REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITEYAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Systèmes des Télécommunications

Etude et réalisation d'une Station Météorologique Connectée pour l'Agriculture de Précision

Présenté par :

Meroua Ikram BAHLOUL

Proposé et Dirigé par :

Dr. Samir CHADLI

Dr. Billel BEN GHERBIA

Promotion 2025

Remerciement

Partant du proverbe « Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas Dieu », nous présentons nos plus sincères remerciements et notre profonde gratitude pour le soutien dont nous avons bénéficié lors de la préparation de notre mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme de Master.

Nous adressons nos remerciements et notre estime les plus sincères à notre encadrant, **Dr.Chadli Samir**, qui a été un véritable soutien et guide tout au long de notre parcours de recherche. Il ne nous a jamais privé de son savoir ni de son expérience. Ses orientations éclairées et son soutien constant ont été la pierre angulaire de l'accomplissement de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous nos professeurs, en commençant par **Dr.Ben Gharbia Billel**, de qui nous avons appris le dévouement et la rigueur dans le travail. Il est donc de notre devoir de vous remercier avec des couronnes d'or.

À ceux qui ont transformé l'échec en réussite qui s'élève vers les sommets : les enseignants du département des télécommunications dans leur ensemble.

Nous remercions également notre enseignant **Mohamed Boulesnam** et **Berkani Mohamed Rafik Aymene**.

Votre plus grande fierté est d'être des sources d'inspiration dans nos cœurs, et pas seulement dans les livres.

Merci pour toutes les belles choses que nous apprenons de vous.

Dédicace

لم تكن الرحلة سهلة،ولا الدرب يسيرًا كما تشتهي سفننا

الحمد لله الذي زوّدنا بوقود العطاء في عزّ الانطفاء،

الحمد لله الذي بلغنا النهايات، وأزال عنّا تعب السنين،

فالشكر لله أولًا وأخرا،

ولكل من أعاننا أن نرسو اليوم على بدايات النجاح،

ولكل من كان عونًا لننهي مسيرة لم يكن الوصول فيها سهلًا،

و لكل من هوّن علينا طريقنا، ولو بدعاءٍ في الخفاء

وبكل امتنان واعتزاز، أُهدي هذا النجاح إلى

من كان رياحًا تدفع شراعي، وسقى زهور أحلامي بعرق جبينه

أبي

إلى الصادقة في حبها، صاحبة الدعاء في الخلوات،

:من علمتني أن الدنيا كفاح وسلاحه العلم

أمي

إلى من شدّ الله عَضُدي بهن، سَنَدي الذي لا يميل ولا تميله الأيام

إخوتي

إلى أصدقاء الطرق جميعًا، الوعرة والسهلة، أُهديه لهم أيضًا، امتنانًا لوجودكم

رفقاء السنين والمواقف

إلى عائلتي الكبيرة، من احتضنني صغيرًا، و آزرني كبيرًا،

لكم جميعًا أُهدي هذا النجاح عن حب وامتنان

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم وإنجاز محطة أرصاد جوية متصلة، موجهة خصيصًا لتلبية احتياجات الفلاح الجزائري. تقوم هذه المحطة بقياس المعطيات المناخية الأساسية (درجة الحرارة، الرطوبة، الضغط الجوي، سرعة الرياح، كمية التساقطات...) في الزمن الحقيقي، وذلك باستخدام مجسّات دقيقة. تُعالج البيانات بواسطة المتحكم الدقيقESP32 TCall ، وتُرسل إلى منصةThingSpeakعبر وحدة SIM800L باستخدام شبكة .GSM وفي حال حدوث تغيّرات مناخية حرجة (كارتفاع درجات الحرارة أو الفيضانات)، يتم إرسال تنبيه عبر رسالة قصيرة (SMS) إلى هاتف الفلاح.تندرج هذه المحطة ضمن إطار الزراعة الدقيقة، حيث توفّر أداة ذكية وعملية لتحسين تسيير الموارد، التنبؤ بالمخاطر، وزيادة الإنتاجية، مما يسهم في دعم الأمن الغذائي وتعزيز الزراعة الذكية والمستدامة في الجزائر.

الكلمات المفتاحية: الزراعة الدقيقة ,انترنت الاشياء, محطة قياسات مناخية متصلة ,تكنولوجيا الحساسات.

Résumé

Ce projet vise à concevoir et réaliser une station météorologique connectée destinée à répondre aux besoins de l'agriculteur algérien. Cette station mesure en temps réel les données climatiques essentielles (température, humidité, pression, vitesse du vent, quantité de précipitations...) à l'aide de capteurs précis. Les données sont traitées par le microcontrôleur ESP32 TCall et transmises à la plateforme ThingSpeak via le module SIM800L utilisant le réseau GSM. En cas de changements climatiques critiques (températures élevées, inondations…), une alerte SMS est envoyée au téléphone de l'agriculteur.

Cette station s'inscrit dans le cadre de l'agriculture de précision et offre un outil intelligent et pratique pour améliorer la gestion des ressources, prévoir les risques, et augmenter la productivité, contribuant ainsi à soutenir l'autosuffisance alimentaire et à promouvoir une agriculture intelligente et durable en Algérie.

Mots clé : agriculture de précision, IoT, station météorologique connectée, technologies de capteurs.

Abstract

This project aims to design and develop a connected weather station intended to meet the needs of Algerian farmers. The station measures essential climatic data (temperature, humidity, pressure, wind speed, rainfall amount, etc.) in real-time using precise sensors.

The data is processed by the ESP32 TCall microcontroller and sent to the ThingSpeak platform via the SIM800L module using the GSM network. In case of critical climatic changes (high temperatures, floods, etc.), an SMS alertis sent to the farmer's phone.

This station is part of precision agriculture and provides a smart and practical tool to improve resource management, predict risks, and increase productivity, there by supporting food self-sufficiency and promoting smart and sustainable agriculture in Algeria.

Key words : Precision agriculture, IoT (Internet of Things), Connected weather station, Sensor technologies.

Sommaire

Remerciement 2

Dédicace 3

Résumé 4

Abstract 4

Sommaire 5

Liste des Figures 7

Liste des Tableaux 9

Liste des abréviations 10

Introduction Générale 1

Chapitre I : Généralité sur l'agriculture de precision 2

I.1-Introduction 3

I.2-Les défis techniques et environnementaux de l'agriculture traditionnelle et son impact sur la sécurité alimentaire 4

I.3-Les obstacles à l'agriculture en Algérie 5

I.4-L'agriculture de précision 6

I.4.1-Définition et principe de base 6

I.4.2-Les technologies utilisées dans l'agriculture de précision 8

I.5-Les stations météorologiques 10

I.5.1-Historique sur les stations météorologiques 10

I.5.2-Les types des stations météorologiques 11

I.5.3-Les facteurs climatiques et instruments de mesure météorologiques 12

I.6-le rôle des stations météorologiques dans l'agriculture 19

I.6.1 La relation entre les facteurs climatiques et les activités quotidiennes 19

I.7-Conclusion 22

Chapitre II : Conception de la station météorologique 23

II.1-Introduction 24

II.2-Principe de fonctionnement des stations météorologiques connectées 24

II.3-Système embarqué 25

II.3.1-Les type des systèmes embarquant 25

II.2.2-Architecture générale 26

II.4-Le Microcontrôleur 26

II.5-Esperessif et ESP32 28

II.5.1-Domaines et Applications de l'ESP32 29

II.5.2-Les types d'ESP32 29
II.6-Matériels 30
II.6.1-Capteur BME280 pour la mesure de la température, pression et de l'humidité 30
II.6.2-Capteur anémomètre 32
II.6.3-Girouette 35
II.6.4-Capteur de luminosité TSL2561 36
II.6.5-Pluviomètre 37
II.6.6-ESP32 WROOM 32 39
II.6.7-TTGO T-Call ET SIM800L 41
II.6.8-ADS1115 (Convertisseur Analogique-Numérique) 42
II.6.9-Convertisseur de niveau logique 43
II.6.10-GPS 44
II.7-Conclusion 46
Chapitre III : Réalisation et mise en marche 47
III.1-Introduction 47
III.2-Architecture Générale de système 47
III.3-Partie logicielle (Software) 48
III.3.1-Environnement de développement (arduino ADE) 48
III.3.2-Thingspeak 50
III.3.3-GSM/GPRS et Protocol TCP/IP ET HTTP 52
III.4-Partie matérielle (hardware) 52
III.4.1-C-omposants utilisés 53
III.4.1.1-Les capteurs météorologiques 53
III.4.2-Schéma électrique 55
III.4.3-Schéma d'implémentation et PCB 55
III.4.4-L'organigramme de système 56
III.4-Test et résultat 57
Conclusion Générale 46
Bibliographie 63

Liste des Figures

I.1: L’agriculture traditionnelle : Le recours aux outils manuels dans le travail agricole---3

I.2: Utilisation de drones en agriculture : pulvérisation de précision et analyse des sols---9

I.3: Station météorologique analogique----------11

I.4: Station météorologique numérique----------12

I.5: Thermomètre classique----------13

I.6: Module capteur de température CTN double sortie----------14

I.7: L’hygromètre à cheveux----------15

I.8: Pyranomètre CM5 fabriqué par KIPP & ZONEN----------16

I.9: CUP-anémomètre----------16

I.10: Pluviomètre à auget basculant----------18

II.1: Architecture générale d’un système embarqué----------26

II.2: Les éléments principaux d’un microcontrôleur----------27

II.3: Modèles des microcontrôleurs----------28

II.4: BME280----------31

II.5: BME280 étanche et leur interface----------31

II.6: Anémomètre PCE WS RS485----------33

II.7: Ultra sonique anémomètre----------34

II.8: Capteur de vent ZTS_3000_fxjt_v05----------35

II.9: Capteur de direction de vent----------36

II.10: Capteur de luminosité TSL2561----------36

II.11: MS-WH-SP-RG----------39

II.12: SIM800L module----------41

II.13: T-Call et ESP32----------42

II.14: Broches du module ADS1115----------43

II.15: Niveau de shifter----------44

II.16: Principe de fonctionnement d'une carte électronique GPS----------45

III.1 **:** Schéma synoptique de la station météorologique connectée----------48

III.2 : Barre de menus Arduino IDE----------50

III.3 : Barre d'outils Arduino IDE----------50

III.4 : Schéma général de ThingSpeak----------52

III.5 : Schéma électrique du câblage----------56

III.6 : schéma d'implémentation et PCB ----------57

III.7: l'organigramme de système----------58

III.8 : Rayonnement solaire mesuré par le capteur TSL2561 (lux) ----------59

III.9 : Résultats du capteur TSL2561 après le coucher du soleil----------59

III.10 : Température ambiante enregistrée pendant la nuit (°C) ----------60

III.11 : Pression atmosphérique mesurée (hPa) ----------60

III.12 : Évolution de l'humidité relative pendant la nuit (%) ----------61

III.13: Vitesse du vent (km/s) ----------61

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : Équilibre des facteurs pour la culture de la tomate----------21

Tableau II.1 : Comparaison des pluviomètres----------37

Tableau III.1 : Caractéristiques du BME280----------54

Liste des abréviations

ADC : Analog-to-Digital Converter (Convertisseur Analogique-Numérique)

API : Application Programming Interface (Interface de Programmation d'Application)

BLE : Bluetooth Low Energy (Bluetooth à Basse Consommation)

BTS : Base Transceiver Station (Station de Base Émetteur-Récepteur)

CTN : Coefficient de Température Négatif (NegativeTemperature Coefficient)

DAC : Digital-to-Analog Converter (Convertisseur Numérique-Analogique)

GPIO : General Purpose Input/Output (Entrée/Sortie à Usage Général)

GPRS : General Packet Radio Service (Service Général de Transmission par Paquets)

GSM : Global System for Mobile Communications (Système Mondial pour les Communications Mobiles)

HR : Humidité Relative (Relative Humidity)

HTTP : HyperText Transfer Protocol (Protocole de Transfert d'Hypertexte)

I2C : Inter-Integrated Circuit (Circuit Inter-Intégré)

IDE : Integrated DevelopmentEnvironment (Environnement de Développement Intégré)

IP : Indice de Protection (Ingress Protection)

IoT : Internet of Things (Internet des Objets)

LDR : Light-Dependent Resistor (Résistance Dépendante de la Lumière)

M2M : Machine-to-Machine (Communication de Machine à Machine)

Modbus RTU : Modbus Remote Terminal Unit

OTA : Over-The-Air (Mise à Jour à Distance)

PGA : Programmable Gain Amplifier (Amplificateur à Gain Programmable)

PSRAM : Pseudo-StaticRandom Access Memory (Mémoire Pseudo-Statique à Accès Aléatoire)

PWM : Pulse Width Modulation (Modulation par Largeur d'Impulsion)

RAM : Random Access Memory (Mémoire à Accès Aléatoire)

RTC : Real-Time Clock (Horlogeen Temps Réel)

SBC : Sub-Band Coding

SCADA : Supervisory Control and Data Acquisition (Supervision, Contrôle et Acquisition de Données)

SI : Système International

SPI : Serial Peripheral Interface (Interface Périphérique Série)

TCP/IP : Transmission Control Protocol/Internet Protocol (Protocole de Contrôle de Transmission/Protocole Internet)

TDMA : Time Division Multiple Access (Accès Multiple par Répartition dans le Temps)

UART : Universal Asynchronous Receiver / Transmitter (Récepteur / Transmetteur Asynchrone Universel)

USART : Universal Synchronous / AsynchronousReceiver /Transmitter (Récepteur/Transmetteur Synchrone/Asynchrone Universel)

Wi-Fi : Wireless Fidelity (Fidélité Sans Fil)

ZGBEE : Zigbee

Introduction Générale

Introduction Générale

Face aux défis climatiques croissants et aux exigences d'une agriculture durable, la communauté scientifique et technique s'efforce de développer des solutions innovantes pour accompagner les agriculteurs dans la gestion optimale de leurs ressources. En Algérie, le secteur agricole représente un levier stratégique pour atteindre l'autosuffisance alimentaire et soutenir la croissance économique. Cependant, ce secteur fait face à de nombreuses contraintes, notamment l'utilisation de méthodes agricoles traditionnelles, la mauvaise gestion de l'eau, ainsi que les impacts imprévisibles du changement climatique.

