fonctionnement** : 3,3 V à 5 V DC.
- **Sorties** :
 - **Numérique (DO)** : indique la présence ou l'absence de pluie en fonction du seuil défini.
 - **Analogique (AO)** : fournit une valeur proportionnelle à l'humidité détectée sur la plaque.
- **Indicateurs LED** :
 - LED d'alimentation indiquant que le module est sous tension.
 - LED de sortie numérique s'allumant lorsque la pluie est détectée.
- **Dimensions** :
 - Plaque de détection : environ 5 cm x 4 cm.
 - Module de contrôle : environ 3 cm x 1,5 cm.
- **Sensibilité** : ajustable via un potentiomètre intégré [34].



Figure 22 : Capteur de détection de pluie (FC-37) [34]

Bien que ce capteur soit capable de détecter la présence de la pluie, il ne permet pas d'en mesurer la quantité. C'est pourquoi nous avons conçu un pluviomètre basé sur un capteur de niveau d'eau, afin de pouvoir quantifier les précipitations de manière plus précise.

3.3. Capteur de niveau d'eau (T1592 P)

3.3.1. Description

Le capteur de niveau d'eau T1592 P (souvent appelé water level sensor) est un capteur analogique ligneux conçu pour mesurer la profondeur d'un liquide. Communément, il consiste en une petite carte à circuits imprimés équipée de pistes conductrices et d'un connecteur trois

broches (Signal, VCC, GND). Grâce à sa simplicité de conception, il permet de détecter la quantité d'eau présente dans un récipient exposé (ici, le pluviomètre) [48].

3.3.2. Fonctionnement

Le capteur de niveau d'eau est utilisé dans le projet comme pluviomètre pour mesurer la quantité de précipitations collectée. Il fonctionne grâce à une série de pistes parallèles qui, une fois immergées, produisent une tension analogique proportionnelle au niveau d'eau. Cette tension est lue par l'ESP 32 via une broche ADC [38].

Le microcontrôleur active le capteur uniquement pendant les mesures afin de limiter la corrosion, lit la valeur analogique, puis la convertit en hauteur d'eau (en mm) après étalonnage. Ce système permet une mesure simple, économique et fiable de la pluviométrie dans le cadre de la station météo solaire.

3.3.3. Caractéristiques techniques

- **Alimentation** : 3,3 V à 5 V, typiquement 3,3 V via GPIO pour limiter la corrosion
- **Sortie** : Signal analogique (S) proportionnel au niveau d'immersion
- **Brochage** : S (signal), VCC, GND
- **Principes de mesure** : Variation de résistance électrique liée au niveau d'eau immergé
- **Dimensions** : 60 x 21 x 7 mm



Figure 23 : Capteur de niveau d'eau (T1592 P) [53]

3.4. Capteur de lumière (BH1750)

3.4.1. Description

Le BH1750 est un capteur de lumière ambiante numérique conçu pour mesurer l'éclairement en lux (lx), l'unité SI de mesure de la lumière. Il est couramment utilisé dans les systèmes embarqués tels que les cartes Arduino, ESP32 ou Raspberry Pi. Ce capteur est intégré dans des modules comme le GY-30 ou le GY-302, facilitant son utilisation grâce à une interface I2C standard [36].

3.4.2. Fonctionnement

Le BH1750 fonctionne en convertissant l'intensité lumineuse ambiante en un signal numérique via un convertisseur analogique-numérique (ADC) 16 bits intégré. Il communique avec un microcontrôleur hôte (par exemple, Arduino) via le bus I2C, utilisant les broches SDA (données) et SCL (horloge).

Le capteur peut fonctionner en **mode de mesure continue** ou en **mode de mesure unique** :

- En **mode continu**, il effectue des mesures en permanence et envoie les résultats à intervalles réguliers. Ce mode est adapté aux applications en temps réel, comme le contrôle automatique de l'éclairage.
- En **mode unique**, il réalise une seule mesure, transmet la donnée, puis se met automatiquement en veille, optimisant ainsi la consommation énergétique pour les systèmes à faible puissance.

Trois niveaux de résolution sont proposés par le BH1750 :

- **Haute résolution** : précision d'environ 1 lux, temps de mesure de 120 ms ;
- **Haute résolution 2** : précision améliorée jusqu'à 0,5 lux, également avec un temps de 120 ms ;
- **Basse résolution** : temps de mesure plus court (environ 16 ms), avec une précision moindre (~4 lux).

La broche **ADD** permet de sélectionner l'adresse I2C du capteur :

- **0x23** : lorsque la broche ADD est connectée à GND ou laissée flottante.
- **0x5C** : lorsque la broche ADD est connectée à VCC.

Le module GY-30 intègre en outre un **régulateur de tension**, permettant une alimentation en **3,3 V ou 5 V**, ce qui élargit sa compatibilité avec différentes plateformes de développement [36].

3.4.3. Caractéristiques techniques

- **Plage de mesure** : de 1 à 65 535 lux, extensible jusqu'à 100 000 lux avec des réglages avancés.
- **Interface** : bus I2C.

- **Alimentation** : fonctionne avec des tensions de 3,3 V ou 5 V grâce à un régulateur intégré.
- **Consommation** : faible consommation en veille grâce à la fonction "Auto power down".
- **Réponse spectrale** : similaire à celle de l'œil humain, avec une faible sensibilité aux infrarouges.
- **Rejet de bruit** : intègre une fonction de rejet de bruit à 50/60 Hz.
- **Température de fonctionnement** : de -40 °C à +85 °C.
- **Dimensions** : environ 20 x 30 mm pour le module GY-30 [36].

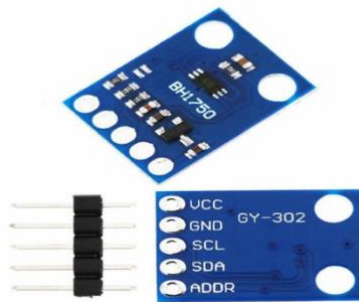


Figure 24 : Capteur de lumière (BH1750) [41]

4. Alimentation de la station météo solaire (Panneau solaire + Batterie)

Afin de garantir une alimentation électrique stable et continue pour notre station météorologique, et d'éviter toute interruption durant les périodes de mesure, nous avons mis en place un système d'alimentation autonome basé sur l'énergie solaire. Pour cela, nous avons utilisé un panneau solaire de type polycristallin, modèle JZ-PV130215Z, ayant une tension de sortie de 5V, une puissance de 10 Watts, capable de fournir l'énergie nécessaire au fonctionnement de l'ensemble des composants électroniques de la station. Ce panneau assure la recharge d'une batterie de secours, qui prend automatiquement le relais en l'absence de lumière solaire, notamment durant la nuit ou lors de journées fortement nuageuses. Ce système hybride permet ainsi de maintenir la station opérationnelle de manière fiable, indépendamment des conditions d'ensoleillement (voir la figure ci-dessus).



Figure 25 : Le panneau solaire “ JZ-PV130215Z ” [50]

4.1. Caractéristiques techniques du panneau solaire JZ-PV130215Z

- **Type de cellule** : Polycristallin
- **Tension en circuit ouvert (Voc)** : Environ 6.0 V
- **Tension à puissance maximale (Vmp)** : Environ 5.0 V
- **Courant à puissance maximale (Imp)** : Environ 2.0 A
- **Courant de court-circuit (Isc)** : Environ 2.2 A
- **Puissance maximale (Pmax)** : 10 W
- **Dimensions** : 210 mm x 130 mm x 1.5 mm
- **Poids** : 200 g
- **Efficacité de conversion** : Environ 15%
- **Température de fonctionnement** : -40°C à +85°C
- **Matériau de surface** : Plastique PET

En ce qui concerne la batterie, nous avons choisi d'utiliser une batterie au lithium polymère (LiPo) de modèle 606090, délivrant une tension nominale de 3,7 V, une capacité de 3000 mAh et une énergie totale de 11,1 Wh. Ce modèle a été sélectionné pour ses caractéristiques techniques parfaitement adaptées aux besoins énergétiques de notre système, en offrant une bonne autonomie, une tension stable et une grande compacité. De plus, ses dimensions réduites et sa légèreté facilitent son intégration dans le boîtier du montage, tout en assurant un fonctionnement fiable et continu de la carte ESP32 ainsi que des capteurs qui lui sont connectés.



Figure 26 : La batterie “ LiPo 606090 ”

4.2. Caractéristiques techniques de la batterie LiPo 606090

- **Type** : Batterie Lithium-Polymère (Li-Po)
- **Modèle** : 606090
- **Tension nominale** : 3,7 V
- **Capacité nominale** : 3000 mAh (3 Ah)
- **Énergie totale** : 11,1 Wh
- **Dimensions** : 6 mm (épaisseur) x 60 mm (largeur) x 90 mm (longueur)
- **Poids** : Environ 60 à 80 g (varie selon le fabricant)
- **Tension maximale de charge** : 4,2 V
- **Tension minimale de décharge** : 3,0 V (éviter de descendre en dessous pour préserver la durée de vie)
- **Courant de décharge standard** : 0.2 C à 1 C (tel que 1 C = 3 A donc 600 mA à 3 A selon les specs)
- **Connectique** : Fils rouge/noir + Chargeur TP4056
- **Température de fonctionnement** : -20°C à +60°C (en général pour les LiPo)
- **Date de production ou lot** : 202208 (août 2022)

5. La carte ESP32

5.1. La description de L'ESP32

La carte ESP32 est une plateforme de développement électronique open-source basée sur le microcontrôleur ESP32 conçu par Espressif Systems. Ce microcontrôleur intègre des fonctionnalités de connectivité sans fil Wi-Fi et Bluetooth, ainsi qu'une puissance de calcul notable, ce qui en fait un choix privilégié pour les projets liés à l'Internet des Objets (IoT) et à la domotique [35].

Nous avons utilisé précisément le modèle ESP32 DEVKIT V1, qui offre une disposition

pratique des broches (GPIO), une compatibilité avec l'environnement de développement Arduino IDE, et une alimentation via USB 5V.

5.2. Les caractéristiques principales de L'ESP32

- **Processeur :**

Le composant central de ce module est un microcontrôleur 32 bits basé sur l'architecture Tensilica Xtensa LX6. Il peut être configuré en version simple ou double cœur, selon le modèle. Il fonctionne à une fréquence d'horloge maximale de 240 MHz et peut atteindre une performance allant jusqu'à 600 DMIPS.

- **Mémoire :**

Le système dispose d'une mémoire vive interne (SRAM) de 520 Ko, accompagnée d'une mémoire flash dont la capacité standard est d'environ 4 Mo, bien que celle-ci puisse varier selon le modèle du module utilisé.

- **Connectivité :**

Ce microcontrôleur prend en charge la connectivité Wi-Fi 802.11 b/g/n sur la bande 2,4 GHz, avec possibilité d'opérer en mode station (STA), point d'accès (AP), ou les deux simultanément (STA + AP). Il intègre également la technologie Bluetooth version 4.2, compatible avec les modes BR/EDR ainsi que BLE (Bluetooth Low Energy).

- **Interfaces et périphériques :**

Il offre une grande flexibilité grâce à plusieurs interfaces et périphériques :

1. Jusqu'à 38 broches GPIO pour les entrées/sorties numériques
2. 18 canaux ADC 12 bits pour la conversion analogique-numérique
3. 2 sorties DAC 8 bits pour la conversion numérique-analogique
4. Capteurs tactiles capacitifs intégrés
5. Jusqu'à 3 ports UART, 4 interfaces SPI, 2 bus I2C, ainsi qu'une interface I2S dédiée à l'audio
6. Support du PWM pour la modulation de largeur d'impulsion
7. Contrôleur hôte compatible SD/SDIO/MMC
8. Interface Ethernet MAC avec DMA dédié et support du protocole de temps précis IEEE 1588

- **Sécurité :**

Côté sécurité, le module est équipé de plusieurs fonctions de cryptographie matérielle telles que AES, RSA, SHA-2, HMAC et un générateur de nombres aléatoires (RNG). Il prend aussi en charge le démarrage sécurisé (secure boot) ainsi que le chiffrement de la mémoire flash.

- **Gestion énergétique :**

Différents modes d'économie d'énergie sont disponibles, notamment le deep sleep, le light sleep et le modem sleep, permettant une adaptation selon les besoins de l'application. Il est également doté d'un régulateur de tension intégré pour optimiser la consommation.

- **Autres spécificités ;**

Le module peut fonctionner dans une plage de températures allant de -40°C à +125°C, selon le modèle. Il prend aussi en charge les mises à jour logicielles à distance (OTA - Over-the-Air), ce qui facilite les maintenances et les évolutions du firmware sans intervention physique [35].