Dans ce contexte, l'agriculture de précision émerge comme une approche prometteuse, fondée sur l'utilisation des technologies avancées telles que l'Internet des Objets (IoT), les capteurs intelligents, les systèmes de collecte et d'analyse de données en temps réel. Parmi ces technologies, les stations météorologiques connectées jouent un rôle fondamental dans la fourniture d'informations climatiques précises et instantanées permettant d'orienter la prise de décision agricole.

Le projet que nous présentons dans le cadre de notre mémoire de fin d'études vise la conception et la réalisation d'une station météorologique connectée, capable de collecter et de transmettre des données environnementales essentielles à un agriculteur via une interface en ligne (ThingSpeak) et par SMS en cas de conditions critiques. Cette station repose sur l'utilisation d'un microcontrôleur ESP32 TCall, associé à un module SIM800L, et à un ensemble de capteurs climatiques (température, humidité, pression, vitesse du vent, pluviométrie, etc.).

Notre mémoire s'articule autour de trois chapitres principaux. Dans le premier chapitre, nous avons abordé l'importance de l'agriculture de précision pour le développement du secteur agricole en Algérie, ainsi que les différents types de stations météorologiques, leur origine et leur principe de fonctionnement. Le deuxième chapitre a été consacré à l'aspect technique, en expliquant le rôle des microcontrôleurs et en justifiant le choix des capteurs adaptés à notre station. Enfin, dans le dernier chapitre, nous avons présenté la partie logicielle du projet, le câblage des capteurs, ainsi que les résultats obtenus à partir de notre station connectée.

Chapitre I

Généralité sur l'Agriculture de Précision

I.1-Introduction

Face aux défis persistants de l'agriculture traditionnelle faible productivité, vulnérabilité climatique et gestion inefficace des ressources l'adoption de l'agriculture de précision s'impose comme une nécessité stratégique, notamment en Algérie. Ce pays, confronté à des contraintes géographiques (aridité, pénurie d'eau) et socio-économiques (urbanisation accélérée, exode rural), doit repenser son modèle agricole pour assurer sa sécurité alimentaire. Les technologies telles que les drones, les capteurs intelligents et les stations météorologiques connectées offrent des solutions concrètes : optimisation de l'irrigation, surveillance des cultures en temps réel, et adaptation proactive aux aléas climatiques. En intégrant ces outils, l'Algérie pourrait non seulement augmenter ses rendements, mais aussi préserver ses écosystèmes fragiles. Toutefois, cela requiert une collaboration multisectorielle, un investissement dans la formation des agriculteurs et des politiques publiques favorisant l'innovation. L'équilibre entre modernité et durabilité reste la clé pour une agriculture résiliente, capable de nourrir les générations futures tout en protégeant la planète.

L'agriculture traditionnelle est un ancien mode de vie humain, qui dépend des connaissances limitées de l'homme héritées de génération en génération, elle repose sur l'adaptation au climat et la nécessité de cultiver des plantes adaptées à la région, en utilisant des techniques moyennes ou limitées. L'agriculture traditionnelle utilise des outils rudimentaires comme les machettes, les haches et les animaux buveurs qui ne dépendent que de l'eau de pluie **Figure I.1.** Son but est souvent l'autoconsommation (agriculture alimentaire), qui n'est destinée qu'à répondre aux besoins individuels. Ils sont donc moins efficaces pour répondre aux besoins croissants de l'humanité [1].

Bien que l'agriculture traditionnelle soit essentielle pour préserver l'environnement et la biodiversité, elle reste limitée aux estimations intuitives du climat. Par conséquent, ces informations s'avèrent insuffisantes pour permettre au fermier de prendre des décisions précises concernent sa culture, d'autant plus que la société contemporaine tend à atteindre l'autosuffisance avec le moindre effort et productivité élevée.



Figure I.1 : L'agriculture traditionnelle : Le recours aux outils manuels dans le travail agricole [20].

I.2-Les défis techniques et environnementaux de l'agriculture traditionnelle et son impact sur la sécurité alimentaire

L'agriculture traditionnelle est un modèle agricole fondé sur des méthodes intergénérationnelles, contribuant à la préservation de la biodiversité et de l'équilibre environnemental. Cependant, ces pratiques sont confrontées à de multiples défis qui limitent leur efficacité dans la réalisation de la sécurité alimentaire et du développement durable. Ces défis et leur impact sur le secteur agricole sont mis en évidence ci-dessous [2].

1. **Productivité limitée et difficulté d'atteindre la suffisance alimentaire :** En raison de leur dépendance à l'égard des techniques obsolètes et des ressources naturelles non améliorées, l'agriculture traditionnelle souffre d'une faible productivité des cultures par rapport aux systèmes agricoles modernes qui bénéficient d'engrais synthétiques et de semences génétiquement améliorées. Cette baisse de la production rend difficile la satisfaction de la demande croissante en denrées alimentaires, qui constitue un obstacle à l'autosuffisance dans de nombreuses régions.
2. **Faible dépendance à l'égard de la technologie agricole** : L'agriculture traditionnelle continue de dépendre fortement des outils à main et des méthodes primitives, ce qui accroît le besoin d'efforts humains intensifs et rend les processus agricoles plus longs. En comparaison, les technologies modernes telles que la mécanisation agricole et les systèmes d'irrigation avancés contribuent à améliorer l'efficacité et à réduire le gaspillage des ressources.
3. **Faible capacité à lutter contre les maladies et les ravageurs:** En raison du manque de moyens modernes de diagnostic et de traitement, l'agriculture traditionnelle a des difficultés à faire face aux maladies des plantes et aux parasites agricoles. L'absence de stratégies avancées pour lutter contre ces problèmes entraîne des pertes de production importantes, affectant négativement la stabilité des chaînes d'approvisionnement alimentaire.
4. **Mauvaise gestion des ressources naturelles,** en particulier de l'eau et du sol Les systèmes agricoles traditionnels reposent souvent sur des méthodes d'irrigation inefficaces, qui épuisent les ressources en eau et augmentent la salinité du sol. La surexploitation des terres agricoles sans pratiques agricoles durables dégrade la fertilité agricole, réduisant la production agricole à long terme.
5. **Vulnérabilité importante aux changements climatiques :** En raison de leur dépendance vis-à-vis des conditions environnementales naturelles, l'agriculture traditionnelle est plus vulnérable aux changements climatiques soudains tels que la

sécheresse, les inondations et la hausse des températures. Contrairement à l'agriculture moderne, qui bénéficie des systèmes de prévision du climat et des technologies résistantes à la sécheresse, l'agriculture traditionnelle ne dispose pas de moyens efficaces pour s'adapter à ces changements.

6. **Risques potentiels pour la santé et l'environnement :** Certaines pratiques traditionnelles, comme l'utilisation d'engrais organiques non traités, peuvent entraîner des risques pour la santé en raison de la contamination potentielle des cultures par des bactéries nuisibles. L'absence de normes de contrôle strictes peut également accroître le risque de pollution environnementale, affectant la qualité des produits agricoles et la santé des consommateurs.

Bien que l'agriculture traditionnelle joue un rôle important dans le maintien de l'équilibre environnemental, les défis auxquels elle est confrontée exigent l'élaboration de nouvelles stratégies fondées sur l'innovation technologique et la gestion durable des ressources. Il est essentiel de promouvoir l'utilisation des technologies modernes dans le secteur agricole pour assurer la sécurité alimentaire et relever les défis environnementaux et climatiques à venir.

I.3-Les obstacles à l'agriculture en Algérie

L'agriculture en Algérie était la source de nourriture et de commission surtout, après la colonisation l'Algérie a suivi une politique de " La terre à celui qui la travaille ". Les terres ont été réorientées vers le développement agricole et reconverties des terres coloniales où des massacres étaient perpétrés en fermes pour assurer une sécurité alimentaire relative. Sa productivité en plus d'un soutien technologique quasi inexistant, Il a ensuite fait face au déplacement rural dû à la décimale noire, ce qui a conduit à la négligence des terres agricoles. Avec le 20éme siècle d'urbanisation atteignant 70%, avec une forte urbanisation, l'Algérie a subi une transformation spectaculaire du secteur agricole, car il est une source majeure de nourriture, ainsi que des défis climatiques et stratégiques.

L'Algérie a une superficie agricole arable de 8,5 millions au début du 20ème siècle, mais avec beaucoup de problèmes (appartements en pente ainsi que des problèmes de terrain) L'Algérie a un emplacement stratégique qui s'étend d'un climat méditerranéen à un climat désertique. En plus des problèmes liés à l'irrigation et à la sécheresse. Les problèmes matériels des agriculteurs en raison de la pénurie de produits, du coût accru du manque de soutien et de la négligence du secteur agricole [3].

Ci-dessous, vous trouverez quelques-uns des problèmes associés au climat :

1. **Températures extrêmes et vagues de gel** : L'augmentation des températures, accompagnée de vagues de chaleur, peut endommager les cultures, tandis que les vagues de gel tardives compromettent la croissance des plantes, voire provoquent leur destruction prématurée.
2. **Vents violents et tempêtes de sable** : Ces phénomènes météorologiques dévastateurs nuisent à la santé des sols et des cultures, entraînant une dégradation des terres et rendant l'agriculture encore plus difficile, particulièrement dans les zones arides et semi-arides.
3. **Inondations soudaines** : Ces événements extrêmes entraînent des pertes massives de récoltes, la contamination des ressources en eau potable et une érosion des sols, compromettant ainsi la sécurité alimentaire et la stabilité des écosystèmes.
4. **Sécheresse et pénurie d'eau** : La raréfaction des ressources en eau, exacerbée par des périodes de sécheresse prolongée, perturbe l'agriculture en limitant l'irrigation et met en péril l'approvisionnement en eau potable, affectant tant l'agriculture que les communautés humaines et animales.
5. **Gestion inadéquate des ressources en eau** : Une gestion inefficace des ressources hydriques aggrave les crises de sécheresse, exacerbant ainsi les tensions sur l'approvisionnement en eau et l'agriculture, et augmentant les risques de pénurie.
6. **Modifications des calendriers saisonniers** : Les variations des dates de début et de fin des saisons perturbent les cycles de culture, rendant certaines plantations plus vulnérables aux aléas climatiques imprévus, avec des conséquences directes sur les rendements agricoles.
7. **Augmentation des ravageurs et des maladies agricoles** : Les conditions climatiques plus chaudes et humides favorisent la prolifération de certains ravageurs et agents pathogènes, menaçant la productivité agricole et la sécurité alimentaire.

I.4-L'agriculture de précision

I.4.1-Définition et principe de base

Avec les défis mondiaux auxquels le secteur agricole est confronté aujourd'hui, il est devenu crucial de trouver des solutions novatrices pour assurer une meilleure efficacité et une durabilité accrue de la production agricole. Le secteur agricole est la pierre angulaire de la sécurité alimentaire et économique mondiale, mais l'agriculture traditionnelle fait face à de nombreux obstacles tels que des changements climatiques accélérés, une croissance démographique soutenue et une diminution des ressources naturelles, en particulier de l'eau. Dans cette situation, l'agriculture de précision est devenue l'une des principales solutions qui

reposent sur l'utilisation de technologies modernes pour faire face aux défis auxquels ce secteur vital est confronté.

L'agriculture de précision est une méthode moderne qui utilise des techniques contemporaines pour augmenter la productivité et fournir aux agriculteurs les moyens et les informations nécessaires pour économiser les efforts et le temps requis pour l'irrigation, l'enrichissement et même des problèmes qui pourraient menacer les cultures avec une perte minimale grâce à l'utilisation de techniques modernes telles que la télédétection, les drones, les capteurs de terrain, les systèmes de positionnement global (GPS), ainsi que l'intelligence artificielle. Ces outils permettent la collecte et l'analyse précise des données agricoles.