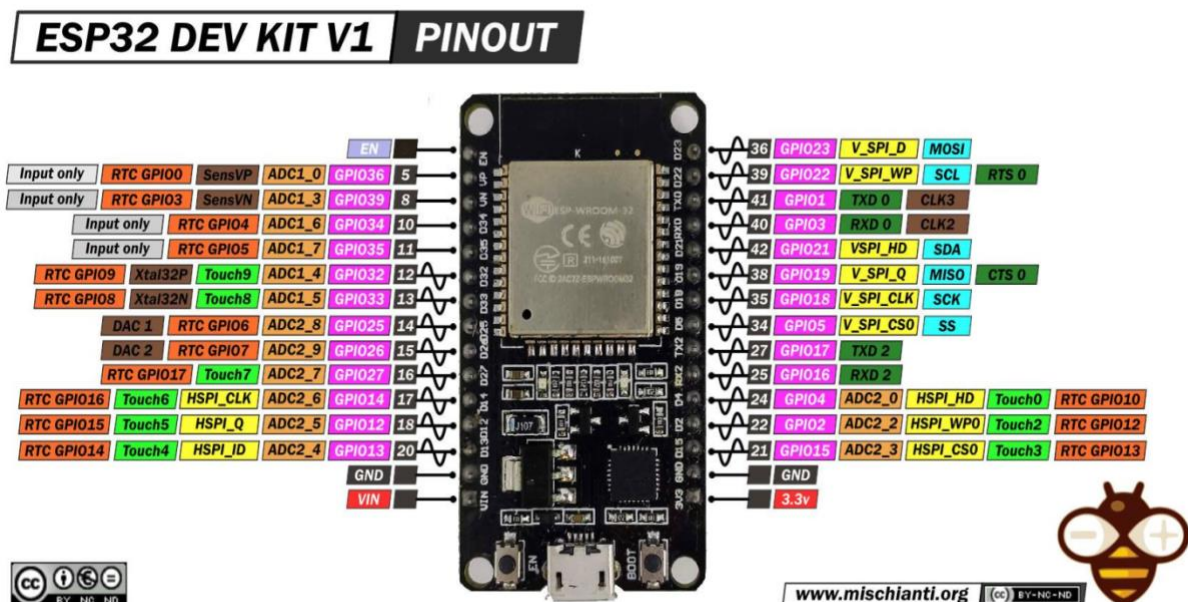



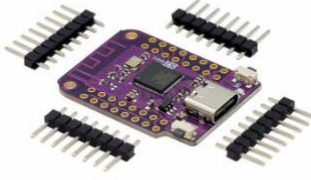
Figure 27 : Les broches de la carte ESP32 DEV KIT V1 [40]



5.3. Les modèles de la carte ESP32



Au fil des années, Espressif a élargi sa gamme en proposant différents modèles d'ESP32 (ESP32, ESP32-S2, ESP32-S3, ESP32-C2, ESP32-C3, ESP32-C5, ESP32-C6,



ESP32-H2 et ESP32-P4), chacun optimisé pour des besoins spécifiques : faible consommation, intelligence artificielle embarquée, communication Bluetooth Low Energy, ou encore support du Wi-Fi 6 et des protocoles de réseau maillé comme Thread ou Zigbee.

L'étude de ces modules permet non seulement de mieux comprendre l'architecture matérielle des systèmes embarqués modernes, mais aussi de choisir les solutions les plus appropriées selon les contraintes techniques et énergétiques d'un projet donné.

<p>ESP32</p> <p>Définition : Lancé en septembre 2016, l'ESP32 est un microcontrôleur SoC (System on Chip) intégrant Wi-Fi et Bluetooth, conçu pour succéder à l'ESP8266. Il offre une double connectivité sans fil et une grande flexibilité pour les applications IoT.</p> <p>Date de sortie : 6 septembre 2016</p> <p>Processeur : 2 × Tensilica Xtensa LX6 @ up to 240 MHz</p> <p>Mémoire : 520 KB de SRAM / 448 KB de ROM/ 2–16 MB de mémoire flash</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth v4.2 (BR/EDR et BLE)</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 34</p> <p>Modules courants : ESP32 DEV KIT V1, ESP32-WROOM-32, ESP32-WROVER, ESP32-PICO-D4, ESP32-PICO-V3, ESP32-PICO-KIT, ESP32-DevKitC</p>	
<p>ESP32-S2</p> <p>Définition : SoC monoprocesseur Xtensa® LX7 orienté basse consommation, avec USB OTG natif mais sans Bluetooth. Il est conçu pour les applications nécessitant une sécurité renforcée et une faible consommation d'énergie.</p> <p>Date de sortie : 3 septembre 2019</p> <p>Processeur : Xtensa LX7 monocœur jusqu'à 240 MHz</p> <p>Mémoire : ~320 KB SRAM + 16 KB ULP SRAM, ~128 KB ROM</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 43</p> <p>Particularités : Support USB OTG, absence de Bluetooth</p>	

<p>Modules courants : ESP32-S2-MINI-1/1U, ESP32-S2-Saola-1, ESP-S2-WROVER, S2-SOLO-U, ESP32-S2-PICO, ESP32-S2-LCD-0.96</p>	
<p>ESP32-S3</p> <p>Définition : L'ESP32-S3, lancé en 2020, est conçu pour les applications d'intelligence artificielle et de vision par ordinateur. Il intègre des instructions SIMD pour l'IA et prend en charge la connectivité Wi-Fi et Bluetooth.</p> <p>Date de sortie : 15 décembre 2020</p> <p>Processeur : 2 × Xtensa® LX7 @ 240 MHz</p> <p>Mémoire : ~512 KiB SRAM, ~384 KiB ROM</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth 5 (LE)</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 45</p> <p>Particularités : Optimisé pour les applications d'apprentissage automatique et de vision par ordinateur</p> <p>Modules courants: ESP32-S3-WROOM-1, ESP32-S3-WROVER, ESP32-S3-MINI-1, ESP-S3-PICO-1</p>	
<p>ESP32-C2</p> <p>Définition : L'ESP32-C2 est un microcontrôleur SoC (System on Chip) à faible coût, intégrant une connectivité Wi-Fi 4 (802.11 b/g/n) et Bluetooth 5 (LE).</p> <p>Date de sortie : 29 avril 2022</p> <p>Processeur : RISC-V 32 bits monocœur, jusqu'à 120 MHz</p> <p>Mémoire : 272 Ko de SRAM (16 Ko pour le cache), 576 Ko de ROM</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 4 (802.11 b/g/n), Bluetooth 5 (LE)</p> <p>GPIOs : 14</p> <p>Interfaces : SPI, UART, I2C, PWM, ADC, capteur de température</p> <p>Particularités : Conçu pour les applications IoT simples et économiques, comme les ampoules et prises intelligentes. Le module ESP8684 intègre le SoC ESP 32-C2 avec de la mémoire flash dans un boîtier compact de 4x4 mm</p>	

<p>Modules courants : ESP32-C2-MINI, ESP32-C2-12, ESP32-C2-ZERO,</p>	
<p>ESP32-C3</p> <p>Définition : L'ESP32-C3, annoncé en novembre 2020, est basé sur une architecture RISC-V et vise les applications IoT sécurisées avec une connectivité Wi-Fi et Bluetooth.</p> <p>Date de sortie : 27 novembre 2020</p> <p>Processeur : RISC-V monocœur jusqu'à 160 MHz</p> <p>Mémoire : 400 KB SRAM / 384 KB ROM / mémoire flash 4 MB ou plus</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz), Bluetooth 5 (LE)</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 22</p> <p>Particularités : idéal pour IoT sécurisé, support Arduino & ESP-IDF, gestion PSRAM externe.</p> <p>Modules courants : ESP32-C3-WROOM-0, ESP32-C3-MINI-1, ESP32-C3-ZERO, ESP32-C3-FN4</p>	
<p>ESP32-C5</p> <p>Définition : premier SoC RISC-V dual-bande Wi-Fi 6 + Bluetooth 5 LE, pour transmissions haute-efficacité.</p> <p>Date de sortie : juin 2022</p> <p>Processeur : RISC-V 32 bits @ 240 MHz</p> <p>Mémoire : 384 KB SRAM, 320 KB ROM</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 6 dual-bande (2.4/5 GHz), Bluetooth 5 LE, IEEE 802.15.4 (Zigbee/Thread)</p> <p>GPIOs : jusqu'à 20</p> <p>Particularités : Wi-Fi 6 optimisé IoT, Thread/Matter, RF haute-performance.</p> <p>Modules courants : ESP32-C5-MINI-1, ESP32-C5-WROOM-1</p>	

<p>ESP32-C6</p> <p>Définition : Annoncé en avril 2021, l'ESP32-C6 est le premier SoC d'Espressif à prendre en charge le Wi-Fi 6, offrant une connectivité améliorée pour les applications IoT avancées.</p> <p>Date de sortie : 9 avr. 2021</p> <p>Processeur principal : RISC-V 32 bits monocœur jusqu'à 160 MHz</p> <p>Processeur secondaire : RISC-V basse consommation jusqu'à 20 MHz</p> <p>Mémoire : 512 KB SRAM, 320 KB ROM</p> <p>Connectivité : Wi-Fi 6 (802.11ax), Bluetooth 5.3 (LE), Thread, Zigbee</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 30</p> <p>Particularités : Idéal pour les applications IoT avancées nécessitant une faible consommation et une connectivité étendue</p> <p>Modules courants : ESP32-C6-MINI-1, ESP32-C6-WROOM-1, ESP32-C6-FH4</p>	
<p>ESP32-H2</p> <p>Définition : L'ESP32-H2, annoncé en août 2021, est conçu pour les réseaux maillés et les applications IoT à faible consommation, avec une connectivité Bluetooth 5.3 (LE), Thread et Zigbee.</p> <p>Date de sortie : 2 août 2021</p> <p>Processeur : RISC-V monocœur, jusqu'à 96 MHz</p> <p>Mémoire : 256 KB SRAM / ROM optimisé (128 KB) / Flash externe jusqu'à 4 MB</p> <p>Connectivité : Bluetooth 5.3 (LE), Thread, Zigbee (pas de Wi-Fi)</p> <p>GPIOs : Jusqu'à 19</p> <p>Particularités : Conçu pour les réseaux maillés et les applications IoT à faible consommation</p> <p>Modules courants : ESP32-H2-DevKitM-1, ESP32-H2-MINI-1, ESP32-H2-FH2, ESP32-H2-FH4</p>	


<p>ESP32-P4</p> <p>Définition : SoC dual-cœur RISC-V très haute performance, avec extensions AI/vectorielles et accélérateurs média, pour HMI et edge computing.</p> <p>Date d'annonce : 5 janvier 2023</p> <p>Processeur : 2 × RISC-V @ 400 MHz (core principal) + 1 × RISC-V low-power @ 40 MHz</p> <p>Mémoire : 768 KB SRAM (perf.), 8 KB TCM, 32 KiB SRAM (low-power), PSRAM supporté</p> <p>Connectivité : aucun (sans Wi-Fi/Bluetooth)</p> <p>GPIOs : + 50 broches</p> <p>Particularités : instructions AI/FPU, accélérateurs H.264, destiné à interfaces riches et IA embarquée.</p> <p>Modules courants : ESP32-P4 (seul)</p>	
--	---

Table 1 : Les modèles de la carte ESP32 [44]

5.4. L'environnement de développement de l'ESP32

Pour exploiter pleinement les capacités de ce microcontrôleur, plusieurs environnements de développement peuvent être utilisés, selon les besoins du projet.

5.4.1. L'Arduino IDE

L'environnement Arduino IDE est l'un des plus utilisés pour programmer l'ESP 32, en raison de sa simplicité et de sa large communauté. Bien que l'IDE ait été initialement conçu pour les cartes Arduino, il prend en charge l'ESP 32 après installation des fichiers de configuration spécifiques (core ESP32) depuis le gestionnaire de cartes. Cet environnement permet de programmer en langage C/C++, d'utiliser une vaste bibliothèque de fonctions (capteurs, communication, affichage, etc.), et de réaliser facilement l'upload du code via un simple câble USB.

5.4.2. PlatformIO

PlatformIO est une extension avancée disponible dans Visual Studio Code, qui offre une expérience de développement plus complète. Il gère les dépendances, les bibliothèques, les versions de frameworks, et propose un débogage plus sophistiqué. PlatformIO est particulièrement adapté aux projets professionnels ou de grande envergure.

5.4.3. ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework)

Pour les développeurs expérimentés, ESP-IDF constitue l'environnement officiel fourni par Espressif Systems. Il est basé sur le langage C et offre un accès bas niveau aux fonctionnalités de l'ESP32. Il permet une gestion fine des ressources, un contrôle précis du Wi-Fi, du Bluetooth, des interruptions, et de la consommation énergétique.

L'ESP-IDF nécessite une configuration plus poussée, généralement via CMake ou Make, et s'utilise depuis un terminal ou via des IDE comme Eclipse ou VS Code.

5.4.4. MicroPython

Enfin, l'ESP32 peut être programmé en MicroPython, un interpréteur Python allégé conçu pour les microcontrôleurs. Il permet de développer rapidement des prototypes, notamment pour les débutants ou les développeurs familiers avec Python. MicroPython est adapté aux projets où les performances temps réel ne sont pas critiques.

Environnement	Langage principal	Difficulté	Avantages
Arduino IDE	C/C++	Facile	Simple, intuitif, communauté large
PlatformIO	C/C++	Moyenne	Gestionnaire de projets avancé
ESP-IDF	C	Élevée	Accès bas niveau, performances
MicroPython	Python	Facile	Rapide, accessible aux débutants

Table 2 : Résumé des outils de développement disponibles

Bien que les environnements de développement tels que l'IDE Arduino, PlatformIO, ESP-IDF et MicroPython soient parmi les plus couramment utilisés pour programmer l'ESP32, il est important de noter qu'ils ne sont pas les seuls. Parmi les autres environnements disponibles, on peut citer : Espruino, Mongoose OS, NodeMCU, Zerynth, nanoFramework, ou encore le support croissant du langage Rust [37].

Cette diversité offre aux développeurs une grande flexibilité pour choisir l'environnement le plus adapté à leurs besoins, en fonction de la nature du projet, des contraintes techniques, ou encore des préférences en matière de langage de programmation.

Dans le cadre de la réalisation de notre station météorologique, nous avons opté pour l'utilisation de l'environnement de développement Arduino IDE pour la programmation de la carte ESP32, qui constitue le cœur de notre système. Ce choix s'explique par plusieurs raisons. Tout d'abord, Arduino IDE offre une interface simple et intuitive, facilitant ainsi le développement et le déploiement du code, même pour des utilisateurs ayant une expérience

limitée. Ensuite, il dispose d'un large éventail de bibliothèques compatibles avec l'ESP32, ce qui nous permet d'intégrer aisément les différents capteurs et modules nécessaires à notre projet. Enfin, la communauté active autour de cette plateforme constitue un atout majeur en termes de support et de documentation, ce qui nous a permis d'avancer efficacement tout au long de notre démarche.

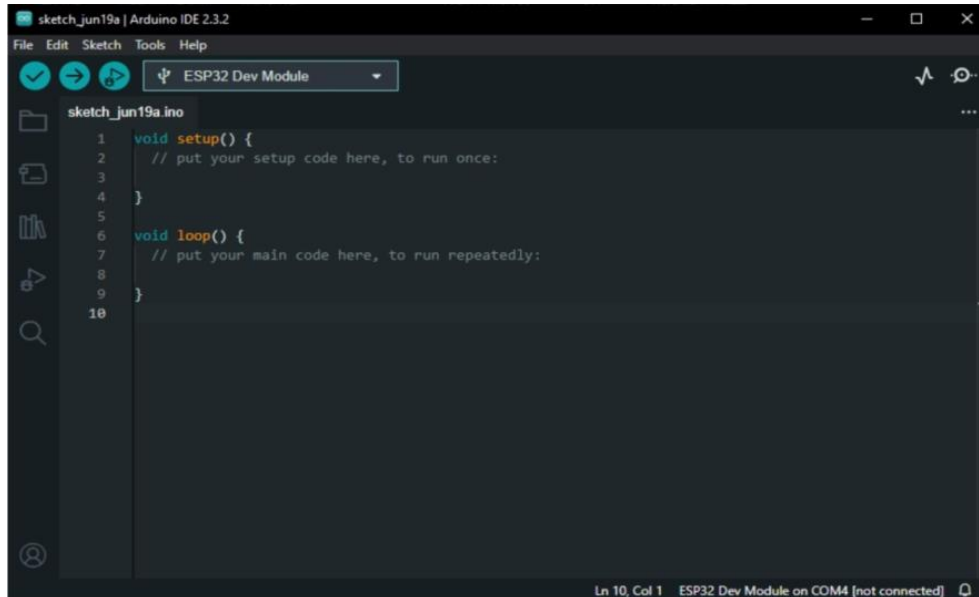


Figure 28 : Interface de logiciel Arduino IDE [35]

6. Choix de l'ESP32

Le marché propose une grande variété de microcontrôleurs tels que le BX-24, les modules Phidgets, Netmedia, Raspberry Pi, Basic Stamp de Parallax, etc. Bien que ces dispositifs soient tous capables de piloter différents composants électroniques avec des performances intéressantes, nous avons orienté notre choix vers l'ESP32 en raison de plusieurs atouts qui le distinguent des autres solutions.

Les principaux avantages ayant motivé notre sélection sont les suivants :

- **Facilité d'utilisation** : L'ESP32 a été conçu pour être accessible aussi bien aux chercheurs qu'aux enseignants, étudiants ou passionnés d'électronique, ce qui en fait une plateforme très polyvalente.
- **Accessibilité matérielle** : Il est possible de consulter librement sa documentation technique officielle, et de se procurer les composants nécessaires pour un montage personnel à faible coût.

- **Compatibilité multiplateforme** : L'environnement de développement de l'ESP32 (notamment via l'Arduino IDE) fonctionne sous différents systèmes d'exploitation tels que Windows, Linux et macOS, ce qui facilite son intégration dans divers environnements de travail.
- **Interface logicielle intuitive** : Le logiciel de programmation associé est conçu pour être simple d'utilisation, ce qui permet aux débutants de s'initier facilement au développement embarqué [39].

7. Le module GSM SIM800L EVB

Dans notre projet, nous avons décidé d'intégrer le module GSM SIM800L EVB afin d'assurer la transmission en temps réel des données météorologiques collectées. Ce module permet l'envoi des données sous forme de SMS vers un téléphone portable, offrant ainsi une communication directe, rapide et autonome avec l'utilisateur. Cette solution est particulièrement adaptée aux environnements ruraux ou isolés, où la couverture mobile est plus accessible que les infrastructures Internet classiques, et permet à l'utilisateur de recevoir les relevés ou de communiquer avec le système à distance, même en l'absence de réseau Wi-Fi.

7.1. Description

Le SIM800L EVB est un module de communication GSM/GPRS compact, basé sur le chipset SIM800L de SIMCom. Conçu pour faciliter l'intégration dans des projets embarqués, il offre des fonctionnalités de téléphonie mobile telles que l'envoi et la réception de SMS, les appels vocaux et la transmission de données via le protocole GPRS. Grâce à sa compatibilité avec les microcontrôleurs fonctionnant en TTL (3,3V ou 5V), il est particulièrement adapté aux applications IoT, notamment dans des environnements à ressources limitées [42].

7.2. Fonctionnement

Le module communique avec un microcontrôleur (tel que l'ESP32) via une interface série UART, en utilisant des commandes AT standardisées conformes aux spécifications 3GPP TS 27.007 et 27.005. Pour établir une connexion réseau, une carte micro-SIM est insérée dans le support prévu à cet effet. Une fois alimenté, le module recherche le réseau GSM disponible et peut ensuite envoyer ou recevoir des SMS, établir des appels vocaux ou transmettre des données via GPRS [42].

7.3. Alimentation

L'alimentation du module GSM SIM800L EVB dans notre station météo solaire est assurée par deux batteries rechargeables de modèle Ultrafire BRC 18650, de capacité 4800 mAh et de tension nominale 3.7 V chacune. Connectées en série, ces batteries fournissent une tension totale de 7.4 V, ce qui dépasse la plage de fonctionnement recommandée du module GSM.

Afin de garantir une tension stable et adaptée pour le fonctionnement du notre GSM (qui nécessite entre 3.4 V et 4.4 V, avec une valeur optimale autour de 4.0 V), un convertisseur abaisseur de tension (DC-DC Step Down LM2596S-ADJ 3A) est intercalé entre les batteries et le module GSM. Ce régulateur permet d'abaisser précisément la tension d'alimentation à la valeur 4.2 V, tout en supportant un courant de sortie maximal de 3 A, suffisant pour couvrir les pics de consommation du module GSM, notamment lors de la transmission de données.

Ce choix d'architecture permet :

- D'alimenter de manière autonome et sécurisée le module GSM,
- De préserver la longévité du module en évitant les surtensions,
- D'assurer un courant stable pendant les phases critiques de communication mobile (émission SMS ou connexion GPRS).

7.4. Caractéristiques techniques

- **Fréquences supportées** : Quad-band GSM 850/900/1800/1900 MHz
- **Tension d'alimentation** : 3.4V à 4.4V (tension recommandée : 4V)
- **Consommation électrique** :
 - Mode veille** : ~0.7 mA
 - Mode inactif** : ~1.2 mA
 - Transmission GPRS** : ~150 mA en moyenne, avec des pics pouvant atteindre 2 A.
- **Interface SIM** : Carte micro-SIM (1.8V/3V)
- **Interface de communication** : UART (vitesse configurable de 1200 à 115200 bps)
- **Température de fonctionnement** : -40°C à +85°C
- **Dimensions** : Environ 24 mm x 24 mm x 3 mm
- **Fonctionnalités supplémentaires** :
 - Support des commandes AT standard
 - Pile TCP/IP intégrée pour la connectivité Internet
 - Fonctionnalités Bluetooth et FM (selon la version de la puce) [43]

7.5. Applications typiques

Le SIM800L EVB est largement utilisé dans des applications telles que :

- Systèmes de surveillance et d'alarme
- Suivi de véhicules et géolocalisation
- Automatisation industrielle et domotique
- Dispositifs de santé connectés
- Projets DIY nécessitant une communication GSM [43].

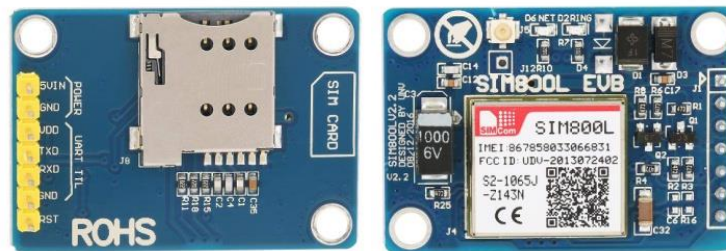


Figure 29 : Le module GSM “ SIM800L EVB ” [43]

8. Le gestionnaire d'énergie solaire “ DFRobot Solar power manager (5V/1A) ”

Dans le cadre de la conception de notre mini station météo solaire, nous avons fait le choix d'intégrer le module de gestion d'énergie solaire “Solar Power Manager (5V/1A), un gestionnaire d'énergie conçu spécifiquement pour optimiser la charge de la batterie LIPO via le panneau solaire tout en assurant une sortie régulée de 5 V adaptée à l'alimentation du microcontrôleur ESP32 et de ses capteurs. Ce choix s'est imposé par sa simplicité d'intégration, sa fiabilité, et ses fonctionnalités de protection et de régulation adaptées aux exigences de notre station météo.

8.1. Description

Le Solar Power Manager 5V (1A) de DFRobot, également appelé module Sunflower (réf. DFR0559), est un gestionnaire d'énergie solaire compact et haute efficacité conçu pour exploiter un panneau solaire 5 V. Destiné aux projets IoT et petites stations autonomes (comme notre station météo), il intègre à la fois la fonction de charge de batterie et une sortie régulée de 5 V/1 A pour alimenter directement notre microcontrôleur et ses capteurs [45].

8.2. Fonctionnement

Le module DFRobot Solar Power Manager (5V/1A) joue un rôle essentiel dans la gestion intelligente de l'alimentation de notre station météo solaire. Il intègre un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) à tension constante, qui optimise en temps réel le point de fonctionnement du panneau solaire pour maximiser l'énergie récupérée, même lorsque l'éclairement est variable. Ce module propose un double mode de charge : par énergie solaire, il permet de charger une batterie Li-ion/Li-Po 3,7 V avec un courant allant jusqu'à 900 mA, et par port USB 5 V en tant que source de secours, avec les mêmes étapes de charge (précharge, courant constant, tension constante). Une fois la batterie connectée, un convertisseur DC-DC intégré fournit une tension régulée de 5V à 1A, suffisante pour alimenter le microcontrôleur ESP32 ainsi que l'ensemble des capteurs du système. De plus, le module est doté de plusieurs protections intégrées : contre l'inversion de polarité (batterie ou panneau), les surintensités, les courts-circuits en sortie, et les surchauffes. Ces fonctions de sécurité assurent un fonctionnement fiable, stable et sécurisé de la station, dans des conditions extérieures parfois imprévisibles [45].