L'agriculture de précision repose principalement sur quatre principes, qui constituent la base de cette méthode d'élevage précise. Ces principes permettent d'améliorer l'utilisation des ressources, d'accroître la productivité et de réduire les impacts environnementaux négatifs. Avant la technologie moderne, passons en revue ces quatre principes [4] :

1. **Le bon endroit** : l'emplacement parfait : dans l'agriculture de précision est « au bon endroit », ce qui signifie que les cultures doivent être cultivées dans des endroits optimaux adaptés à leurs conditions de croissance. Grâce aux techniques de cartographie des champs, les agriculteurs sont en mesure de localiser les champs qui conviennent à une culture spécifique, ce qui réduit la nécessité d'utiliser des intrants supplémentaires tels que des engrais et des pesticides, contribuant ainsi à améliorer la productivité et à réduire le gaspillage. Pour déterminer le bon endroit, il faut bien comprendre les caractéristiques environnementales de chaque zone de la ferme
2. **Le bon moment** : est le « bon moment », qui exige de cultiver les cultures à des moments optimaux pour obtenir la meilleure productivité. Cette pratique comprend des techniques telles que la rotation des cultures ou les cultures compatibles avec chaque saison. En déterminant le moment idéal pour cultiver chaque culture en fonction des conditions climatiques et environnementales, les agriculteurs peuvent réduire les pertes et atteindre une plus grande durabilité de la production agricole.
3. **La bonne resource**:"La bonne ressource" fait référence à l'utilisation appropriée des ressources naturelles dans l'agriculture de précision. Certaines cultures nécessitent des conditions particulières en termes d'eau, d'engrais ou même de type de sol. Par conséquent, chaque culture doit être plantée là où elle a accès aux ressources nécessaires à son développement durable. Il s'agit aussi d'utiliser des intrants agricoles qui sont compatibles avec les conditions environnementales locales, contribuant ainsi à réduire les déchets et à minimiser les impacts négatifs sur l'environnement.

4. **La bonne quantité** : est le "dosage correct", c'est-à-dire l'utilisation de quantités appropriées d'intrants agricoles tels que les engrais et les pesticides, ainsi que la détermination des quantités correctes d'eau. Ce principe dépend de l'équilibre entre les nutriments naturels du sol et les additifs dont la culture a besoin pour améliorer sa croissance. Grâce à des techniques agricoles précises, les agriculteurs peuvent déterminer les quantités idéales à ajouter à chaque zone de la ferme, contribuant ainsi à améliorer la qualité des cultures et à réduire les pertes et les impacts environnementaux négatifs [5].

I.4.2-Les technologies utilisées dans l'agriculture de précision

L'agriculture de précision est une révolution dans le monde de l'agriculture qui a été évidente au 20 Emme siècle, lorsque les scientifiques ont utilisé des techniques contemporaines en agriculture pour aider les agriculteurs à améliorer leur efficacité de production en prédisant les besoins des cultures grâce à l'intelligence artificielle. Il s'agit d'une approche moderne basée sur la surveillance à distance avec des capteurs de transport vers l'unité d'analyse des données AI et puis des solutions mobiles droites et rationnelles qui favorisent les fermes et leurs cultures.

La technologie d'agriculture de précision est apparue dans les années 1980 aux États-Unis, avec le développement de premier système de positionnement GPS applique à l'agriculture, ici, je vais présenter quelques-unes de ces technologies qui ont contribué à l'avancement de l'agriculture :

1. **Drones :** Les drones agricoles sont un type d'avion autonome qui a révolutionné l'agriculture Fig1.2 et qui est apparu au milieu du 20e siècle comme des avions de guerre qui ont semblé être utilisés au début du 21e siècle dans l'agriculture de précision.

   Ces aéronefs sont dotés de technologies modernes d'aviation et de communication, et leurs avantages sont leur capacité à surveiller les terres agricoles, à pulvériser des pesticides et des engrais et à recueillir des données environnementales plus efficacement que les méthodes traditionnelles.

   - **Applications modernes des drones dans l'agriculture :** Amélioration de la productivité et réduction des coûts. Les drones agricoles offrent une large gamme d'applications qui révolutionnent le secteur de l'agriculture. Voici quelques-unes de leurs principales utilisations :



Figure I.2 : Utilisation de drones en 'agriculture : pulvérisation de précision et analyse des sols [21].

1. **Suivi et analyse** :
    - Suivi des terres agricoles et évaluation de l'état des cultures.
    - Utilisation de caméras et capteurs pour capturer des images aériennes et analyser les données.
    - Surveillance des maladies, des insectes et des carences nutritionnelles dans le sol.
2. **Pulvérisation agricole** :
    - Pulvérisation précise et efficace des engrais et pesticides.
    - Programmation des aéronefs pour ajuster l'altitude et la quantité nécessaire.
    - Réduction du gaspillage de matériaux et gain de temps.
3. **Agriculture de précision** :
    - Collecte et analyse de données sur le terrain.
    - Prise de décisions précises sur l'irrigation, le compostage et la bio-régulation.
    - Amélioration de la productivité et réduction des coûts.
4. **Planification des cultures** :
    - Collecte de données sur la répartition des cultures.
    - Aide à la prise de décisions sur les méthodes agricoles optimales.
5. **Irrigation intelligente** :
    - Utilisation de capteurs pour mesurer l'humidité du sol.
    - Détermination des moments optimaux pour l'irrigation.

Les drones agricoles représentent ainsi un atout majeur pour les agriculteurs, permettant une gestion plus précise et durable des ressources tout en augmentant les rendements

2. **Les capteurs intelligents du sol :** sont un groupe de capteurs qui recueillent et analysent une gamme de facteurs environnementaux qui influent sur la croissance des cultures. Ces facteurs comprennent le niveau d'humidité, la température, le niveau de salinité et le pH, ainsi que certains autres indicateurs chimiques qui reflètent la fertilité du sol et l'état physique.
3. **Les stations météorologiques :** L'agriculture moderne intègre de nouvelles technologies visant à optimiser la production et à améliorer les rendements agricoles. Parmi ces innovations, les stations climatiques jouent un rôle essentiel en permettant de prévoir les conditions météorologiques. Ces dispositifs sont constitués d'un ensemble de capteurs capables de mesurer divers paramètres climatiques, tels que la température, l'humidité et la vitesse du vent, sur des périodes de court et de long terme. Ces données sont cruciales pour déterminer les périodes optimales de semis, d'irrigation, de fertilisation et même de récolte, garantissant ainsi une gestion agricole plus efficace et durable.

I.5-Les stations météorologiques

I.5.1-Historique sur les stations météorologiques

Les stations météorologiques ont connu une évolution remarquable depuis leurs premières formes rudimentaires jusqu'aux infrastructures sophistiquées du 21e siècle. Avant le 19e siècle, les observations météorologiques reposent principalement sur des instruments simples mais révolutionnaires pour l'époque, tels que le baromètre inventé par Evangelista Torricelli en 1643, l'anémomètre conçu par Robert Hooke en 1667, et le thermomètre de Galilée datant de 1592. Ces outils permettaient de mesurer respectivement la pression atmosphérique, la vitesse du vent et la température, offrant ainsi les premières bases scientifiques pour l'étude du climat. Au 19e siècle, l'émergence de réseaux organisés comme la Société Météorologique de France en 1852 et l'Organisation Météorologique Internationale en 1854 a marqué une étape cruciale. Ces institutions ont standardisé les méthodes d'observation et facilité l'échange d'informations entre stations. Le 20e siècle a été le théâtre d'avancées technologiques majeures avec l'apparition des radars météorologiques, des radiosondes et des premiers satellites comme TIROS-1 en 1960, permettant une surveillance accrue de l'atmosphère. L'automatisation des stations dans les années 1980-1990 a également transformé le paysage météorologique en rendant les relevés plus fréquents et précis. Au 21e siècle, les stations connectées dotées de capteurs électroniques sophistiqués et capables de transmettre des données en temps réel sont devenues la norme. L'intégration de ces données dans des réseaux mondiaux comme ceux de l'OMM et l'utilisation de technologies avancées telles que l'intelligence artificielle permettent

aujourd'hui des prévisions météorologiques d'une précision sans précédent, jouant un rôle essentiel dans l'anticipation des phénomènes climatiques extrêmes[6].

I.5.2-Les types des stations météorologiques

I.5.2.1-Stations météorologiques analogiques

Les stations météorologiques analogiques sont des dispositifs traditionnels qui utilisent des mécanismes physiques ou mécaniques pour mesurer les conditions atmosphériques. Elles incluent souvent **Figure I. 3 :**

1. **Thermomètre** : un tube gradué contenant du mercure ou de l'alcool pour indiquer la température.
2. **Baromètre** : un cadran avec une aiguille pour mesurer la pression atmosphérique.
3. **Hygromètre** : un appareil mesurant l'humidité, utilisant parfois des matériaux naturels sensibles comme des cheveux.
4. **Pluviomètre** : un récipient gradué permettant de recueillir et de mesurer les précipitations.

Caractéristiques principales :

1. Simples à utiliser, elles fonctionnent sans électricité ni piles.
2. Robustes grâce à leur conception mécanique.
3. Appréciées pour leur aspect rétro et souvent utilisées comme objets décoratifs.



Figure I.3 : Station météorologique analogique [6].

I.5.2.2-Stations météorologiques numériques

Les stations météorologiques numériques, quant à elles, s'appuient sur des capteurs électroniques et des systèmes informatiques pour collecter et afficher les données météorologiques Figure I. 4. En plus de mesurer la température, la pression et l'humidité, elles intègrent fréquemment des fonctions supplémentaires :

1. **Anémomètre** : pour évaluer la vitesse du vent.
2. **Girouette** : pour déterminer la direction du vent.
3. **Capteurs avancés** : pour une collecte rapide et précise des informations.

Caractéristiques principales :

1. Offrent une grande précision grâce à l'électronique.
2. Permettent de sauvegarder et d'analyser les données sur la durée.
3. Proposent souvent une transmission sans fil, avec des données accessibles via un écran ou une application.

Capables d'élaborer des prévisions météo en combinant des données locales avec des informations externes [7].



Figure I.4: Station météorologique numérique [22].

I.5.3-Les facteurs climatiques et instruments de mesure météorologiques

Dans l'agriculture, attention à la plante si elle ne suffit pas, vous n'obtiendrez pas votre fruit. Autant que vous pouvez récolter votre produit. Mais l'attention doit porter sur un ensemble de facteurs clés. Si l'agriculteur ne le sait pas, l'effort peut être important. Il peut même nuire à sa plante et à la nature. Par conséquent, avant de commencer une activité, toute activité doit connaître les mesures suivantes :

1. Chaleur au milieu.
2. Humidité de l'air.
3. Rayonnement solaire.
4. Vitesse et direction du vent.
5. Pression atmosphérique.
6. Chute de pluie.

I.5.3.1-Température

La chaleur est l'élément le plus important de la météorologie par lequel tout travail de la vie est effectué en général et agricole. Les températures varient en raison de nombreux facteurs, notamment :

1. Se relever du niveau de la mer
2. Pression atmosphérique
3. Processus de rayonnement d'activité humaine
4. Végétation et courants marins

Température mesurée en degrés °C, De 0 à 100, de la congélation à l'évaporation selon l'échelle la plus ancienne, On utilise également le fahrenheit °F aux États-Unis pour donner des différences significatives de basses températures par rapport à l'échelle en pourcentage

$$F = (°C * 9/5) + 32 \qquad \textbf{I.1}$$

Kelvin est l'unité principale dans l'adhésion internationale SI pour la mesure de température. Aucun résultat négatif n'est utilisé pour les mesures physiques et précises

$$K = °C + 273. \qquad \textbf{I.2}$$

La mesure de la température nous permet de comprendre la dynamique de l'énergie ainsi que les processus physiques et environnementaux, ce qui favorise l'efficacité et l'innovation dans la recherche. Les instruments de mesure standards se divisent principalement en deux catégories : les thermomètres et les capteurs thermiques. Les thermomètres, en tant qu'instruments classiques, ont établi les fondements de la mesure thermique à travers les âges grâce à leur facilité d'utilisation et leur fiabilité dans les mesures générales.

La mesure de la température nous permet de comprendre la dynamique de l'énergie ainsi que les processus physiques et environnementaux, ce qui favorise l'efficacité et l'innovation dans la recherche. Les instruments de mesure standards se divisent principalement en deux catégories : les thermomètres et les capteurs thermiques. Les thermomètres, en tant qu'instruments classiques, ont établi les fondements de la mesure thermique à travers les âges grâce à leur facilité d'utilisation et leur fiabilité dans les mesures générales.



Figure I.5: thermomètre classique [23].

Les capteurs thermiques font partie des innovations thermiques dans les techniques de mesure modernes où ils assurent une sensibilité élevée qui assure la détection des changements les plus précis lorsqu'ils s'appuient sur les principes d'un changement de résistance électrique

ou la génération de tension électrique qui a évolué avec la nanotechnologie, ce qui a amélioré leurs performances et leur vitesse de réponse. L'IA a contribué à promouvoir le traitement des données et les changements de température pour les signaux électriques qui peuvent être traités et utilisés dans plusieurs domaines et prendre des mesures préventives telles que les maisons pour ajuster le chauffage et le refroidissement avec le protocole ZGBEE pour connecter les informations aux maisons en plastique, Les capteurs favorisent ainsi l'innovation dans divers domaines.