8.3. Caractéristiques techniques

- **Circuit intégré de gestion solaire** : CN3065
- **Tension d'entrée solaire (SOLAR IN)** : 4,5 V – 6 V
- **Entrée batterie (BAT IN)** : 3,7 V (Li-Po / Li-Ion mono-cellule)
- **Courant de charge max. (USB/SOLAR IN)** : 900 mA (trickle, CC, CV)
- **Tension de coupure de charge** : 4,20 V \pm 1 %
- **Tension USB IN** : 5 V
- **Sortie régulée (USB OUT / SOLAR OUT)** : 5 V / 1 A
- **Dimensions (module)** : 33,0 mm x 63,0 mm
- **Température de fonctionnement** : -40°C à +85°C [45].

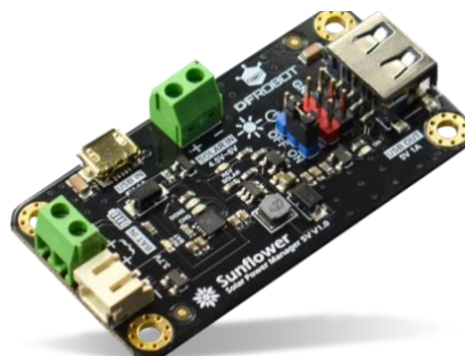


Figure 30 : Le module “ Solar power manager DFRobot (5V/1A) ” [51]

9. Le module RTC (Real time clock) ELEGOO DS1307 MODULE-V03

Dans le cadre de notre projet, le module RTC (Real time clock) ELEGOO DS1307 MODULE-V03 a été utilisé pour horodater les relevés de données météorologiques (température, humidité, luminosité, etc.). Grâce à sa communication via le bus I²C, il a été facilement intégré au microcontrôleur ESP32, permettant une synchronisation précise des données collectées, même en cas de redémarrage ou de coupure d'alimentation.

9.1. Description

Le module ELEGOO DS1307 MODULE-V03 est une horloge temps réel (RTC) basée sur le circuit intégré DS1307 de Maxim Integrated. Il est conçu pour fournir une mesure précise du temps (secondes, minutes, heures) et de la date (jour, mois, année), avec une correction automatique des années bissextiles. Ce module est particulièrement adapté aux projets embarqués nécessitant une conservation de l'heure, même en cas de coupure d'alimentation, grâce à sa batterie de secours de type CR2032 [46].

9.2. Fonctionnement

Le module ELEGOO DS1307 utilise le protocole I²C pour communiquer avec un microcontrôleur comme l'ESP32, via les broches SDA et SCL. Il reçoit son alimentation principale (5 V) à partir du système hôte. Une fois alimenté, il mesure le temps grâce à un oscillateur à quartz de 32,768 kHz, avec un comptage stocké dans des registres codés en BCD.

En cas de coupure de l'alimentation principale, le module passe automatiquement sur sa pile de secours CR2032, assurant la continuité du comptage temporel sans interruption. Cela permet de conserver l'heure et la date, même lorsque le microcontrôleur est éteint.

Le module peut être configuré pour fonctionner en mode 12 heures (avec indicateur AM/PM) ou en mode 24 heures, selon les besoins de l'application. Sa gestion automatique de l'alimentation et sa stabilité en font un composant essentiel pour des systèmes embarqués comme une station météo autonome [47].

9.3. Caractéristiques techniques

- **Alimentation** : 3,3 V à 5,5 V
- **Tension batterie VBAT** : 3 V (CR2032)

- **Interface de communication** : I²C (SDA, SCL)
- **Mémoire** : 56 octets de SRAM non volatile
- **Format horaire** : 12 h/24 h avec indicateur AM/PM
- **Précision** : peut dériver de quelques minutes par mois en fonction des variations de température
- **Oscillateur** : quartz de 32,768 kHz
- **Courant de fonctionnement** : 200 μ A (à VCC = 5 V)
- **Consommation en mode batterie** : inférieure à 500 nA
- **Dimensions** : environ 28 mm x 25 mm x 8 mm
- **Compatibilité** : ESP32, Arduino, Raspberry Pi



Figure 31 : Le module RTC “ ELEGOO DS1307 MODULE-V03 ” [52]

10. Les convertisseur de la station météo solaire

10.1. Convertisseur DC-DC STEP DOWN LM2596S-ADJ 3A

Le LM2596S-ADJ est un régulateur abaisseur (buck) à découpage, monolithique, capable de fournir un courant de sortie continu jusqu'à 3 A avec une excellente régulation en ligne et en charge. Il accepte une tension d'entrée comprise entre 4,5 V et 40 V, et permet de régler la tension de sortie entre 1,23 V et 37 V grâce à un réseau de résistances externes connecté à sa broche de rétroaction (Feedback) [49].

Dans notre projet, le convertisseur DC-DC Step Down joue un rôle essentiel dans la gestion de l'alimentation électrique. Il a pour fonction principale de réduire la tension fournie par les deux batteries Li-Ion Ultrafire BRC 18650 (7.4 V au total) à une tension compatible avec le fonctionnement du module GSM SIM800L EVB, soit environ 4.2 V. Ce convertisseur garantit :

- Une tension stable et ajustable selon les besoins du module GSM,
- Une protection contre les surtensions, qui pourraient endommager le module,

- Une capacité de courant suffisante (jusqu'à 3 A) pour absorber les pics de consommation lors de la communication GSM.

Ainsi, le LM2596S-ADJ assure une alimentation fiable, sécurisée et adaptée, essentielle au bon fonctionnement du système d'envoi de données dans notre station.



Figure 32 : Le convertisseur “ DC DC STEP DOWN LM2596S-ADJ 3A ” [54]

11. L'application ThingSpeak pour l'affichage des résultats

Afin de permettre la visualisation à distance des données environnementales relevées par notre station météo solaire, nous avons opté pour l'utilisation de la plateforme ThingSpeak. Cette application cloud, compatible avec les objets connectés (IoT), permet de recevoir, stocker, analyser et afficher les données en temps réel sous forme de graphiques. Dans notre système, les données traitées par l'ESP32 sont transmises à ThingSpeak via une connexion Wi-Fi, ce qui permet une intégration fluide dans un environnement IoT et une consultation facile des relevés climatiques depuis un ordinateur ou une application mobile

11.1. Définition

ThingSpeak est une plateforme open source dédiée à l'Internet des Objets (IoT), qui permet la collecte, le stockage, l'analyse et la visualisation des données générées par des dispositifs connectés. Grâce à une connexion Internet via Wi-Fi, les objets peuvent transmettre leurs données vers la plateforme de manière fluide et sécurisée. ThingSpeak offre aux utilisateurs la possibilité de développer des applications variées telles que l'enregistrement et le suivi en temps réel de données issues de capteurs, la localisation géographique d'équipements, ou encore la création d'un environnement interactif où plusieurs objets peuvent partager leur état et interagir, formant ainsi un réseau social d'objets connectés. Ces fonctionnalités en font un outil puissant et accessible pour les projets de télémessure, de domotique ou de surveillance environnementale [37].

11.2. Configuration de ThingSpeak

Pour exploiter les fonctionnalités de cette application cloud dédiée à l'Internet des Objets, nous avons suivi plusieurs étapes de configuration.

Tout d'abord, nous avons créé un compte utilisateur sur le site officiel de ThingSpeak. Ensuite, nous avons procédé à la création d'un canal spécifique à notre projet. Ce canal représente l'espace virtuel dans lequel sont stockées les données envoyées par notre microcontrôleur ESP32 via une connexion Wi-Fi. Cela permet une transmission automatique et sécurisée des mesures environnementales vers la plateforme pour consultation et analyse à distance.

Chaque canal ThingSpeak permet de configurer :

- Jusqu'à 8 champs de données, que nous avons attribués aux différentes mesures à surveiller : température, humidité, luminosité, niveau de l'eau
- Un champ d'état indiquant la situation générale du système ;
- Et des champs de localisation, utiles en cas de déploiement multi-sites de la station [55].

Lors de cette configuration, nous avons soigneusement enregistré la clé API d'écriture (Write API Key) ainsi que l'ID du canal, indispensables pour l'envoi de données via le programme embarqué dans l'ESP32 [55].

Bien que ThingSpeak autorise une fréquence d'envoi de données toutes les 15 secondes, une période d'une minute entre chaque mesure s'est révélée suffisante pour notre projet, assurant ainsi un équilibre entre précision du suivi météorologique et optimisation de la consommation énergétique et des ressources réseau via Wi-Fi. [55].

Enfin, grâce à son API REST, ThingSpeak nous a permis d'intégrer facilement notre système à une interface cloud évolutive, tout en offrant des graphiques en temps réel, un accès à l'historique des mesures, et une consultation des données depuis n'importe quel appareil connecté [55].

12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté en détail les composants matériels nécessaires à la fabrication de notre mini station météo solaire en fonction de l'ESP32. Nous avons débuté avec ce qui peut s'appeler une introduction au capteur, en expliquant sa définition, ses principales caractéristiques, ainsi que les diverses classifications des capteurs sur la base de

plusieurs critères. Ensuite, on a évoqué les capteurs utilisés spécifiquement dans le présent projet, à savoir le DHT22 pour la températures et l'humidité, le FC-37 pour la détection de pluie, le T1592 P pour le niveau de l'eau et le BH1750 pour l'intensité lumineuse.

Nous avons aussi abordé l'aspect énergétique de la station, mettant en avant l'usage d'un panneau solaire couplé à une batterie LiPo, ce qui permet d'assurer une autonomie énergétique adaptée à un usage en extérieur. L'unité centrale du système, l'ESP32, a été analysée en tenant compte de ses caractéristiques, de ses modèles et des environnements de développement compatibles.

En outre, nous avons mis en évidence les modules complémentaires qui servent à garantir la fonctionnalité optimale du système, comme le module GSM SIM800L EVB pour le transfert des données, le gestionnaire d'énergie solaire DFRobot, le module RTC pour le traitement du temps réel, et les convertisseurs requis pour la compatibilité électrique des composants.

Enfin, nous avons expliqué le rôle de la plateforme ThingSpeak, qui assure la visualisation graphique et l'historique des données collectées, accessible aussi bien depuis un navigateur web que via une application mobile.

Ce chapitre est donc une bonne base pour la mise en pratique du système, en garantissant une compréhension claire des composants qui forment la station météo solaire. Le prochain chapitre traitera de la réalisation et l'intégration logicielle et matérielle de ces composants pour arriver à un système fonctionnel, autonome et robuste.

Chapitre 3 : La réalisation de la station météo solaire

1. Introduction

L'évaluation des paramètres météorologiques revêt une grande importance dans de nombreuses activités humaines, telles que l'agriculture, le transport maritime et aérien, entre autres. Cette nécessité a engendré le développement de systèmes dédiés à l'acquisition et au traitement de diverses grandeurs physiques. Avec l'émergence constante de nouvelles technologies, la conception d'instruments météorologiques ne cesse d'évoluer et de s'améliorer [28].

Dans cette optique, nous ont pris en main la réalisation d'une mini station météo solaire, capable de collecter et d'analyser en temps réel les principaux paramètres météorologiques. Ce chapitre présente en détail les différentes étapes de réalisation de notre mini station, ainsi que la discussion des résultats obtenus lors des phases de test et de validation du système.

2. La description détaillée de la station météo réalisé

Notre station météorologique est conçue pour surveiller en temps réel les conditions environnementales, telles que la température, l'humidité, l'intensité lumineuse, la pluie et le niveau d'eau, tout en assurant une transmission fiable des données via un module GSM. Elle repose sur un microcontrôleur ESP32 qui coordonne les opérations des capteurs, de la communication et de la gestion énergétique. Le système est optimisé pour fonctionner de manière autonome grâce à une alimentation combinée par un panneau solaire et une batterie, adaptée pour le jour et la nuit.

2.1. Les composants principaux

2.1.1. Capteurs

- **Capteur de température et d'humidité (DHT22)** : Fournit des mesures précises de la température ambiante et du taux d'humidité pour l'analyse des conditions climatiques.
- **Capteur d'intensité lumineuse (BH1750)** : Évalue les niveaux de luminosité, utile pour les applications agricoles ou environnementales.
- **Capteur de pluie (FC-37)** : Détecte la présence des pluies, essentiel pour la surveillance météorologique.
- **Capteur de niveau d'eau (T1592 P)** : Surveille les variations des niveaux d'eau, idéal pour la gestion des ressources hydriques ou la prévention des inondations.

2.1.2. Module de communication

Le module GSM SIM800L EVB :

Utilisé dans notre système pour assurer une communication directe par SMS avec l'utilisateur. Il permet la réception de commandes à distance et l'envoi de réponses textuelles, garantissant une interactivité fiable même dans des zones isolées dépourvues de connexion Internet.

2.1.3. Gestion de l'alimentation

- **Le panneau solaire de 6V** : Génère de l'énergie à partir de la lumière du jour pour alimenter le système et recharger la batterie.
- **La batterie LiPo et les deux batteries Ultrafire BRC 18650** : Stockent l'énergie pour assurer un fonctionnement continu, notamment la nuit ou par faible luminosité.
- **Le module de gestion d'énergie solaire DFRobot 5V** : Régule l'énergie provenant du panneau solaire et gère la charge de la batterie LiPo.
- **Le convertisseur abaisseur DC-DC LM2596** : Stabilise la tension fournie par le pack 18650 pour alimenter le module GSM et d'autres composants sensibles.

2.1.4. Gestion du temps et de la synchronisation

- **Le module horloge en temps réel (RTC) DS1307** : Garantit des horodatages précis pour chaque mesure, ce qui est indispensable pour l'enregistrement structuré et chronologique des données environnementales. Elle permet au microcontrôleur de conserver la notion du temps même après une coupure de courant.

2.2. Déroulement des opérations du système

2.2.1. Initialisation du système

Au démarrage, le microcontrôleur configure les capteurs, établit une connexion avec le module GSM et initialise les paramètres de gestion de l'énergie. Cette étape garantit que tous les composants, y compris les capteurs et le module de communication, sont prêts à fonctionner de manière synchronisée.

2.2.2. Collecte des données environnementales

À des intervalles programmés, l'ESP32 collecte les données des capteurs : la température et l'humidité via le capteur DHT22, l'Intensité lumineuse via le capteur BH1750, la pluie via le capteur FC-37, le niveau d'eau via le capteur T1592 P. Ces mesures sont

associées à un horodatage précis fourni par l'horloge RTC, permettant une analyse temporelle fiable.

2.2.3. Transmission des données

Les données collectées sont traitées par l'ESP32 et transmises à la plateforme ThingSpeak via une connexion Wi-Fi, ce qui permet leur visualisation en ligne en temps réel. Parallèlement, le module GSM SIM800L EVB est utilisé pour assurer la communication par SMS avec l'utilisateur, notamment pour la réception de commandes à distance et l'envoi ponctuel d'informations météorologiques. Le système intègre des mécanismes de réessai afin de garantir la fiabilité des transmissions, même en cas d'instabilité du réseau ou de perte temporaire de connectivité.

2.2.4. Interaction à distance

Le système permet une interaction à distance via des messages SMS, offrant la possibilité de consulter les données en temps réel ou de modifier les paramètres de fonctionnement. Cette fonctionnalité améliore l'accessibilité, particulièrement dans des environnements isolés où l'accès physique est limité.

2.2.5. Gestion de l'énergie

Pour optimiser la consommation énergétique, le système utilise le mode de veille profonde de l'ESP32 entre les cycles de mesure. Ce mode désactive la plupart des composants, réduisant la consommation d'énergie au minimum. Le microcontrôleur se réveille périodiquement pour collecter et transmettre les données, selon un intervalle configurable.

2.3. Fonctionnement de l'alimentation selon les périodes jour/nuit

Le système est conçu pour fonctionner de manière autonome grâce à une gestion énergétique intelligente :

2.3.1. Pendant la journée

Le panneau solaire de 6V capte la lumière du soleil pour générer de l'électricité. Cette énergie est gérée par le module DFRobot Solar Power Manager 5V, qui alimente directement le système (ESP32, capteurs) tout en rechargeant la batterie LiPo. Le convertisseur abaisseur LM2596 stabilise la tension provenant des deux batteries Ultrafire BRC 18650 pour alimenter le module GSM SIM800L EVB, qui nécessite une alimentation robuste lors des transmissions.

Un condensateur électrolytique de 0,001 F aide à stabiliser les fluctuations de tension, assurant un fonctionnement fluide des composants.

2.3.2. Pendant la nuit

En l'absence de lumière solaire, le système bascule automatiquement sur la batterie LiPo et les deux batteries 18650 pour alimenter tous les composants. Le module DFRobot gère la transition en puisant l'énergie stockée dans la batterie LiPo, tandis que les deux batteries 18650 fournissent une alimentation stable au module GSM via le convertisseur LM2596S. Le mode de veille profonde de l'ESP32 réduit la consommation énergétique pendant les périodes d'inactivité, prolongeant la durée de vie de la batterie jusqu'au retour de la lumière du jour. Cette alternance entre l'énergie solaire et les batteries garantit un fonctionnement ininterrompu, même dans des conditions de faible luminosité ou pendant la nuit. Le système est ainsi adapté aux environnements extérieurs où l'accès à une alimentation électrique conventionnelle est limité.

3. Le schéma synoptique et l'organigramme de la station météo réalisé

Ce schéma synoptique, accompagné de l'organigramme, illustre de manière claire et structurée le fonctionnement global de notre mini station météo solaire basée sur la carte ESP32.

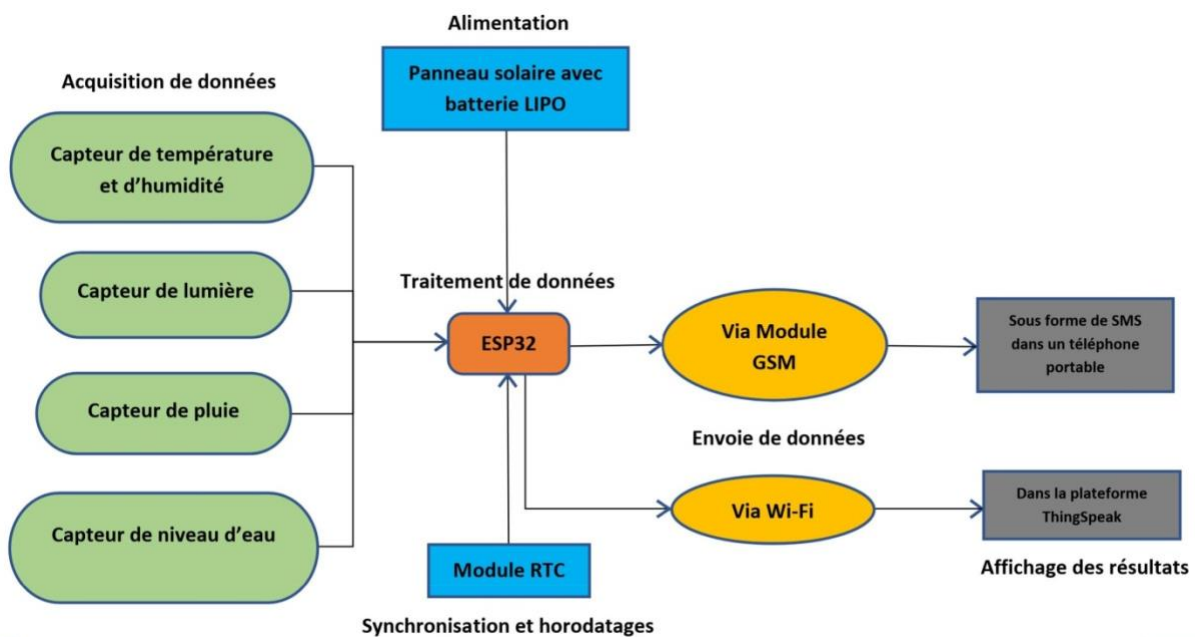


Figure 33 : Le schéma synoptique de la station météo réalisé

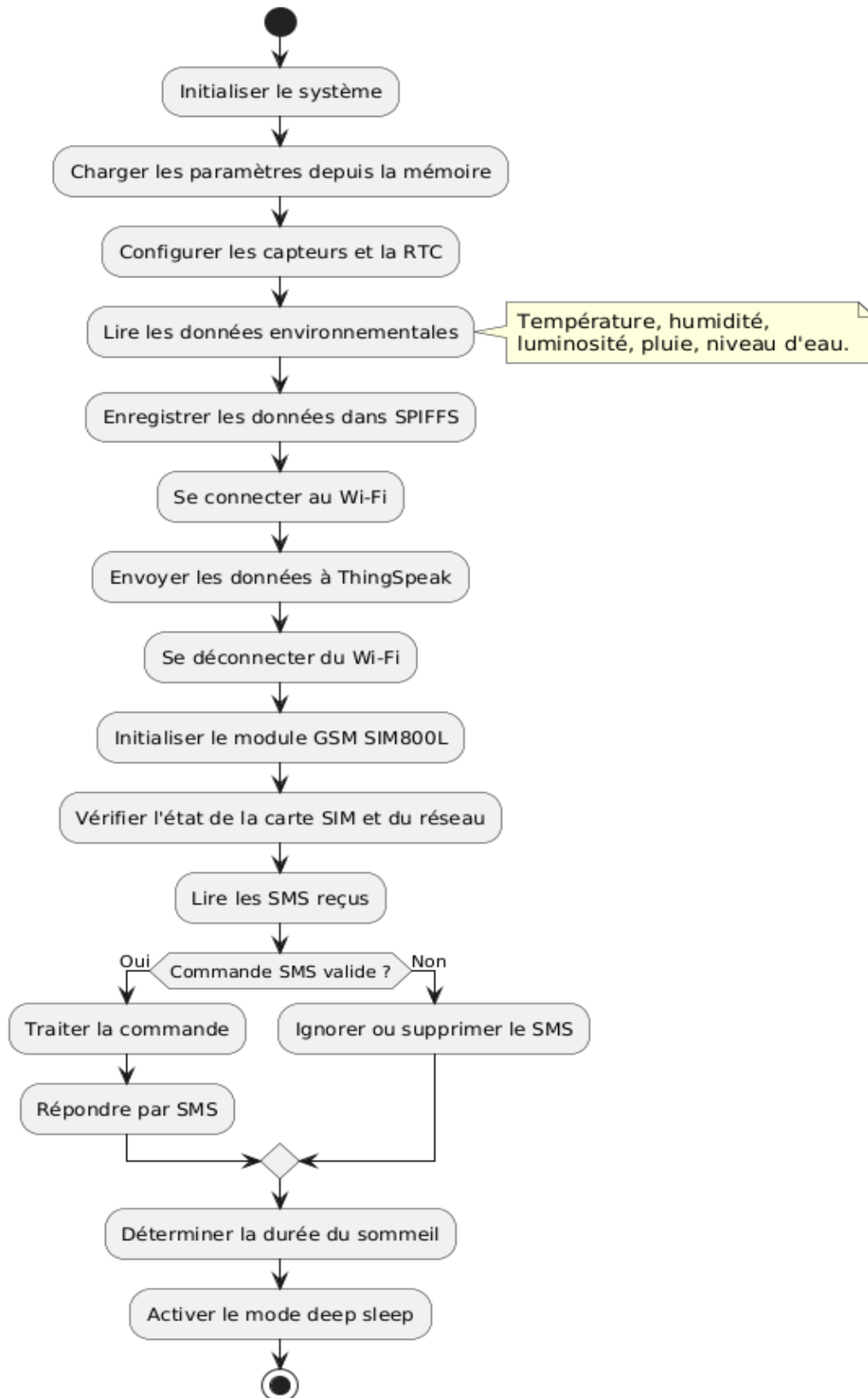


Figure 34 : L'organigramme de fonctionnement général

En ce qui concerne l'étape « Enregistrer les données dans SPIFFS », nous l'avons expliquée dans les points suivants :

Qu'est-ce que SPIFFS ?

SPIFFS (SPI Flash File System) est un système de fichiers embarqué conçu spécialement pour les microcontrôleurs utilisant une mémoire Flash interne, comme l'ESP32. Il permet de gérer un système de fichiers léger dans une partition dédiée de la mémoire flash de l'ESP32.

Il est adapté à des besoins où l'on souhaite stocker localement :

- Des logs de données capteurs
- Des fichiers de configuration
- Des pages web embarquées

Rôle de SPIFFS dans notre projet

Se système SPIFFS est utilisé pour enregistrer localement les données issues des capteurs à chaque cycle de mise en veille. Ceci permet de :

- Sauvegarder les données même en cas de perte de réseau Wi-Fi ou GSM
- Archiver l'historique localement
- Synchroniser ultérieurement les données vers un serveur distant (comme ThingSpeak ou un serveur personnel)

Format de stockage des données (CSV)

Les données sont stockées dans un fichier datalog.csv, dans un format CSV (Comma Separated Values) très léger et compatible avec Excel, Python, MATLAB, etc.

Exemple réel de ligne stockée dans datalog.csv :

Supposons qu'on ait les données suivantes mesurées à un moment donné :

Température : 30.2 °C, Humidité : 48.8 %, Luminosité : 16.6 lux, État de la pluie : 0 (sec), Niveau d'eau : 0 % (bas), et que le système fonctionne depuis 726000 ms (soit 12 minutes).

Le SPIFFS enregistrera : 726000,30.2,48.8,16.6,0,0 se qui écrit sous le format général :
<temps_millis>,<température>,<humidité>,<lumière>,<pluie>,<eau>

Comment extraire les données enregistrées dans SPIFFS ?