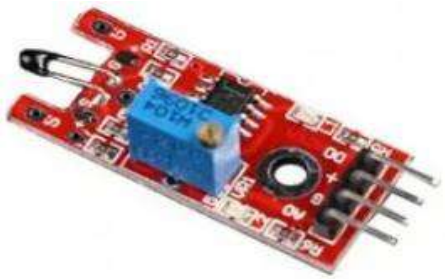


Figure I.6 : Module capteur de température CTN double sortie [24].

I.5.3.2-L'humidité

L'humidité fait référence à la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air, et il existe plusieurs manières de l'exprimer, les plus importantes étant : l'humidité relative, l'humidité absolue et le point de rosée. Comprendre ces types d'humidité aide grandement l'agriculteur à gérer ses ressources efficacement, en lui permettant d'évaluer les conditions météorologiques et les besoins en irrigation des plantes avec précision. De plus, cela l'aide à déterminer le moment approprié pour la fertilisation, améliorant ainsi la productivité tout en réduisant le gaspillage de ressources, l'humidité est mesurée selon la manière dont elle est exprimée: L'humidité relative : elle représente le rapport entre la quantité de vapeur d'eau présente dans l'air et la quantité maximale que l'air peut contenir à la même température, exprimée en pourcentage (%), L'humidité absolue : elle désigne la masse de vapeur d'eau contenue dans un volume donné d'air, exprimée en grammes par mètre cube (g/m^3) , Le point de rosée : c'est la température à laquelle la vapeur d'eau commence à se condenser pour former de la rosée, exprimée en degrés Celsius (°C) ou Fahrenheit (°F).

Les méthodes de mesure de l'humidité varient entre le passé et le présent. Autrefois, l'agriculteur primitif utilisait des outils simples pour mesurer l'humidité, tels que :
L'hygromètre à cheveux, l'hygromètre à thermomètre double et le mesureur du point de rosée. Aujourd'hui, la technologie moderne offre des capteurs plus précis, faciles à intégrer dans les systèmes électroniques et capables de fournir des mesures instantanées.

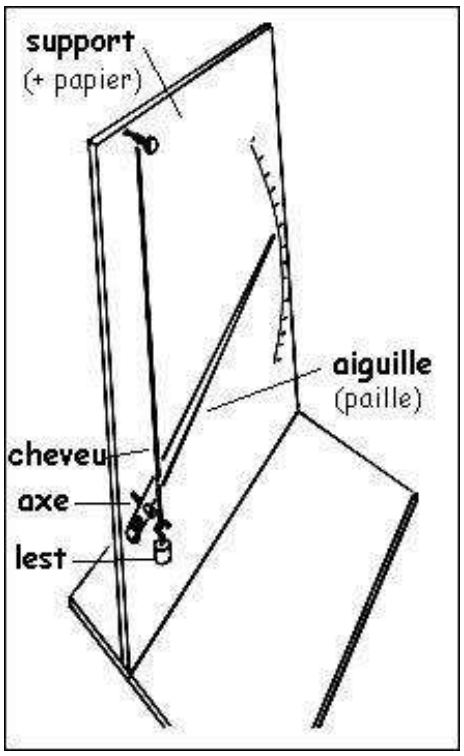


Figure I.7 : l'hygromètre à cheveux [25].

I.5.3.3-Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue la principale source externe d'énergie atteignant l'atmosphère, émis par le Soleil sous forme de rayonnements électromagnétiques se propageant à la vitesse de la lumière c. Il lui faut en moyenne 499 secondes, soit 8 minutes et 19 secondes, pour parvenir jusqu'à l'atmosphère terrestre.

Au niveau du sol, le "pyrhéliomètre" est utilisé pour mesurer le rayonnement solaire direct. Cet instrument, constamment orienté vers le Soleil, capte uniquement le rayonnement provenant du disque solaire. L'énergie reçue est absorbée par une surface noire, et l'écart de température entre cette surface et le corps de l'instrument est proportionnel à l'éclairement énergétique du rayonnement direct.

Pour évaluer la répartition spectrale du rayonnement solaire, on recourt au **spectro radiomètre**, qui permet de déterminer avec précision la densité spectrale de l'éclairement énergétique [9].

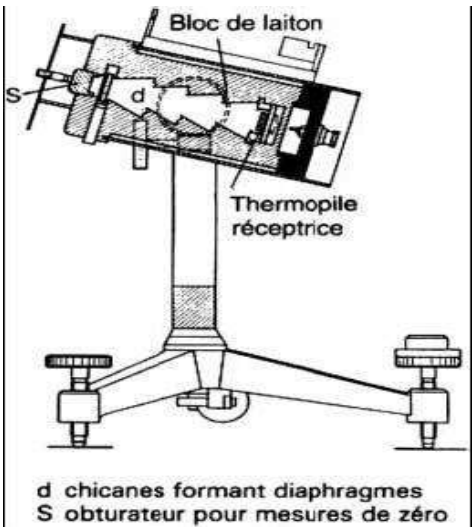


Figure I.5 : mesure de rayonnement par pyrhéliomètre [26].

I.5.3.4-Vitesse et direction du vent

En météorologie, le vent correspond au déplacement horizontal de l'air et se caractérise principalement par deux paramètres **:** la direction et la vitesse. Les méthodes classiques reposent sur des systèmes mécanique-électriques qui ont posé les bases de l'évolution des anémomètres. Dans les stations traditionnelles, la direction est mesurée via une girouette (Wind Vane) connectée à un moteur synchrone convertissant le mouvement angulaire en un signal électrique reflétant les degrés (0°–360°), tandis que la vitesse est déterminée à l'aide d'un anémomètre à coupelles (Cup Anémomètre), où trois coupelles hémisphériques tournent sous l'effet du vent, générant une tension électrique proportionnelle à sa vitesse. Les données sont transmises à des cadrans gradués pour un affichage instantané. Cependant, ces systèmes nécessitent une maintenance régulière en raison de leur complexité mécanique et de leur sensibilité aux facteurs météorologiques comme le gel ou la poussière. Bien que relativement précis, ils restent limités dans la mesure des flux turbulents ou des conditions extrêmes.



Figure I.6 : CUP- anémomètre [27].

Avec l'évolution technologique, les méthodes modern es ont dépassé les contraintes de la mécanique, s'appuyant sur une physique avancée et des techniques électroniques de précision. Les anémomètres soniques (Sonique Anémomètres) en sont l'exemple le plus

marquant : ils utilisent des ondes ultrasonores émises entre des paires d'émetteurs et de récepteurs dans des directions orthogonales, mesurant le décalage Doppler ou la variation du temps de propagation du son, fournissant ainsi des données tridimensionnelles du vent avec une précision atteignant 0,01 m/s. Les lidars (Lidar) traquent quant à eux le mouvement des particules dans l'atmosphère via des impulsions laser, tandis que les anémomètres à fil chaud (Hot-Wire) reposent sur le refroidissement d'un fil de platine ultrafin pour mesurer la vitesse via les changements de résistance électrique. Ces technologies contribuent à des applications vitales, comme l'optimisation de l'efficacité des éoliennes, la surveillance des changements climatiques ou l'amélioration de la précision des modèles numériques de prévision météorologique. Les méthodes modernes se distinguent par leur flexibilité et leur capacité à s'intégrer aux systèmes d'intelligence artificielle, en faisant un pilier pour des décisions proactives dans les domaines de la sécurité aérienne ou des énergies renouvelables, tandis que les méthodes classiques conservent une valeur historique et pratique dans des contextes low-cost ou simplifiés.

Cette interdépendance entre classique et moderne reflète l'évolution des sciences appliquées, où les innovations s'appuient sur des savoirs traditionnels tout en repoussant les limites de la précision et de l'efficacité.

I.5.3.5-Précipitations

Les agriculteurs de l'Antiquité s'appuyaient sur une méthodologie instinctive pour organiser l'irrigation, basée sur des données environnementales naturelles telles que les schémas de précipitations et les flux saisonniers des cours d'eau dans les rivières et les ruisseaux. En l'absence de technologies modernes, ils évaluaient les besoins hydriques des cultures en observant les cycles annuels de pluie et la montée des niveaux des fleuves, considérés comme des indicateurs vitaux pour déterminer le calendrier des semis et la quantité d'eau allouée à chaque culture. Par exemple, dans les civilisations de la vallée du Nil ou de la Mésopotamie, l'agriculture était étroitement liée aux crues fluviales, où des canaux en terre et des barrages primitifs étaient utilisés pour distribuer l'eau aux champs. Malgré la simplicité de ces méthodes, elles ont permis pendant des siècles de maintenir un équilibre entre des ressources en eau limitées et les exigences agricoles, reflétant ainsi une sagesse environnementale précoce dans la gestion des ressources sans gaspillage.

Les précipitations peuvent être mesurées à l'aide d'un pluviomètre, un instrument spécialement conçu pour quantifier la quantité d'eau tombée sur une surface donnée pendant une période déterminée. Le pluviomètre traditionnel se compose d'un cylindre ou d'un entonnoir qui recueille l'eau de pluie, relié à un tube gradué permettant une lecture précise de la quantité

de précipitations en millimètres. Cette mesure représente la hauteur de la couche d'eau qui aurait couvert uniformément le sol en l'absence d'infiltration ou de ruissellement.

En outre, il existe des types plus avancés, tels que le pluviomètre à augetsbasculants (TippingBucket Rain Gauge), qui utilise un système de petits récipients basculants. Lorsqu'un des augets se remplit d'une quantité prédéfinie d'eau, il bascule et se vide, générant ainsi un signal électrique. Ce signal est utilisé pour calculer avec précision la quantité de précipitations et l'enregistrer électroniquement.

De plus, les capteurs de pluie électroniques basés sur la mesure des variations de conductivité électrique ou d'absorption de l'eau sont également couramment utilisés. Ces capteurs offrent des données précises et en temps réel sur le taux et l'intensité des précipitations, rendant leur utilisation particulièrement adaptée aux systèmes modernes de surveillance climatique. Ils contribuent ainsi à améliorer la précision des prévisions météorologiques et la gestion efficace des ressources en eau.

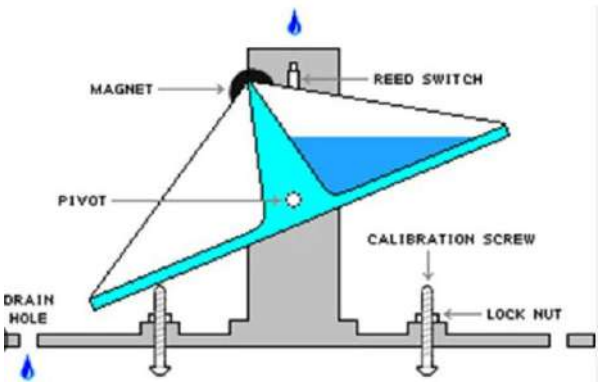


Figure I.7 Pluviomètre à auget basculant [28].

I.5.3.6-La pression atmosphérique

La pression atmosphérique est définie comme la force exercée par une colonne d'air s'étendant de la surface terrestre jusqu'à l'extérieur de l'atmosphère sur une unité de surface. Elle est mesurée à l'aide d'un baromètre à mercure ou métallique et s'exprime en hectopascals (hPa), avec une valeur moyenne d'environ 1013 hPa au niveau de la mer.

La mesure de la pression atmosphérique joue un rôle fondamental dans la prévision des tempêtes et des changements météorologiques soudains, ce qui en fait un élément essentiel des études climatiques et des applications agricoles. Dans le domaine de l'agriculture de précision, la gestion efficace des cultures repose sur l'acquisition de données climatiques en temps réel et fiables. En combinant la pression atmosphérique avec d'autres variables telles que la température, l'humidité et le rayonnement solaire, il devient possible d'améliorer la capacité

des agriculteurs à anticiper les variations climatiques et à prendre les mesures préventives nécessaires.

L'utilisation de capteurs précis pour collecter et analyser ces données permet aux agriculteurs de prendre des décisions éclairées, réduisant ainsi les risques climatiques et optimisant le rendement des cultures. Par conséquent, l'intégration des technologies de capteurs modernes dans les systèmes de surveillance climatique améliore l'efficacité de l'agriculture et contribue au développement de stratégies d'adaptation plus durables face aux changements météorologiques.

I.6-le rôle des stations météorologiques dans l'agriculture

I.6.1 La relation entre les facteurs climatiques et les activités quotidiennes

Les stations météorologiques fournissent des données précises et durables qui constituent une base essentielle pour la gestion efficace des activités agricoles quotidiennes telles que l'irrigation, la fertilisation, la récolte et les semis**.** De plus, ces informations facilitent la planification à long terme en aidant les agriculteurs à choisir les cultures les plus adaptées aux conditions climatiques locales**,** ce qui améliore la productivité et réduit les pertes. Par ailleurs, ces données contribuent à limiter les risques climatiques et à s'adapter aux changements climatiques**,** renforçant ainsi la sécurité alimentaire et le développement durable.

Les précipitations, la température et d'autres facteurs climatiques jouent un rôle essentiel dans la vie des plantes, avec des effets à la fois positifs et négatifs. Comprendre ces influences permet à l'agriculteur de prendre des mesures préventives pour protéger ses cultures, garantir une production optimale et minimiser les risques liés aux conditions climatiques défavorables.

I.6.1.1-Influence de la température sur les activités agricoles

1. **Conditions optimales :**
    - Température idéale : **15–30°C** (varie selon les cultures).
    - Température inadéquate : en dessous de **10°C** ou au-dessus de **35°C**.
2. **Activités concernées :**
    - **Irrigation :** Éviter d'arroser avec de l'eau froide (<10°C) pour prévenir le choc thermique des racines. De même, il est recommandé d'éviter l'irrigation en période de forte chaleur pour limiter l'évaporation.
    - **Fertilisation :** Moins efficace par forte chaleur car l'absorption des nutriments est réduite.

I.6.1.2-Effet de l'humidité sur les activités agricoles

1. **Niveaux recommandés :**
   - Humidité optimale : **50–70%** pour la majorité des cultures, jusqu'à **85%** pour le riz.
   - Niveaux excessifs : au-dessus de **90%** augmentent les risques de maladies fongiques.
2. **Activités concernées :**
   - Irrigation : Intensifier l'arrosage en cas d'humidité faible pour prévenir le dessèchement.
   - Fertilisation : Utiliser des fongicides en cas d'humidité élevée pour limiter les risques de maladies.

I.6.1.3-Impact du vent sur les activités agricoles

1. **Vitesse appropriée :**
   - Idéale : **5–15 km/h** (facilite la ventilation et la pollinisation).
   - Néfaste : au-delà de **30 km/h**, le vent peut casser les tiges et accélérer l'évaporation.
2. **Activités concernées :**
   - Fertilisation : À éviter par vents forts car les engrais risquent d'être dispersés.
   - Protection : Installer des brise-vents pour protéger les cultures sensibles.

I.6.1.4-Influence du rayonnement solaire sur les cultures :

1. **Intensité recommandée :**
   - Entre **600–800 W/m²** pour les cultures comme les tomates.
   - Intensité excessive : plus de **50 000 lux** ou un **indice UV supérieur à 8**.
2. **Activités concernées :**
   - Irrigation : À éviter durant les heures de fort ensoleillement pour minimiser l'évaporation rapide.
   - Fertilisation : À réaliser tôt le matin ou en fin d'après-midi en cas de rayonnement intense.
   - Protection : Utiliser des filets d'ombrage ou des couvertures pour protéger les plantes sensibles.

I.6.1.5-Rôle des précipitations dans les activités agricoles :

1. **Besoins en eau selon les cultures :**
   - Entre **500–900 mm/an** pour des cultures comme le blé et le maïs.
   - Quantités excessives : au-delà de **2000 mm/an** peuvent provoquer des inondations et des maladies.

2. **Activités concernées :**
    - **Irrigation :** Ajuster ou suspendre l'irrigation en cas de précipitations suffisantes.
    - **Fertilisation :** Ne pas fertiliser juste avant de fortes pluies pour éviter le lessivage des engrais.

I.6.1.6-Recommandations pour l'utilisation de la station météorologique

1. **Capteurs nécessaires :**
    - Température et humidité : pour optimiser l'irrigation et la fertilisation.
    - Rayonnement solaire : utilisation de photodiodes pour mesurer l'intensité lumineuse.
    - Vitesse du vent : pour planifier les activités agricoles et protéger les cultures.
2. **Gestion des données :**
    - Analyser les données en temps réel pour déterminer les moments propices à l'irrigation et à la fertilisation.
    - Envoyer des alertes automatiques aux agriculteurs en cas de conditions défavorables

3. **Exemple d'équilibre des facteurs pour la culture de la tomate**

Tableaux I.1 : Équilibre des facteurs pour la culture de la tomate [29].

Facteur	Recommandation
Humidité	60–70%
Rayonnement solaire	8–10 heures par jour
Eau d'irrigation	500–800 mm/saison
Température	20–30°C (jour)
Vitesse du vent	<20 km/h

4. **Assurer un équilibre entre les facteurs climatiques et les activités agricoles**
    - La surveillance continue des facteurs climatiques permet de réduire les pertes et d'augmenter les rendements agricoles.
    - L'intégration d'une station météorologique connectée offre aux agriculteurs des données précises pour une gestion plus efficace des cultures.

I.7-Conclusion

Il apparaît clairement que l'agriculture traditionnelle, bien que essentielle à la préservation de la biodiversité, est confrontée à des obstacles majeurs. Ces défis ont progressivement conduit à son remplacement par des solutions innovantes comme l'agriculture de précision et les pratiques modernes, qui se révèlent indispensables pour garantir la sécurité alimentaire dans un contexte de changements climatiques accélérés. L'étude du cas algérien met en lumière les défis structurels (pénurie d'eau, exode rural, dégradation des sols) qui renforcent la nécessité d'adopter des technologies d'agriculture de précision. En intégrant l'intelligence artificielle et les outils numériques, les agriculteurs peuvent optimiser leurs décisions, économiser du temps et des efforts, et réduire le gaspillage des ressources naturelles. Cette transition vers des modèles agricoles intelligents et durables est non seulement une réponse aux crises actuelles, mais aussi une stratégie clé pour construire un avenir résilient, où productivité rime avec préservation de l'environnement, ces résultats soulignent l'importance des stations météorologiques pour fournir des données climatiques immédiates, ce qui Contribue à améliorer la gestion de l'irrigation et la lutte contre les ravageurs. À l'avenir, il est essentiel de renforcer la coopération entre les gouvernements, les agriculteurs et les chercheurs pour intégrer ces technologies de manière globale, ouvrant de nouvelles perspectives pour une agriculture durable capable de relever les défis du 20ème siècle.

Chapitre II

Conception de la station météorologique

II.1-Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les étapes de conception du système embarqué utilisé pour la réalisation d'une station météorologique intelligente destinée à l'appui du secteur agricole. Ce projet vise à proposer une solution technologique innovante permettant de suivre avec précision et en temps réel les conditions climatiques, grâce à l'intégration de capteurs environnementaux et de modules de communication sans fil.

Les données météorologiques représentent un élément clé de l'agriculture de précision, car elles permettent d'améliorer la prise de décision, d'optimiser l'utilisation des ressources et d'augmenter les rendements. Pour atteindre ces objectifs, un système embarqué fiable et performant a été développé, reposant sur des microcontrôleurs et des composants adaptés aux contraintes du milieu agricole. Ce chapitre mettra en évidence les différentes étapes de développement du système, en abordant les choix technologiques retenus, les composants matériels utilisés, ainsi que les méthodes d'intégration.

II.2-Principe de fonctionnement des stations météorologiques connectées

Les stations météorologiques sont une technologie IOT qui transmet des données mesurées par des capteurs sensibles [chaleur, humidité, pression, chute, direction et vitesse du vent] avec précision, traitées et envoyées automatiquement pour des applications accessibles avec plusieurs protocoles GSM/GPRS qui sont constamment mis à jour et stockés dans site .

Après la définition générale des stations météorologiques connectées, voici quelques raisons qui expliquent pourquoi elles représentent une révolution dans le domaine de l'agriculture de précision :

1. La précision des mesures : grâce aux capteurs de haute sensibilité qui offrent une marge d'erreur très faible, ce qui permet une grande fiabilité des données. Par exemple, les capteurs de température peuvent mesurer des valeurs allant jusqu'à -40°C ou -50°C, couvrant ainsi une large plage de variations climatiques.
2. Les données sont transmises à l'agriculteur via plusieurs technologies telles que le Wi-Fi, les réseaux GPRS/GSM,
3. Ces données sont envoyées directement sur son Smartphone ou son ordinateur, ce qui lui permet de consulter à distance les conditions météorologiques de ses champs. Cela facilite la prise de décisions agricoles précises et opportunes, sans qu'il soit nécessaire d'être physiquement présent sur le terrain.
4. La mise à jour des données doit être automatique en envoyant des informations synchronisées.

5. Le système de traitement stocke les informations périodiquement pendant une période déterminée, permettant ainsi à l'agriculteur d'y accéder et de les utiliser ultérieurement. En l'absence de données climatiques suffisantes ou en cas de perte de connectivité en temps réel, le système enregistre automatiquement les informations collectées dans une base de données locale. Cette dernière constitue une source d'historique consultable à tout moment par l'agriculteur, lui permettant ainsi d'analyser les conditions environnementales passées, de suivre les tendances météorologiques et d'optimiser ses décisions agricoles en conséquence.
6. Ces stations sont compatibles avec les appareils intelligents et permettent un accès facile aux informations.

II.3-Système embarqué

Les systèmes embarqués constituent une partie importante des domaines de l'informatique et de la programmation, car ils sont spécialement conçus pour exécuter des tâches spécifiques au sein d'appareils particuliers, souvent dotés d'une conception unique ou reposant sur une architecture sur mesure. Ces systèmes reposent sur l'intégration de composants matériels (Hardware) tels que les microcontrôleurs, avec des logiciels (Software) qui contrôlent le comportement du système et exécutent les instructions.
Les systèmes embarqués se caractérisent par leur indépendance et leur intégration, car ils sont dédiés à l'exécution de tâches précises dans des appareils spécifiques. Ces dispositifs sont souvent uniques et orientés vers des applications particulières. Parmi les domaines d'application des systèmes embarqués, on trouve l'industrie, la médecine et l'agriculture, où ils sont utilisés pour un contrôle précis et un traitement instantané des données.
Parmi les plateformes éducatives et open source utilisée pour développer ces systèmes, la plateforme Arduino se distingue, offrant de petites unités de contrôle comme l'Arduino Uno, Mega et Nano et esp32 esp8266. Ces unités sont programmées à l'aide d'un environnement de développement facile à utiliser appelé Arduino IDE, qui est considérée comme l'un des outils les plus importants pour le développement de logiciels destinés aux systèmes embarqués [12].

II.3.1-Les type des systèmes embarquant

Les systèmes embarqués sont utilisés pour accomplir des tâches à haute précision. Voici les types de systèmes embarqués et leurs applications [18].

1. **Système embarqué autonome :** Les systèmes capables de fonctionner sans dépendance à un système de contrôle externe ou à une connexion réseau sont utilisés dans des dispositifs à tâches automatiques, tels que les imprimantes, les régulateurs de vitesse dans les voitures.

2. **Les systèmes temps réel :** doivent être capables de produire des résultats dans un délai précis. Ces systèmes varient en fonction du type de travail. Par exemple, il existe des systèmes embarqués stricts, où tout retard peut entraîner des pertes, comme les systèmes d'airbags dans les voitures. Il existe également des systèmes souples, comme ceux utilisés pour la synchronisation de la vidéo et du son, qui tolèrent certains retards.
3. **Réseau et communication :** Ils se connectent à des réseaux filaires ou sans fil dans un système de transmission et d'échange de données, utilisés dans les appareils IoT.
4. **traitement du signal :** Utilisé pour l'analyse et le traitement de grandes quantités de données, dans les applications militaires.
5. **Les systèmes embarqués mobiles :** ou relevant de la nano technologie, sont utilisés dans les appareils portables en raison de leur petite taille et de leur grande efficacité. Ils sont intégrés dans des dispositifs intelligents tels que les téléphones mobiles et les systèmes de géolocalisation (GPS). Grâce à leur compacité, ils sont parfaitement adaptés aux appareils multifonctions destinés à un usage mobile.

II.2.2-Architecture générale

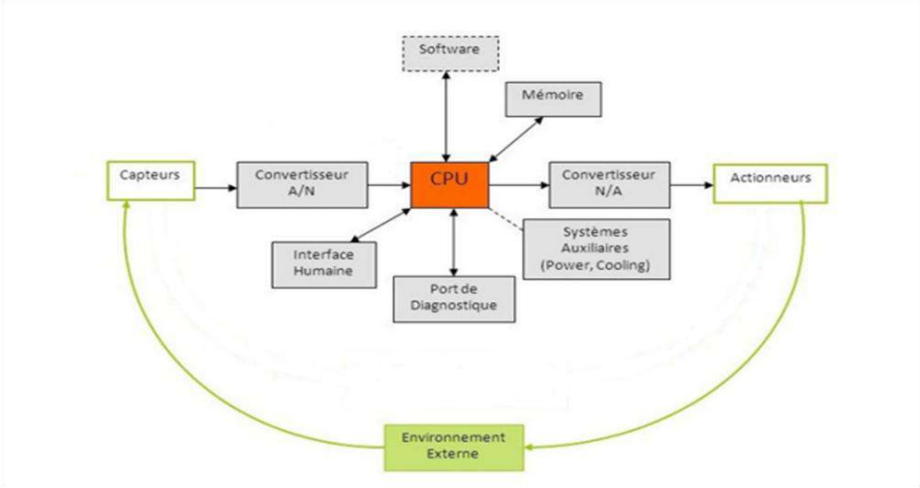


Figure II.1 : Architecture générale d'un système embarqué [19].