- Via le port série (par commande AT ou code Arduino)

Nous pouvons écrire une fonction qui lit et affiche le contenu du fichier datalog.csv sur le port série :

```
File file = SPIFFS.open("/datalog.csv", FILE_READ);  
  
while (file.available()) {  
    Serial.write(file.read()); }  
  
file.close();
```

Nous verrons alors une sortie de ce type :

```
726000,30.2,48.8,16.6,0,0  
804000,30.3,49.1,16.0,0,0
```

- Envoi par SMS ou via HTTP

Nous pouvons ajouter une commande SMS personnalisée (par exemple : GET LOG) pour renvoyer les dernières lignes du fichier CSV par message texte. Il faudra cependant faire attention à la limite de 160 caractères par SMS.

- Téléchargement via SPIFFS Uploader (outil PC)

Nous pouvons utiliser l'extension Arduino "ESP32 Sketch Data Upload" pour monter le système de fichiers SPIFFS comme un disque virtuel, ce qui nous permet de récupérer directement le fichier datalog.csv depuis notre ordinateur.

4. Le branchement des composants

Dans cette section, nous présentons le schéma de câblage de l'ensemble des composants utilisés dans notre station météo solaire. Pour faciliter la compréhension et l'implémentation, des tableaux récapitulatifs ont été réalisés pour chaque module ou capteur, détaillant les connexions entre ces composants et le microcontrôleur ESP32. Ces branchements sont essentiels pour assurer le bon fonctionnement du système et garantir une communication fiable entre les différents éléments.

Les tableaux suivants regroupent les branchements de tous les modules et capteurs intégrés dans notre projet

Les pins de capteur de température et d'humidité (DHT22)	Les pins de l'ESP32
DATA	GPIO 4

VCC	3.3V
GND	GND

Table 3 : Branchement de capteur de température et d'humidité (DHT22)

Les pins de capteur de lumière (BH1750)	Les pins de l'ESP32
SCL	GPIO 22
SDA	GPIO 21
VCC	3.3V
GND	GND

Table 4 : Branchement de capteur de lumière (BH1750)

Les pins de capteur de pluie (FC-37)	Les pins de l'ESP32
AO	GPIO 34
VCC	3.3V
GND	GND

Table 5 : Branchement de capteur de pluie (FC-37)

Les pins de module RTC (DS1307)	Les pins de l'ESP32
SCL	GPIO 22
SDA	GPIO 21
VCC	5V
GND	GND

Table 6 : Branchement de module RTC (DS1307)

Les pins de capteur de niveau d'eau (T1592 P)	Les pins de l'ESP32
S	GPIO 35
VCC	5V
GND	GND

Table 7 : Branchement de capteur de niveau d'eau (T1592 P)

Les pins de module Solar power manager DFRobot	Les pins de la batterie LiPo
BAT IN +	+
BAT IN -	-
Les pins de module Solar power manager DFRobot	Les pins de panneau solaire
SOLAR IN +	+
SOLAR IN -	-

Table 8 : Branchement de module Solar power manager DFRobot (5V/1A)

Les pins de module GSM SIM800L EVB	Les pins de l'ESP32
TXD	GPIO 16
RXD	GPIO 17
VDD	3.3V
GND	GND
Les pins de module GSM SIM800L EVB	Les pins de convertisseur DC DC STEP Down
5VIN	OUT +
GND	OUT -

Table 9 : Branchement de module GSM SIM800L EVB

Les pins de convertisseur DC DC STEP Down	Les pins de la batterie Ultrafire BRC 18650
IN +	+
IN -	-
Les pins de convertisseur DC DC STEP Down	Les pins de module GSM SIM800L EVB
OUT +	5VIN
OUT -	GND

Table 10 : Branchement de convertisseur DC DC STEP Down

5. Le schéma électrique sous le logiciel “ Cirkitt Designer IDE ”

Le schéma électrique de notre mini station météo solaire a été conçu à l'aide du logiciel Cirkitt Designer IDE, un outil en ligne dédié à la simulation et à la création de circuits

électroniques. Nous avons choisi ce logiciel principalement parce qu'il propose des composants spécifiques essentiels à notre projet, qui ne sont pas disponibles dans d'autres logiciels de simulation connus comme Fritzing ou Proteus. Parmi ces composants figurent la batterie LiPo 3.7V, les deux batteries 18650, le module DFRobot Solar Power Manager, le convertisseur DC-DC STEP DOWN, le module GSM SIM800L EVB ainsi que le module RTC DS1307.

Dans notre projet, Circuit Designer IDE nous a permis de modéliser efficacement le système de gestion d'énergie, basé sur un panneau solaire et une batterie Li-Ion rechargeable, ainsi que le module DFRobot Solar Power Manager. Le schéma intègre également tous les capteurs environnementaux (DHT22 pour la température et l'humidité, BH1750 pour la lumière, FC-37 pour la pluie, et T1592 P pour le niveau d'eau) connectés à l'ESP32, qui centralise les mesures. Le module GSM SIM800L EVB, quant à lui, est alimenté via un convertisseur DC-DC STEP DOWN et assure la transmission des données à distance.

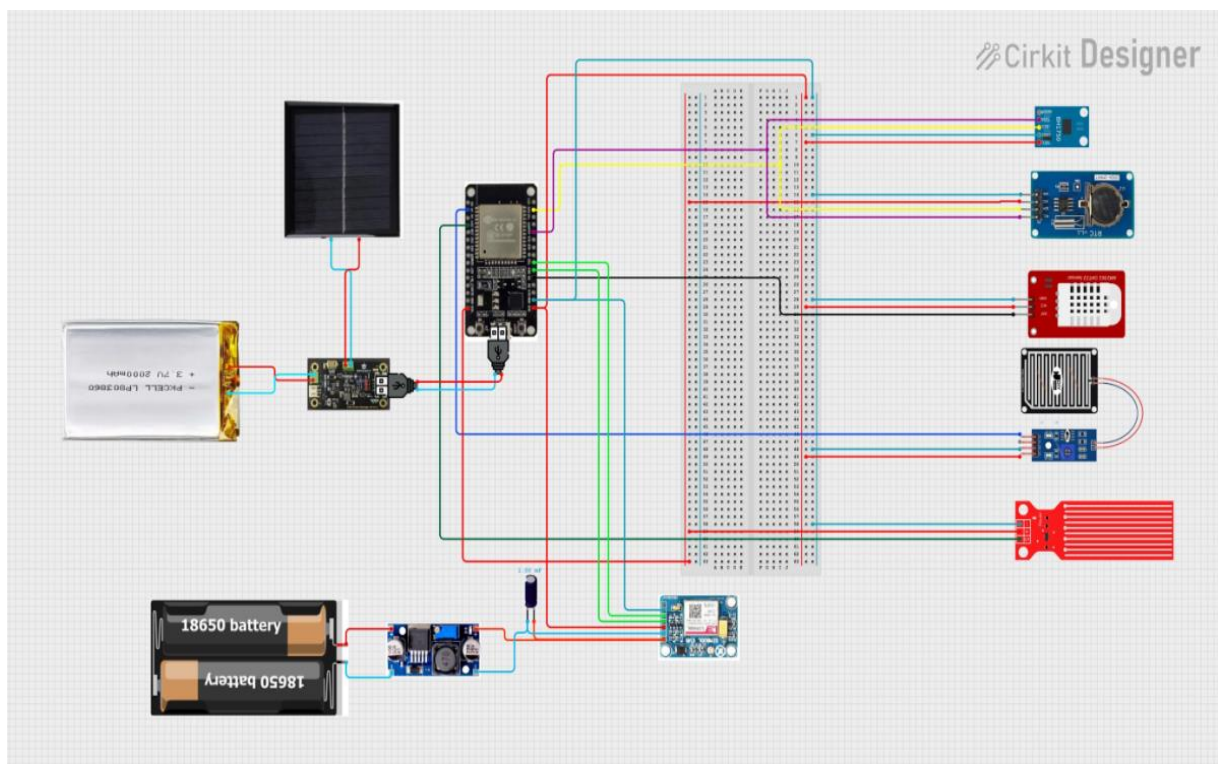


Figure 35 : Le schéma électrique de la station météo réalisé

6. Vue finale de la station météo réalisé

Après avoir intégré l'ensemble des composants électroniques, effectué les branchements nécessaires et assemblé le tout dans une structure fonctionnelle, nous présentons dans cette section la vue finale de notre station météo solaire.



Figure 36 : Vue finale de la station météo réalisé

7. Les résultats obtenus par la station météo solaire

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus à partir de notre station météo solaire après sa mise en service.

7.1. Les résultats obtenus sous forme d'un SMS sur le téléphone portable

Dans notre projet de station météo solaire, le module GSM SIM800L permet l'envoi automatique de données environnementales sous forme de SMS vers un téléphone mobile. Le système est également interactif grâce à trois commandes prédéfinies pouvant être envoyées par l'utilisateur : DATA, DIAG, SET INTERVAL X. Cette communication bidirectionnelle par SMS garantit une consultation rapide et un contrôle distant du système, même en l'absence de connexion Internet, renforçant ainsi l'autonomie et la flexibilité du dispositif dans des environnements isolés.

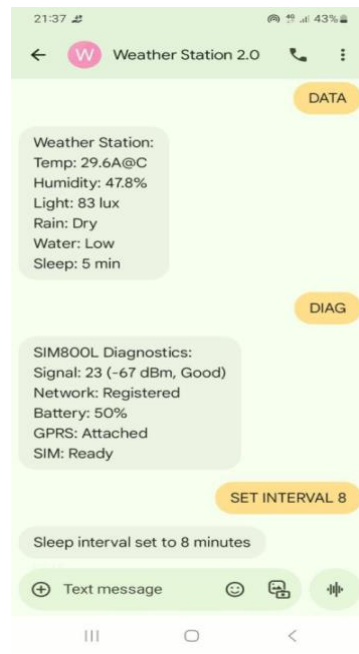


Figure 37 : Les résultats obtenus via un SMS

a. La commande “DATA”

Description

Cette commande permet de recevoir immédiatement par SMS les dernières données mesurées par les capteurs de la station météo.

Données retournées :

Le message SMS de réponse contient :

- Température (en °C)
- Humidité (en %)
- Luminosité (lux)
- État de la pluie (Rainy / Dry)
- Niveau d'eau (Low / Medium / High)
- Intervalle de sommeil actuel (exprimé en minutes)

Utilité

Utile pour surveiller à distance les conditions environnementales en temps réel, notamment en l'absence de connexion Internet.

b. La commande “DIAG”

Description

Cette commande permet d'obtenir un bilan de diagnostic du module GSM (SIM800L). Elle fournit des informations techniques essentielles sur l'état du réseau et de la carte SIM.

Données retournées

- Qualité du signal (RSSI en dBm + interprétation)
- Statut du réseau (inscrit, en itinérance, rejeté, etc.)
- Pourcentage approximatif de batterie
- État du GPRS (attaché ou non)
- État de la carte SIM (prête, code PIN requis, absente...)

Utilité

Permet de diagnostiquer les problèmes de connectivité ou de couverture réseau à distance.

c. La commande : “SET INTERVAL X”

Description

Cette commande permet de modifier dynamiquement l'intervalle de sommeil du système entre deux cycles de mesures. Cela détermine la fréquence de mise en veille de l'ESP32, donc la fréquence des mesures et envois vers ThingSpeak.

Format de la commande

SET INTERVAL X où “X” est un entier entre 1 et 1440 (exprimé en minutes).

Effet

Met à jour dynamiquement l'intervalle de mesure sans devoir reprogrammer manuellement l'ESP32.

Objectif

Offrir à l'utilisateur une flexibilité dans la gestion de la consommation énergétique et de la fréquence de surveillance, utile selon les conditions climatiques ou la capacité de la batterie.

7.2. Les résultats obtenus dans la plateforme ThingSpeak

La plateforme ThingSpeak a été utilisée pour visualiser en temps réel les différentes mesures collectées par notre station météo solaire. L'ESP32 envoie automatiquement ces données via Wi-Fi à l'interface web de ThingSpeak à des intervalles réguliers. Les résultats, tels que la température, l'humidité, la luminosité, le niveau d'eau ainsi que la présence de pluie

sont ensuite représentés sous forme de graphiques interactifs, comme présenté ci-dessous. Cette solution permet un suivi à distance efficace et une meilleure analyse de l'évolution des conditions météorologiques au fil du temps.

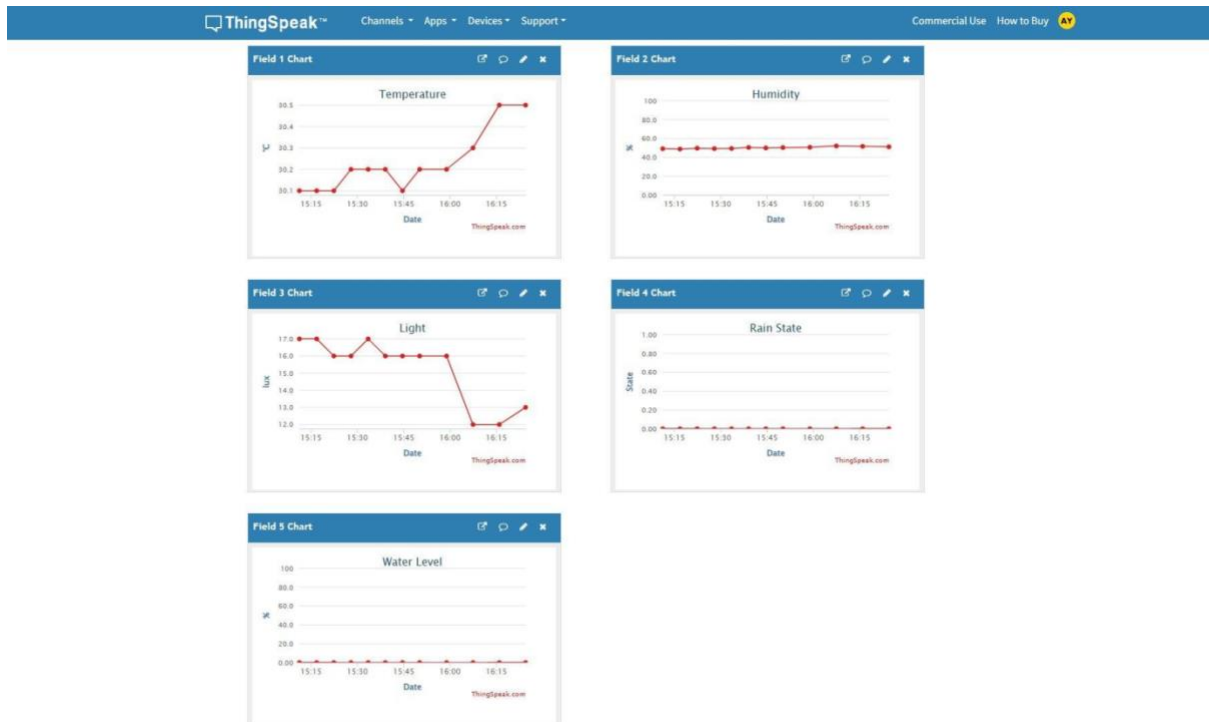


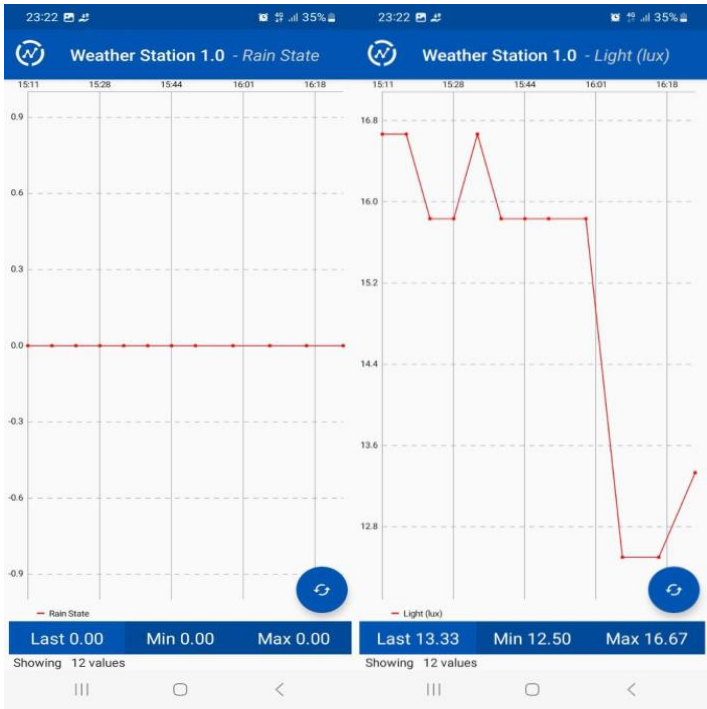
Figure 38 : Les résultats affichés sur la plateforme ThingSpeak via le Web



Température

Humidité

Niveau d'eau



État de pluie

Luminosité

Figure 39 : Les résultats affichés sur l'application ThingSpeak sur Android

Afin de faciliter l'analyse et l'interprétation des données issues de la plateforme ThingSpeak, nous avons extrait et transformé les résultats graphiques en un tableau de relevés. Ce tableau présente de manière structurée l'ensemble des lectures de la station météo, en incluant pour chaque enregistrement l'horodatage précis, les valeurs mesurées pour chaque paramètre (température, humidité, lumière, état de pluie et niveau d'eau), ainsi que l'intervalle de temps écoulé entre deux relevés consécutifs. Cette représentation tabulaire permet une lecture plus directe et une exploitation simplifiée des données pour une éventuelle étude statistique ou comparaison.

#	Horodatage (UTC)	Température (°C)	Humidité (%)	Lumièr e (lux)	État de pluie	Nivea u d'eau (%)	Intervalle depuis la lecture précédente
1	2025-07-02 14:11:20	30.10	49.20	16.67	0	0	—
2	2025-07-02 14:16:56	30.10	48.80	16.67	0	0	5 min 36 s
3	2025-07-02 14:22:30	30.10	49.70	15.83	0	0	5 min 34 s

4	2025-07-02 14:28:03	30.20	49.30	15.83	0	0	5 min 33 s
5	2025-07-02 14:33:36	30.20	49.40	16.67	0	0	5 min 33 s
6	2025-07-02 14:39:10	30.20	50.50	15.83	0	0	5 min 34 s
7	2025-07-02 14:44:43	30.10	50.00	15.83	0	0	5 min 33 s
8	2025-07-02 14:50:16	30.20	50.40	15.83	0	0	5 min 33 s
9	2025-07-02 14:58:59	30.20	50.70	15.83	0	0	8 min 43 s
10	2025-07-02 15:07:32	30.30	52.10	12.50	0	0	8 min 33 s
11	2025-07-02 15:16:03	30.50	51.70	12.50	0	0	8 min 31 s
12	2025-07-02 15:24:34	30.50	51.20	13.33	0	0	8 min 31 s

Table 11 : Les résultats obtenus prennent la forme d'un tableau

- **L'analyse des résultats obtenus via la plateforme ThingSpeak**

Le tableau présente une série de mesures environnementales enregistrées automatiquement par notre station météo solaire, sur une période allant de 2025-07-02 14:11:20 à 2025-07-02 15:24:34. Les paramètres mesurés incluent : la température (en °C), l'humidité relative (en %), la luminosité (en lux), l'état de pluie (binaire), le niveau d'eau (en %), ainsi que l'intervalle écoulé entre deux relevés consécutifs.

Température

La température ambiante reste relativement stable tout au long de la période analysée, variant légèrement entre 30,10 °C et 30,50 °C. Une très légère hausse est observée vers la fin de la séquence, ce qui peut être attribué à une montée progressive de la température au fil de la journée.

Humidité

L'humidité relative de l'air oscille entre 48,80 % et 52,10 %, avec une tendance à la hausse à partir du 7e relevé. Cette progression peut indiquer une augmentation progressive de la saturation en vapeur d'eau dans l'air, probablement liée à des changements de conditions météorologiques ou à l'effet thermique de l'environnement local.

Luminosité

La luminosité reste relativement stable (entre 15,83 et 16,67 lux) pendant la première

moitié de la période, puis chute à 12,50 lux à partir du 10^e enregistrement. Cette diminution peut être due à un ensoleillement moins intense, à un passage nuageux ou à une modification de l'angle d'exposition des capteurs.

État de pluie et niveau d'eau

Toutes les mesures indiquent une absence de pluie (valeur 0) ainsi qu'un niveau d'eau nul (0 %). Ces résultats suggèrent que la période observée a été marquée par un temps sec, sans précipitations, et que le réservoir ou point de collecte d'eau surveillé (le pluviomètre) était vide.

Intervalle de mesure

Les huit premiers relevés ont été effectués à des intervalles réguliers d'environ 5 minutes 33 secondes, conformément à la configuration initiale du système où la variable `sleepMinutes` de l'ESP32 était définie à 5 minutes. Cette variable contrôle précisément la durée de mise en veille profonde (`deep sleep`) du microcontrôleur entre chaque cycle de mesure.

À partir du 9^e enregistrement, nous avons volontairement modifié cet intervalle à 8 minutes 30 secondes en ajustant la valeur de `sleepMinutes` via la commande `SET INTERVAL 8`. Cette reconfiguration nous a permis de réduire la fréquence des mesures dans le but d'optimiser la consommation énergétique du système. Ce mécanisme de contrôle démontre la flexibilité de notre solution, qui s'adapte facilement aux besoins du contexte d'utilisation, tout en garantissant la continuité de la surveillance environnementale.

Sur l'ensemble de la période observée, les données collectées par notre station météo solaire connectée sont cohérentes et reflètent l'état de l'environnement avec précision. Le système démontre un fonctionnement fiable avec une transmission régulière des données vers la plateforme ThingSpeak, permettant une surveillance environnementale en temps réel. L'efficacité de la mise en veille de l'ESP32, combinée à la possibilité de contrôler à distance l'intervalle de mesure via des commandes SMS, illustre la flexibilité et la réactivité du système. Cette adaptabilité constitue un atout majeur pour optimiser la consommation énergétique et garantir une autonomie prolongée. Ces résultats confirment ainsi la stabilité, la fiabilité et la performance de notre solution de télésurveillance météorologique.

8. Conclusion

Ce troisième chapitre a été consacré à la concrétisation pratique de notre station météo solaire. Après une brève introduction, nous avons présenté le schéma synoptique du système,

illustrant de manière globale le fonctionnement et l'interconnexion des différents modules. Nous avons ensuite détaillé le branchement de chaque composant à l'aide de tableaux explicatifs, facilitant ainsi la compréhension et la reproduction du câblage.

L'élaboration du schéma électrique à l'aide du logiciel Cirkuit Designer IDE a permis de visualiser et de valider l'ensemble des connexions du système avant l'assemblage physique. La vue finale de la station réalisée témoigne de l'intégration soignée de tous les éléments dans un boîtier étanche, garantissant robustesse et fiabilité dans des environnements extérieurs.

Enfin, les résultats obtenus à travers les tests de fonctionnement confirment l'efficacité de la station dans la collecte, le traitement et la transmission des données environnementales. L'ensemble de ces étapes marque l'aboutissement de la phase de réalisation, et constitue une base solide pour d'éventuelles améliorations futures du système.

Conclusion générale

La surveillance et la prévision des conditions météorologiques constituent aujourd'hui un enjeu majeur, notamment dans un contexte de changements climatiques, de gestion durable des ressources naturelles et d'amélioration de la vie quotidienne. Le besoin de disposer de données météorologiques locales, fiables et en temps réel se fait de plus en plus ressentir, en particulier dans les zones isolées ou à usage agricole, domestique ou environnemental.

C'est dans cette optique que nous avons conçu et réalisé une mini station météo solaire reposant sur le microcontrôleur ESP32, afin de collecter et transmettre automatiquement plusieurs paramètres climatiques essentiels. Le système développé permet la mesure en continu de l'humidité et de la température de l'air, de la luminosité, de la présence de pluie et du niveau d'eau, le tout alimenté de manière autonome grâce à un panneau solaire et une batterie LIPO rechargeable. La connectivité du système repose sur une double architecture de communication. D'une part, les données environnementales sont transmises à distance vers la plateforme ThingSpeak via une connexion Wi-Fi, ce qui permet une visualisation en ligne simple, accessible et en temps réel. D'autre part, ces mêmes données peuvent être envoyées sous forme de SMS à l'utilisateur grâce au module GSM SIM800L EVB, assurant ainsi une accessibilité locale, même en l'absence de connexion Internet. Cette double accessibilité renforce la fiabilité du système et l'adapte aux environnements où la connectivité peut varier.

L'objectif de concevoir une station autonome, économique et adaptée aux besoins de télémessure environnementale a été atteint avec succès, et les résultats obtenus à travers les tests pratiques sont satisfaisants. Le système fonctionne de manière stable, aussi bien de jour comme de nuit, grâce à une gestion optimisée de l'énergie et un suivi horaire assuré par un module RTC.

Ainsi, ce projet représente une solution prometteuse et évolutive dans le domaine de l'Internet des Objets (IoT) appliqué à la météorologie, et constitue une base solide pour de futures recherches et développements dans le domaine des systèmes embarqués et de la surveillance environnementale.