II.4-Le Microcontrôleur

Le microcontrôleur joue un rôle central dans le fonctionnement de la station météo connectée. Il reçoit les données brutes provenant des capteurs, les traites et les convertit en informations compréhensibles. Ensuite, il les transmet via différentes technologies de communication telles que le Wifi, le Bluetooth, le GSM ou encore à l'aide d'une carte SIM, comme c'est le cas avec l'ESP 32 qui intègre plusieurs de ces fonctionnalités.

II.4.1-Structure interne d'un microcontrôleur

Un microcontrôleur est un circuit intégré qui combine un processeur, de la mémoire et des interfaces d'entrées/sorties (E/S) pour gérer des tâches spécifiques dans des applications embarquées. Le microcontrôleur utilise divers composants pour réaliser des opérations

complexes. Réaliser diverses tâches effectuer le traitement de données, assurer la communication avec d'autres systèmes (capteurs, actionneurs, microcontrôleurs, modules de communication sans fil, etc.), et piloter des dispositifs externes Figure **II**.2.

Parmi ces composants, on peut citer notamment [13] :

1. Des oscillateurs pour gérer les fréquences de travail des composants.
2. ADC/DAC (Convertisseur Analogique/Numérique).
3. Mémoires RAM et ROM pour stocker les programmes et les informations de microcontrôleur qui utilise.
4. Des ports I/O pour la connexion avec les composants extérieurs.
5. Timers(Temporisateurs)/Counters (Compteurs) pour créer délai de programme et bouclées les opérations.
6. Microprocesseur (CPU) c'est le cerveau de microcontrôleur prendre des décisions, exécuter les programmes, et effectué les calculs.
7. UART, USART, SPI, I2C et USB : sont des protocoles de communication qui permettent aux microcontrôleurs d'interagir avec divers appareils. Ces protocoles facilitent l'échange de données entre le microcontrôleur et d'autres composants ou périphériques, assurant ainsi une communication efficace dans les systèmes embarqués.
   • UART/USART : Permet l'envoi et la réception de données en série.
   • SPI et I2C : Facilitent la connexion de plusieurs périphériques entre eux.
   • USB : Utilisé pour relier des dispositifs tels que des claviers ou des souris.
8. PWM (Pulse Width Modulation) : est une méthode qui permet de réguler la vitesse des moteurs ou l'intensité lumineuse des LED en ajustant la durée pendant laquelle un signal électrique est actif.

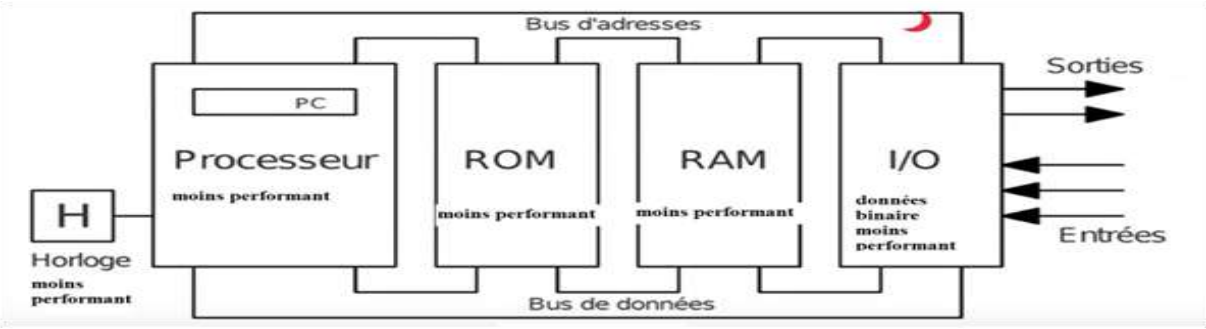


Figure II.2 les éléments principaux d'un microcontrôleur [30].

Il existe de nombreux modèles de microcontrôleurs. En effet, chaque fabricant doit vendre plusieurs familles et chaque famille compte des centaines de modèles. Par exemple, nous avons les microcontrôleurs à 6 pattes et plus, comme représenté dans la Figure II.3

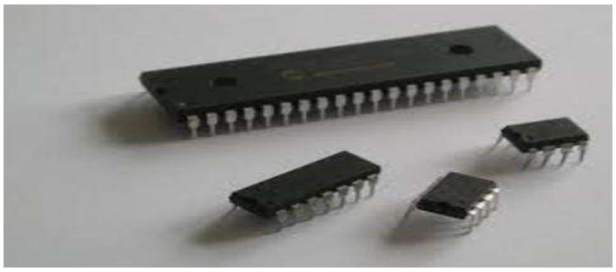


Figure II.3 : modèles des microcontrôleurs [31].

Les critères Cérès aident à choisir un microcontrôleur particulier adapté en fonction du périmètre de travail.

1. Le nombre de broches d'entrée et de sortie.
2. La taille de la mémoire : RAM, ROM.
3. La consommation d'énergie électrique : tension de fonctionnement, consommation de courant.
4. L'adaptation de l'architecture interne aux exigences de l'application. L'environnement de développement (disponibilité du matériel et des logiciels).

Quelques exemples de familles de microcontrôleurs actuellement disponibles incluent:

- Microcontrôleur 8 bits : PIC de la société américaine Micro chip qui a popularisé les microcontrôleurs, AVR d'ATMEL utilisé pour Arduino, dérivés de 80C51, C52.
- Microcontrôleur 16 bits : dsPIC de Microchip, MSP430 de Texas Instruments.
- Microcontrôleur 32 bits : AVR32, PIC 32, MIPS, PowerPC,..., ARM, ESP32.

Nous avons choisi l'ESP 32 car il répond à tous les critères requis pour notre travail.

II.5-Esperessif et ESP32

L'ESP8266 est un microcontrôleur à faible coût développé par la société chinoise EspressifSystems, principalement destiné aux applications de l'Internet des Objets (IoT). Il intègre un module Wi-Fi, permettant aux dispositifs embarqués de se connecter à des réseaux locaux ou à Internet pour échanger des données.
Il est équipé d'un processeur Tensilica L106 fonctionnant à une fréquence allant jusqu'à 80 MHz, et prend en charge plusieurs protocoles de communication tels que UART, SPI et I2C. Il est disponible sous différentes formes, notamment NodeMCU et WeMos D1 Mini, et est largement utilisé en raison de sa compatibilité avec l'environnement de développement Arduino IDE et de sa facilité de programmation.

Espressif Systems est une entreprise multinationale cotée en bourse qui s'occupe dans le domaine des microprocesseurs depuis l'an 2008, son siège social est situé à Shanghai et elle

dispose de bureaux en Grande Chine, en Inde et en Europe. Elle dispose d'un personnel très qualifié et passionné sur le développement IoT, Wifi et Bluetooth de basse consommation au plan mondial.

En septembre 2016, après une phase de test bêta qui a duré quelques mois, Espressif a annoncé et mis à disposition le successeur de l'ESP8266, appelé ESP32 [14], [15].

L'ESP32 est un système sur puce (SoC) à faible coût et à faible consommation d'énergie, intégrant une connectivité Wi-Fi et Bluetooth en mode double. Il constitue une plateforme robuste répondant aux exigences des solutions intelligentes modernes en matière de conception compacte, de sécurité, de haute performance et de fiabilité.

Dans ce contexte, la société Espressif Systems propose des solutions avancées permettant aux développeurs d'applications intelligentes de transformer leurs idées en réalisations concrètes. Ces solutions s'inscrivent dans un cadre de prise en charge de l'Internet des objets (IoT), de la connectivité à distance, ainsi que de plusieurs autres fonctionnalités embarquées au niveau du système [14].

II.5.1-Domaines et Applications de l'ESP32

1. **Agriculture intelligente :** Irrigation goutte à goutte et surveillance de l'environnement (IoT-Enabled Smart Drip Irrigation System Using ESP32).
2. **Systèmes SCADA :** Surveillance et contrôle des processus distribués (Low-Cost, Open Source IoT-Based SCADA System Design Using Thinger.IO and ESP32 Thing).
3. **Santé Ventilateur :** Conception d'un ventilateur intelligent (Smart ventilatorusing ESP32 microcontroller and embedded C).
4. **Surveillance ESP32-CAM :** Diffusion de vidéo avec ESP32-CAM (Pengujian Esp32-Cam BerbasisMikrokontroler ESP32).
5. **Systèmes de circulation :** Système de feux de circulation portatif et économique (Cost effective portable traffic light system using Esp32).
6. **Surveillance intelligente de l'énergie :** Suivi de la consommation d'énergie (A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller).
7. **Gant intelligent :** Gant de surveillance de la santé avec des capteurs (Health monitoring smart gloveusing esp32 microcontroller).
8. **Aquaponie :** Surveillance de la température de l'eau, du pH et de l'humidité (Proposed architecture for aquaponics monitoring using long range and ESP32).

II.5.2-Les types d'ESP32

Les microcontrôleurs ESP32 d'Espressif Systems sont effectivement divisés en plusieurs familles, notamment les séries ESP32-S et ESP32-C, chacune étant adaptée à des applications spécifiques.

1. **ESP32-S :** Cette série est généralement orientée vers des applications nécessitant une connectivité Wi-Fi et Bluetooth, avec des fonctionnalités avancées telles que des capacités de traitement améliorées, une consommation d'énergie optimisée et des interfaces variées. Les modèles de cette série sont souvent utilisés dans des projets IoT (Internet des Objets), des dispositifs portables, et d'autres applications nécessitant une communication sans fil.
2. **ESP32-C :** Cette série est plus axée sur des applications spécifiques et peut inclure des fonctionnalités supplémentaires adaptées à des besoins particuliers. Par exemple, certains modèles peuvent intégrer des capteurs ou des interfaces spécifiques pour des applications industrielles ou de contrôle. Ils peuvent également offrir des options de sécurité renforcées pour les applications sensibles.

Chaque famille de microcontrôleurs ESP32 est conçue pour répondre à des exigences variées en matière de performance, de connectivité et de coût, ce qui permet aux développeurs de choisir le modèle le plus adapté à leur projet.

II.6-Matériel

La station météorologique est composée d'un ensemble de capteurs et de dispositifs électroniques utilisés pour mesurer diverses données physiques liées aux conditions atmosphériques (température, humidité, pression, vitesse et direction de vent, participation, rayonnement solaire ….)Ces éléments sont connectés à une unité de contrôle électronique qui collecte et traite les données de manière périodique (esp32). Ce qui suit présente les composants de cette station, incluant les capteurs et les modules de transmission, en précisant la fonction technique de chaque élément dans le système.

II.6.1-Capteur BME280 pour la mesure de la température, pression et de l'humidité

Le BME280 est un capteur numérique multifonction conçu pour mesurer trois paramètres environnementaux essentiels : la température, la pression atmosphérique et l'humidité relative. Il est conçu pour offrir une haute précision avec une faible consommation d'énergie, ce qui le rend idéal pour les stations météorologiques, les dispositifs portables et les applications IoT (Internet of Things).

Ce module prend en charge les interfaces de communication I2C et SPI, permettant une compatibilité étendue avec les microcontrôleurs tels que l'ESP 32, l'Arduino, ou encore le Raspberry Pi. Il est également calibré en usine, ce qui garantit des mesures fiables sans nécessiter de calibrage manuel Figure II.4.

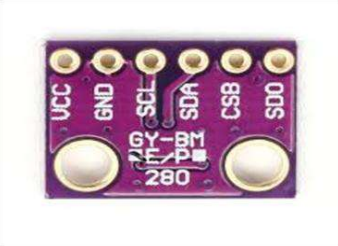


Figure II.4: BME280 [32].

Dans notre projet, nous utilisons un capteur BME280 intégré dans un boîtier étanche Figure II.5, ce qui le rend adapté aux environnements extérieurs et aux conditions climatiques difficiles.

1. Sa capacité à évaluer trois indicateurs critiques de l'environnement : température, humidité et pression atmosphérique.
2. En comparaison à d'autres capteurs dans la même gamme, sa mesure inclut un haut degré de précision.
3. De plus, sa faible consommation d'énergie facilite son intégration et son utilisation avec un microcontrôleur tel que l'ESP32 dans des systèmes embarqués.
4. Sa forme permet une intégration facile du capteur dans des circuits compacts.
5. Ses capacités à communiquer via les bus I2C et SPI lui confèrent une flexibilité de conception.
6. Aussi, en raison de sa conception robuste, il est capable de résister aux conditions météorologiques externes car il possède un boîtier étanche adapté aux applications sur le terrain.
7. Enfin, son faible coût le rend facile à valoriser pour des projets académiques ou expérimentaux.

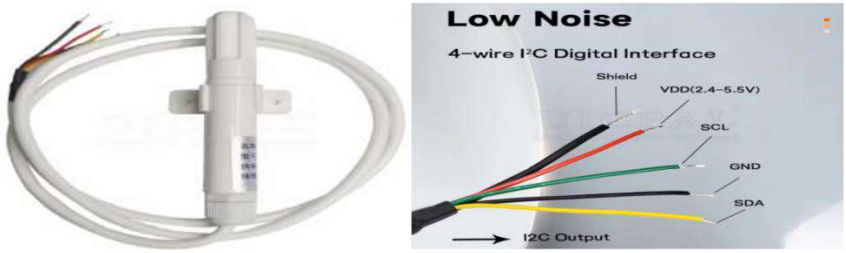


Figure II.5 : Bme280 étanchée et leur interface [33].

II.6.1.1.1-Caractéristiques techniques

1. Paramètres mesurés : Température, pression, humidité
2. Tension de fonctionnement : de 1,8V à 3,6V (3,3V recommandé)
3. Interface de communication : I2C (jusqu'à 3,4 MHz) ou SPI (jusqu'à 10 MHz)
4. Plage de température : de -40°C à +85°C

5. Précision température : ±1,0°C
6. Plage de pression : de 300 à 1100 hPa
7. Précision pression : ±1 hPa
8. Plage d'humidité : de 0% à 100% HR
9. Précision humidité : ±3% HR
10. Consommation pendant la mesure : entre 0,6µA et 714µA selon le mode
11. Dimensions : environ 3,6 × 3,8 × 1,0 mm (pour le capteur seul)
12. Compatibilité : Arduino, ESP8266, ESP32, Raspberry Pi, etc.

II.6.1.1.2-Principe fonctionnement

Le capteur est composé de trois unités de détection intégrées dans une seule puce :

1. Température : mesurée par une thermistance interne précise.
2. Pression atmosphérique : détectée grâce à un capteur barométrique basé sur un élément piézo résistif.
3. Humidité : évaluée par une cellule capacitive sensible à la teneur en vapeur d'eau dans l'air.

Les données mesurées sont transmises numériquement au microcontrôleur via l'interface I2C ou SPI, et peuvent ensuite être affichées ou utilisées dans des applications intelligentes comme les stations météo ou les systèmes de contrôle climatique.

II.6.2-Capteur anémomètre

Principe de fonctionnement des capteurs Les capteurs de vitesse et de direction du vent fonctionnent en transformant un mouvement mécanique causé par le vent en un signal électrique exploitable. L'anémomètre mesure la fréquence de rotation proportionnelle à la vitesse du vent, tandis que la girouette mesure l'angle de rotation pour déterminer la direction du vent. Les signaux sont ensuite convertis en données analogiques ou numériques pour traitement et analyse.

II.6.2.1- quelques exemples des anémomètres

II.6.2.1.1-Le capteur PCE-WS

Le capteur PCE-WS est un anémomètre conçu pour mesurer la vitesse du vent avec une grande précision. Il est disponible sous plusieurs versions selon le type de sortie :

1. Sortie analogique 0-10 V.
2. Sortie analogique 4-20 mA.
3. Sortie fréquence (impulsions).
4. Sortie numérique RS-485 (Modbus RTU).

Grâce à sa construction robuste en plastique renforcé de fibres (PA+FV) et son roulement en acier inoxydable (X65Cr13), il peut fonctionner dans des conditions environnementales difficiles.

1. **Caractéristiques principales**
    - Plage de mesure : 3 à 180 km/h
    - Vitesse de démarrage : 8 km/h
    - Vitesse maximale supportée : 200 km/h
    - Précision : [±1 km/h entre 3 et 15 km/h , ±3 % entre 15 et 180 km/h] Température de fonctionnement : -20 °C à +70 °C
    - Indice de protection : IP65
    - Tension d'alimentation : selon modèle (3 à 30 V DC)
    - Consommation énergétique : très faible (< 2,5 W)

Utilisé pour la gestion des systèmes de sécurité (coupure d'éolienne, alertes), agriculture de précision (gestion d'irrigation) et surveillance météorologique continue.



Figure II.6 : Anémomètre PCE WS RS485 [34].

II.6.2.1.2-Ultrasonique anémomètres

1. Ce type d'anémomètre diffère des autres modèles en raison de son principe de fonctionnement utilisant des ondes ultrasonores plutôt que d'avoir des pièces mobiles.
2. L'appareil est équipé d'un ensemble de transducteurs ultrasonores disposés sur des côtés opposés.
3. Des impulsions sonores sont émises dans plusieurs directions (généralement sur deux ou trois axes).
4. Le système mesure le temps nécessaire aux ondes pour parcourir la distance entre l'émetteur et le récepteur.
5. La vitesse du vent influence ce temps de transit : elle l'accélère dans le sens du vent et le ralentit dans le sens opposé.
6. En comparant les différences de temps entre les directions, le capteur est capable de déterminer avec précision :
7. La vitesse et la direction du vent.



Figure II.7: Ultra sonique anémomètre [35].

En raison du coût élevé de l'anémomètre ultrasonique, cet appareil offre toutefois l'avantage d'une faible maintenance, puisqu'il est dépourvu de pièces mécaniques mobiles, ce qui le rend plus fiable et durable dans le temps donc nous n'utilisons pas ce modèle.

Choix de notre projet c'est Le capteur KWG1 de vent avec coupelles simples avec sortie d'impulsions de 0 ... 100 Hz pour le contrôle du vent. Idéal pour des applications avec des conditions basiques, surtout lorsque vous cherchez une solution économique. Il a été conçu pour réaliser des fonctions basiques. De plus, sa structure et les matériaux dynamiques en plastique lui donnent une grande durabilité. Petit capteur de vent pour la série PCE-WL avec :

1. Installation simple
2. Câble de connexion de 3 m
3. Valable pour le PCE-WL 1 et le PCE-WL 2

II.6.2.2.1-Caractéristiques principales

1. Sortie : Signal de fréquence de 0 à 100 Hz.
2. Plage de mesure : 0,9 m/s à 40 m/s (vitesse du vent mesurée).
3. Précision : ±0,5 m/s ou ±5 % de la plage de mesure.
4. Résistance maximale au vent : Supporte jusqu'à 60 m/s sur une courte durée.
5. Caractéristiques électriques :
   - Charge de contact : 10 VA, maximum 42 V DC, 0,4 A.
   - Alimentation chauffage (en cas de givrage) : Max. 24 V DC/AC, 1 A.
6. Montage : Prévu avec un support mécanique robuste.
7. Conditions environnementales :
   - Température de fonctionnement : -25°C à +60°C (sans gel).
   - Câblage : 4 fils .
   - Indice de protection : IP54 (protégé contre la poussière et les projections d'eau).
   - Dimensions : Ø 134 mm de diamètre, 160 mm de hauteur
8. Poids : environ 300 grammes.

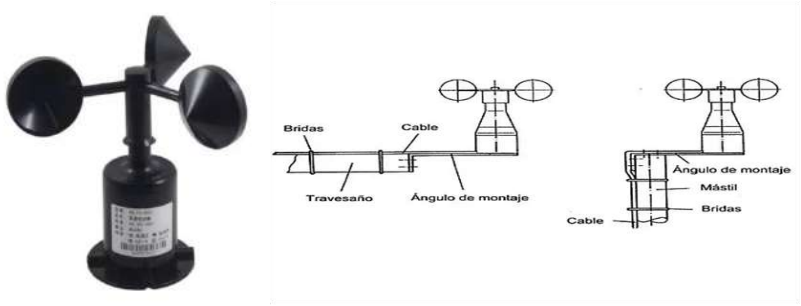


Figure II.8 : capteur de vent **ZTS_3000_fxjt_v05 [36].**

II.6.2.2.2-Principe de fonctionnement

Le capteur mesure la vitesse du vent en détectant la rotation des coupelles de l'anémomètre, qui est ensuite convertie en une valeur de vitesse à l'aide d'une formule mathématique. Quant à la direction du vent, la girouette détecte l'orientation du vent, et l'angle de rotation est converti en une valeur numérique indiquant la direction. Les données sont transmises via RS485 en utilisant le protocole Modbus RTU vers un système central.

II.6.3-Girouette

La girouette est un dispositif utilisé pour mesurer la direction du vent. Elle se compose d'une partie rotative fixée sur un axe vertical, qui tourne librement en fonction du vent, permettant ainsi de déterminer la direction géographique d'où vient le vent, comme le nord ou le sud.

II.6.3.1-Caractéristiques principales

1. Type de capteur : Girouette électronique pour la mesure de la direction du vent.
2. Plage de mesure : De 0° à 360°, couvrant toutes les directions géographiques.
3. Résolution : De 0.1° à 1° selon le modèle du capteur.
4. Sortie :
    - Signal analogique (tension variable).
    - Signal numérique via des protocoles comme RS485 ou Modbus RTU.
5. Alimentation : De 5V à 30V selon le modèle.
6. Protocole de communication :
    - Analogique
    - RS485
    - Modbus RTU
7. Matériau de fabrication : Polycarbonate ou aluminium résistant aux intempéries.
8. Plage de température de fonctionnement : De -40°C à +85°C.
9. Méthode de montage : Montage vertical sur mât ou support.
10. Indice de protection : IP65 ou supérieur (résistant à l'eau et à la poussière).
11. Interface de câblage : Quatre fils (Marron : +V, Noir : GND, Vert : Signal A, Bleu : Signal B).

II.6.3.2-Principe de fonctionnement de la girouette électronique

1. Rotation par le vent : La girouette tourne autour d'un axe vertical lorsque le vent souffle, et la partie avant de l'élément (flèche ou coq) s'oriente vers la source du vent.
2. Mesure de l'angle : Le capteur utilise un dispositif de mesure (tel qu'un codeur rotatif ou un potentiomètre circulaire) pour convertir l'angle de rotation en un signal électrique.
3. Conversion numérique : Le microcontrôleur (par exemple, ESP32) lit cette donnée et la transforme en une valeur angulaire numérique.
4. Détermination de la direction géographique : L'angle mesuré est comparé à un tableau de correspondance pour déterminer la direction géographique, par exemple :
    - 0° → Nord (N)
    - 90° → Est (E)
    - 180° → Sud (S)
    - 270°→Ouest(W)
    - Cette direction peut être affichée sur un écran ou envoyée via un réseau sans fil (Wi-Fi, LoRa...).



Figure II.9 : Capteur de direction de vent [37].

II.6.4-Capteur de luminosité TSL2561

Le capteur numérique TSL2561 est une solution avancée pour la mesure de la luminosité, avec une précision allant de 0,1 à 40 000 lux. Contrairement aux capteurs traditionnels tels que les LDR, il utilise des diodes sensibles à l'ensemble du spectre lumineux, offrant ainsi une meilleure précision dans diverses conditions d'éclairage. Il prend en charge l'interface de communication I²C, permettant d'attribuer une adresse à chaque capteur et de connecter jusqu'à trois capteurs sur le même microcontrôleur sans conflit. **Figure II.11** illustre la conception physique du TSL2561.

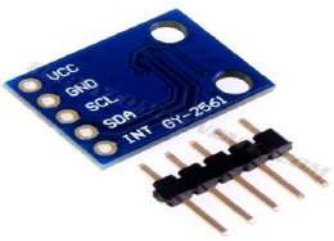


Figure II.10 : Capteur de luminosité TSL2561 [38].

II.6.4.1-Caractéristiques principales

1. Plage de température : -30 à 80 °C
2. La plage dynamique (Lux) : 0,1 à 40000 Lux
3. Plage de tension : 2.7-3.6V
4. Bus I2C avec des adresses 7 bits 0x39, 0x29, 0x49.

II.6.5-Pluviomètre

Le pluviomètre est un instrument de mesure météorologique utilisé pour quantifier la quantité de précipitations tombées dans une région donnée pendant une période déterminée. Cette quantité est généralement exprimée en millimètres (mm), où 1 mm de précipitations équivaut à 1 litre d'eau par mètre carré de surface.

Nous disposons d'un ensemble de pluviomètres, parmi lesquels on peut citer :

Tableaux II.2 : Comparaison des pluviomètres

Type de pluviomètre	Description	Utilisation principale
Pluviomètre manuel	Tube gradué recueillant la pluie, lecture manuelle.	Stations simples, usage éducatif.
Pluviomètre à auget basculant	Deux augets basculants alternent en envoyant une impulsion électrique.	Stations automatiques, agriculture de précision.
Pluviomètre numérique	Capteurs électroniques mesurant et transmettant les données en temps réel.	Télé-surveillance, projets IoT.
Pluviomètre à pesée	Mesure le poids de l'eau accumulée pour calculer les précipitations.	Recherche scientifique, zones de neige ou grêle.
Pluviomètre radar	Utilise des ondes radar pour estimer l'intensité et la répartition des pluies.	Modèles météo, suivi régional des précipitations.
Pluviomètre à laser	Utilise un faisceau laser pour détecter la taille, la vitesse et la densité des gouttes de pluie.	Études fines sur les caractéristiques des précipitations.

Choix de notre projet c'est l''appareil MS-WH-SP-RG de la société Misol est un pluviomètre à auget basculant qui mesure la quantité de précipitations via un mécanisme de basculement. Chaque basculement génère une impulsion électrique correspondant à une quantité fixe de pluie (par exemple 0,2 mm). Ce capteur est couramment utilisé dans les stations météorologiques automatiques et est compatible avec le protocole de communication I2C, ce qui facilite son intégration avec des microcontrôleurs tels que l'ESP32.