Perspectives

Bien que la station météo solaire que nous avons réalisée réponde aux objectifs fixés en matière de collecte et de transmission de données environnementales de base, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées pour enrichir ses fonctionnalités et renforcer ses performances.

Nous voulons, dans un premier temps, intégrer des capteurs supplémentaires permettant la mesure de la vitesse et de la direction du vent, ainsi que de l'altitude. De même, nous envisageons la mise en place d'un pluviomètre électronique plus précis, afin de quantifier le niveau de précipitations de manière plus fine et plus fiable. L'ajout d'un capteur de pression atmosphérique permettrait également de fournir une analyse météorologique plus complète.

Sur le plan logiciel, nous projetons de développer une application mobile dédiée à notre station. Cette application, que nous souhaitons gratuite et simple d'utilisation, offrirait une interface conviviale pour consulter les données, accéder à l'historique des relevés, et recevoir des notifications en temps réel, notamment en cas de conditions météorologiques extrêmes. Cela rendrait notre système plus interactif et plus adapté aux besoins quotidiens des utilisateurs.

Par ailleurs, dans une perspective plus avancée, nous envisageons d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle pour le traitement et l'analyse prédictive des données collectées. Grâce à des algorithmes d'apprentissage automatique, il serait possible de détecter des tendances climatiques, d'anticiper certains phénomènes météorologiques, ou encore d'optimiser la gestion énergétique du système en fonction des prévisions locales. Cette approche ouvrirait la voie à une station météo plus intelligente, capable non seulement de mesurer l'environnement, mais aussi de l'interpréter et de s'y adapter.

Références bibliographiques

- [1] R. A. M. Saeed, " *Mise en œuvre d'une Station Météo* ", Mémoire de stage professionnel (fin de cycle), Université Sidi Mohamed Ben Abdellah De Fes, Maroc, 2023
- [2] B. M. Oussama et S. M. A. Said, " *Etude et conception d'une station météorologique* ", Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib - Ain Temouchent, 2022
- [3] J. Perovnik, I. Bajsić, " *A Review of Air Humidity Measurement Methods* ", Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering, vol 39 N° 3-4, pp. 99–114, 2017.
- [4] C. A. Cherif et H. I. S. Ahmed, " *Conception et réalisation d'une station météo avec télétransmission de données* ", Mémoire de Master, Université De Saad Dahlab - Blida , 2015
- [5] P. Bellizzi, Different Types of Weather Stations, Weather Station Depot, <https://www.weatherstationdepot.com/different-types-weather-stations/#advgb-toc-5063a10c-e472-4d10-b3a4-5dee43847934>, Consulté en Février 2025
- [6] B. Yasmine et B. A. Abde Raouf, " *Conception et réalisation d'une station météorologique à base de l'arduino uno* ", Mémoire de Master, Université de Mohamed Boudiaf - M'sila, 2022
- [7] C. Hamza, " *Conception d'une mini-station météorologique automatique : Comparaison avec les données d'une station synoptique* ", Mémoire de Master, Université de Kasdi Merbah - Ouargla, 2020
- [8] T. D. McGee, " *Principles and Methods of Temperature Measurement* ", 1^{re} édition, John Wiley & Sons, New York, 581 pp, 1988, DOI: 10.3390/s140507881
- [9] Support EcomiZ, " *Météo : Les outils indispensables de mesure de météorologie.* " Distrimesure, publié le 28 décembre 2017, <https://www.distrimesure.com/fr/blog/meteo-les-outils-indispensables-de-mesure-de-meteorologie-b13.html>, Consulté en Mars 2025
- [10] H. Farahani, R. Wagiran, M.N. Hamidon " *Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review* ", Sensors, vol. 14, no 5, pp. 7881–7939, 2014.
- [11] D. F. BURCH, " *The Barometer Handbook : A Modern Look at Barometers and Applications of Barometric Pressure* ", 1^{re} édition, Starpath Publications, Seattle, p-238, 2009, ISBN: 0914025120, 9780914025122
- [12] R. G. HARRISON, " *Meteorological Measurements and Instrumentation* ", 2^e édition, Wiley-Blackwell, 288 pages, 2015, ISBN: 978-1-118-74580-9
- [13] O. D. Nassim, " *Etude et réalisation d'une girouette électronique* ", Mémoire de master, Université Abou Bakr Belkaid - Tlemcen, 2015

- [14] X. Wang, S. Shi, L. Zhu, Y. Nie, G. Lai, “*Traditional and Novel Methods of Rainfall Observation and Measurement: A Review*”, Journal of Hydrometeorology, vol. 24, no. 12, pp. 2153–2176, 2023, DOI : 10.1175/JHM-D-22-0122.1
- [15] C. Said, O. Achour , " *Acquisition des données météorologiques par la station Enerco 407 et leur transmission via logiciel Messir* ", Mémoire de Master, Université de MOULOUD MAMMERI - TIZI-OUZOU, 2012
- [16] E. HOPKIN, " *Use of a Calibrated Ceilometer Network to Improve High Resolution Weather Forecasts* ", thèse de doctorat, Météorologie et modélisation atmosphérique, University of Reading, Reading, Royaume-Uni, 2019.
- [17] R. J. Dirksen, H. Vömel, R. Kivi, F. Immler, M. Sommer, D. F. Hurst " *Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde* ", Atmospheric Measurement Techniques, Vol 7 N° 12, pp. 4463–4490. 2014, DOI: 10.5194/amt-7-4463-2014
- [18] La station météo analogique, <https://www.tiendafotovoltaica.es/Estacion-meteorologica-analogica-de-precision-acero-inox-Stormcheck>, Consulté en Mars 2025
- [19] La station météo professionnelle modèle A, <https://www.campbellsci.fr/wxpro>, Consulté en Mars 2025
- [20] La station météo professionnelle Modèle B, <https://www.groupe-normand.com/shop/990061-station-meteo-professionnelle-couleur-2287>, Consulté en Mars 2025
- [21] La station météo professionnelle modèle C, <https://www.crodeon.com/products/professional-weather-station>, Consulté en Mars 2025
- [22] La station météo portable, <https://geneq.com/environnement/fr/stations-meteo-portables-113/>, Consulté en Mars 2025
- [23] La station météo agricole, <https://www.agroressources.com/pourquoi-installer-une-station-meteo-sur-mon-exploitation-agricole/>, Consulté en Mars 2025
- [24] La station météo marine, <https://www.meteo-marine.com/consulter/bouees-meteo/>, Consulté en Mars 2025
- [25] La station météo domestique modèle A, <https://www.amazon.fr/Domestique-Thermom%C3%A8tre-Pr%C3%A9cipitations-Atmosph%C3%A9rique-M%C3%A9t%C3%A9orologiques/dp/B08R6X6XK4>, Consulté en Mars 2025
- [26] La station météo domestique modèle B, <https://www.amazon.fr/Station-m%C3%A9t%C3%A9o-domestique-Thermom%C3%A8tre-radio-pilot%C3%A9/dp/B0CPJJXDKD?th=1>, Consulté en Mars 2025

- [27] La station météo routière, <https://www.campbellsci.fr/rwis>, Consulté en Mars 2025
- [28] S. Nessrine et O. A. Nesserine, " *Conception et réalisation d'un module pour l'acquisition des données météorologiques à base de l'Arduino* ", Mémoire de Master, Université De Saad Dahlab - Blida 1, 2020
- [29] F. Nour Elhouda et R. Nadjlal, " *Réalisation d'une station météo connectée* ", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2019
- [30] *Capteur : définition et explications* ,Techno-Science.net, <https://www.techno-science.net/definition/3690.html>, Consulté en Avril 2025
- [31] C. Faury, *Les capteurs : Sciences de l'Ingénieur*, Publié le 12 février 2019 , Mise à jour 12 juillet 2024, https://si.blaisepascal.fr/1t-les-capteurs/#Etude_des_principaux_capteurs, Consulté en Avril 2025
- [32] *Séquence 2 Sciences de l'ingénieur : LES FAMILLES DE CAPTEURS*, pedagogie.ac-limoges.fr, http://pedagogie.ac-limoges.fr/sti_si/accueil/FichesConnaissances/Sequence2SSi/co/grain_4_familles_capteurs.html, Consulté en Avril 2025
- [33] Jerome, Tutorial DHT22 : code arduino, librairie, exemple fonctionnement, Passion Electronique, publier le 18 janvier 2024, <https://passionelectronique.fr/tutorial-dht22/>, Consulté en Avril 2025
- [34] Module Détecteur de Pluie Pour Arduino, MicroPlanet, publier le 3 Avril 2024, https://www.micro-planet.ma/produit/module-detecteur-de-pluie/?srsId=AfmBOooMNSsJkqE4gb6RZjvCpiRUiueqE6uB_XIcPgXRwglFHo5ca-9&utm, Consulté en Avril 2025
- [35] A. Salem et S. Brahim, " *Etude et réalisation d'un système de télésurveillance de qualité de l'eau* ", Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj – Bouira, 2024
- [36] Thomas, Arduino avec capteur de lumière ambiante BH1750, Raspberryme, publier le 21 Mars 2022, <https://www.raspberryme.com/arduino-avec-capteur-de-lumiere-ambiante-bh1750/>, Consulté en Avril 2025
- [37] F. Nour Elhouda et R. Nadjlal, " *Réalisation d'une station météo connectée* ", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen, 2019
- [38] C. Messaouda et D. Assia, " *Etude et réalisation d'une station météorologique* ", Mémoire de Master, Université Ahmed Draia-Adrar, 2021
- [39] K. M. Fares et F. Mohamed, " *Conception d'un système de Gestion intelligente (IoT) de confort thermique des bâtiments* ", Mémoire de Master, Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2023

- [40] ESP32 DEV KIT V1 PINOUT, <https://mischianti.org/doi-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>, Consulté en Juillet 2025
- [41] Indiamart, Embeddinator BH1750 Light Intensity Sensor, <https://m.indiamart.com/proddetail/embeddinator-bh1750-light-intensity-sensor-2850811421855.html>, Consulté en Avril 2025
- [42] SIM800L & SIM800L EVB v2.0 - Variations and wiring (2018), <https://forum.arduino.cc/t/sim800l-sim800l-evb-v2-0-variations-and-wiring/505185>, Consulté en Mai 2025
- [43] Hub360, Sim800l EVB GSM/GPRS module - HUB360. https://hub360.com.ng/product/standard-sim800l-module/?srsltid=AfmBOooQJ_JbzCjLJITOJYkvYt7_Pnnt16_ioLVJlhh-Hmqgapd0-zsE, Consulté en Mai 2025
- [44] Espressif Systems, « *Milestones – About Us* », <https://www.espressif.com/en/company/about-us/milestones>, Consulté en Mai 2025
- [45] DFRobot, « *DFR0559 - Solar Power Manager 5V/1A – Datasheet* », https://mm.digikey.com/Volume0/opasdata/d220001/medias/docus/750/DFR0559_Web.pdf, Consulté en Juin 2025.
- [46] Isaac, “ *Guide complet du module RTC DS1307* ”, Hardware Libre, publier le 8 Février 2025, <https://fr.hwlibre.com/Guide-complet-du-module-RTC-DS1307/>, Consulté en Juin 2025
- [47] DS1307 - 64 x 8, Serial, I2C Real-Time Clock, <https://www.analog.com/en/products/ds1307.html>, Consulté en Juin 2025
- [48] Ahmed, Development of a wireless monitoring system to monitor river water levels in real time, ResearchGate, Juillet 2023, <https://www.researchgate.net/publication/374918818>, Consulté en Juin 2025
- [49] T.K. Hareendran, LM2596S module – A trivial tale, dernière mise à jour le 19 Octobre 2020, <https://www.codrey.com/learn/lm2596s-module-a-trivial-tale>, Consulté en Juin 2025
- [50] Panneau solaire type Polycristallin, 5V 10Watt 210x130x1.5mm, Binarytech Electronique Algérie, <https://binarytech-dz.com/produit/panneau-solaire-type-polycristallin-5v-10watt-210x130x1-5mm/>, Consulté en Juin 2025
- [51] Sunflower Solar Power Manager, <https://www.mouser.fr/new/dfrobot/dfrobot-sunflower-solar-power-manager/>, Consulté en Juin 2025
- [52] Le module RTC “ ELEGOO DS1307 MODULE-V03 ”, <https://digilog.pk/products/elegoo-ds1307-module-v03>, Consulté en Juin 2025

[53] DIYables Water Sensor Detector for Arduino, ESP32, ESP8266, Raspberry Pi | DIYables Products , <https://diyables.io/products/water-sensor-detector>, Consulté en Juin 2025

[54] WF-101 CONVERTISSEUR DC DC STEP DOWN LM2596S-ADJ 3A, <https://www.orbit-dz.com/product/produit-1760/>, Consulté en Juin 2025