II.6.5.2-Caractéristiques principales

1. Contact propre du relais REED (max. 24 V, 0,5 A)
2. Technologie de détection par basculement
3. 1 impulsion (fermeture du contact pendant plusieurs centaines de millisecondes) à chaque mouvement de basculement, correspondant à 0,3 mm de pluie
4. Résolution minimale : 0,3 mm de pluie
5. Niveau à bulle pour montage parfaitement horizontal
6. Terminaison par câble bipolaire sur connecteur RJ-11
7. Compatible avec la plupart des stations météorologiques, peut servir de pièce de rechange
8. Bord du réceptacle (baignoire) de 2 cm de hauteur
9. Dimensions : 17 cm × 11 cm × 8 cm
10. Composant intégré sur le module :
    - Entonnoir inoxydable : collecte et canalise l'eau de pluie.
    - Augets basculants (x2) : alternent remplissage et vidage pour chaque mesure.
    - Aimant + contact Reed : génèrent une impulsion électrique à chaque basculement.
    - Bulle de niveau : garantit un positionnement horizontal précis.
    - Connecteur RJ-11 (câble bipolaire) : transmet les impulsions au système d'acquisition.
    - Boîtier étanche : protège tous les composants internes des intempéries

II.6.5.4-Principe de fonctionnement

Lorsque la pluie tombe, l'eau s'accumule d'abord dans un entonnoir qui la dirige vers l'un des deux augets basculants. L'eau remplit cet auget jusqu'à atteindre une hauteur équivalente à 0,3 mm de précipitations, moment où l'auget bascule rapidement pour vider son contenu, tandis que l'autre auget prend sa place sous l'entonnoir pour recommencer la collecte. À chaque basculement, un aimant fixé sur l'auget actionne un contact Reed, générant une impulsion électrique unique correspondant à 0,3 mm de pluie. Un compteur enregistre ces impulsions et multiplie leur nombre par 0,3 mm pour déterminer la pluviométrie totale.



Figure II.11:MS-WH-SP-RG [39].

II.6.6-ESP32 WROOM 32

ESP32-WROOM-32 est un module de microcontrôleur puissant et flexible combinant le Wifi, le Bluetooth classique et le Bluetooth à faible énergie (BLE). Il cible une série d'applications larges, du réseau de capteurs de consommation de faible énergie aux, les tâches les plus exigeantes telles que le chiffrement vocal, la diffusion de la musique continue et le décodage MP3.

Au centre de ce module est ESP32-D0WDQ6. La puce de cette table peut être conçue pour être élargie et adaptable. Il combine deux processeurs (CPU) contrôlés individuellement et la fréquence d'horloge du processeur peut être ajustée de 80 MHz à 20 MHz. Les utilisateurs peuvent également annuler le processeur principal et utiliser le processeur de consommation à faible consommation pour surveiller en permanence les appareils afin que puisse détecter des modifications ou dépasser les seuils.

ESP32 combine un riche ensemble de dispositifs périphériques, à partir de capteurs tactiles capacitifs, de capteurs d'effet Hall, de cartes SD, Ethernet, interface SPI à vitesse élevée,UART, I² et I²C. L'intégration de Bluetooth, Bluetooth et Wi-Fi garantit le support d'une série de modules et de flexibilité.

Le Wi-Fi permet une grande portée physique et une connexion Internet directe via Wi-Fi, tandis que Bluetooth permet aux utilisateurs de se connecter facilement à leur téléphone ou pour discuter des cartes de consommation faibles.

Les lignes d'horloge des puces ESP32 sont inférieures à 5 µA, ce qui convient pour applications électroniques mobiles et fournies par la batterie. Le flux de données prend en charge jusqu'à 150 Mbps et la puissance de sortie de 20 dBm pour garantir la plage physique la plus large possible. Par conséquent le module fournit spécifications de coupe et les meilleures performances dans l'intégration électronique, la portée de la consommation d'énergie et la connexion.

Les systèmes d'exploitation sélectionnés pour ESP32 sont gratuits avec LWIP. TLS 1.2 avec accélération matérielle est également intégré. La mise à niveau de la sécurité (Encrypted) Live (OTA) est également prise en charge, permettant aux utilisateurs de mettre à jour leur produit même après la sortie, avec un coût et un effort minimum [17].

II.6.6.1-Caractéristiques principal

1. **Processeur et mémoire intégrée :**
   - Microprocesseur double cœur 32 bits Xtensa LX6 (ESP32-D0WD-V3 ou ESP32-D0WDR2-V3), jusqu'à 240 MHz.
   - 448 Ko de ROM.
   - 520 Ko de SRAM.
   - 16 Ko de SRAM dans le RTC (Real Time Clock).
2. **Wi-Fi :**
   - Normes supportées : 802.11 b/g/n.
   - Débit : jusqu'à 150 Mbps (802.11n).
   - Support de l'intervalle de garde de 0,4 µs.
   - Plage de fréquences : 2412 ~ 2484 MHz.
3. **Bluetooth :**
   - Bluetooth V4.2 BR/EDR + BLE.
   - Émetteur de classe 1, 2 et 3.
   - Support AFH (Adaptive Frequency Hopping).
   - Codecs CVSD et SBC.
4. **Composants intégrés sur le module :**
   - Oscillateur à cristal 40 MHz.
   - Mémoire flash SPI : 4 / 8 / 16 Mo.
   - Le modèle ESP32-D0WDR2-V3 comprend également 2 Mo de PSRAM.
5. **Conditions d'exploitation :**
   - Tension d'alimentation : 3,0 V ~ 3,6 V.
   - Température de fonctionnement : –40 °C à 85 °C.

Le module ESP32-WROOM-32 offre une large gamme d'entrées et de sorties, ce qui le rend particulièrement adapté aux applications embarquées nécessitant une connectivité étendue avec divers capteurs, actionneurs et périphériques.

Parmi les principales interfaces disponibles, on retrouve :

1. UART (Universal AsynchronousReceiver/Transmitter) : utilisée pour la communication série asynchrone.

2. SPI (Serial Peripheral Interface) : protocole de communication synchrone maître-esclave, adapté aux échanges rapides de données avec des périphériques comme les mémoires ou les écrans.
3. I²C (Inter-Integrated Circuit) : protocole de communication série synchrone permettant de connecter plusieurs capteurs via un seul bus.
4. GPIO (General Purpose Input/Output) : broches configurables individuellement en entrée ou en sortie numérique. Certaines de ces broches peuvent également être utilisées pour des fonctions avancées telles que les interruptions matérielles.
5. PWM (Pulse Width Modulation) : permet de générer des signaux modulés en largeur d'impulsion, utiles pour le contrôle de moteurs, de LED ou autres dispositifs analogiques.

Grâce à cette richesse en interfaces, l'ESP32-WROOM-32 se distingue comme une solution puissante et flexible pour les projets IoT, robotiques ou domotiques.

II.6.7-TTGO T-Call ET SIM800L

Le **TTGO T-Call ESP32 SIM800L** est une plateforme de développement intégrée qui combine un microcontrôleur **ESP32** avec un module de communication cellulaire **SIM800L**, monté directement sur la même carte. Cette intégration permet la mise en œuvre de systèmes intelligents capables de communiquer à distance via les réseaux **GSM/GPRS**, sans dépendre d'un accès Wi-Fi local. Grâce à cette architecture, le module est largement utilisé dans des applications liées à l'Internet des Objets (IoT), telles que les stations météorologiques, les systèmes de surveillance ou de géolocalisation, en particulier dans les environnements où l'accès à l'Internet conventionnel est limité.

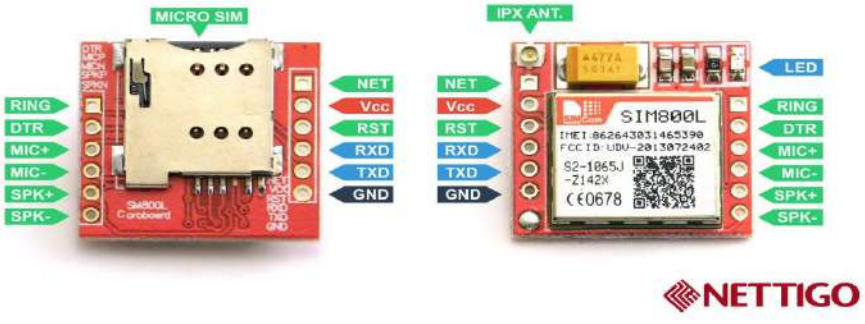


Figure II.12 : SIM800L module [40].

Le SIM800L est l'un des modules de communication sans fil les plus compacts et les plus simples basés sur la norme GSM (Global System for Mobile Communications). Il présente des dimensions de 2,2 × 1,8 cm pour un poids léger de seulement 1,35 g, ce qui le rend idéal pour une intégration dans des systèmes embarqués à espace restreint.

Ce module fonctionne avec la technologie GSM quadri-bande, prenant en charge les fréquences (850 / 900 / 1800 / 1900 MHz), ce qui lui permet de se connecter à n'importe quelle station de base BTS (Base Transceiver Station) couvrant les réseaux cellulaires mondiaux. Il offre également une connectivité GPRS (General Packet Radio Service) avec des vitesses allant jusqu'à 85 Kbps, permettant la transmission de données vers des serveurs Internet via des protocoles M2M (Machine-to-Machine).

La communication avec le module SIM800L s'effectue à travers une interface série UART (Universal AsynchronousReceiver/Transmitter) en utilisant des commandes AT, qui sont des instructions standard pour le contrôle des modems GSM. Le module prend en charge l'envoi et la réception de SMS, les appels vocaux, ainsi que la connexion à Internet, notamment pour envoyer des données vers des plateformes telles que ThingSpeak.

Le module fonctionne avec une tension d'alimentation comprise entre 3,4 V et 4,4 V, et nécessite un courant de pointe d'environ 2 A lors de la transmission ou de l'enregistrement sur le réseau. Par conséquent, il est déconseillé de l'alimenter directement à partir de la sortie 5 V d'un microcontrôleur tel qu'un Arduino. L'utilisation d'une diode 1N4007 est recommandée pour abaisser la tension à un niveau sûr. Un accumulateur lithium de 3.7 V est souvent utilisé comme source externe stable afin d'éviter les redémarrages inopinés dus aux baisses de tension. Grâce à sa faible consommation énergétique, son format réduit et sa facilité d'intégration, le SIM800L est particulièrement adapté aux applications telles que les stations météo intelligentes, les systèmes de géolocalisation GPS, ou encore les projets agricoles basés sur l'IoT.



Figure II.13 : t-call et ESP32 [41].

II.6.8-ADS1115 (Convertisseur Analogique-Numérique)

Le convertisseur analogique-numérique ADS1115 joue un rôle central dans la surveillance des paramètres électriques. Grâce à ses quatre canaux d'entrée analogique, il

permet de mesurer simultanément plusieurs signaux, offrant ainsi une surveillance complète et précise, Avec une résolution de 16 bits, l'ADS 1115 garantit une haute précision des mesures, indispensable pour assurer la fiabilité des données collectées.

De plus, il est équipé d'un amplificateur programmable (PGA) qui permet d'ajuster le gain en fonction de l'amplitude du signal, ce qui rend l'appareil particulièrement flexible et adapté à une grande variété d'applications de mesure, Sa communication via le bus I2C facilite son intégration dans différents systèmes électroniques, notamment ceux nécessitant des acquisitions de données précises et stables [16].

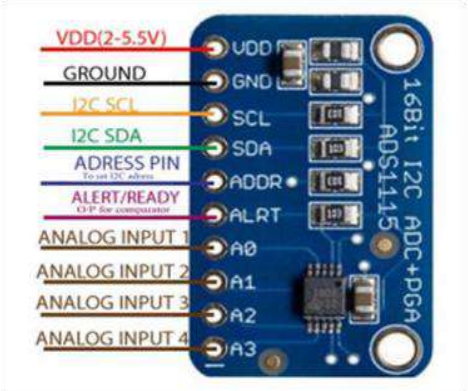


Figure II.14 : Broches du module ADS1115 [42].

II.6.8.1-Caractéristiques principales

1. Nombre de bits : 16 bits.
2. Nombre des entrées : 4 entrées (multiplexées)
3. Type d'interface : I2C.
4. Tension de fonctionnement : 2 jusqu'à 5.5 v.
5. Plage de tension des entrées : 0 jusqu'à 5v.
6. Composants intégrés sur le module :
    - Comparateur numérique.
    - Oscillateur interne.
    - PGA (Programmable Gain Amplifier).

II.6.9-Convertisseur de niveau logique

Dans les projets embarqués, les composants électroniques fonctionnent souvent avec des tensions différentes. Par exemple, les cartes ESP de 3.3v et les capteurs de station basculent de 2v et 5v. Pour assurer une communication sécurisée entre ces composants, il est essentiel d'adapter les niveaux logiques à l'aide d'un convertisseur de niveau (Level Shifter).

On a deux types de convertisseurs logiques de niveau :

1. **Unidirectionnel** : la conversion se fait dans un seul sens.
2. **Bidirectionnel** : la conversion peut se faire dans les deux sens automatiquement.

Ce choix s'explique par plusieurs avantages :

1. **Compatibilité bidirectionnelle automatique**, sans configuration manuelle de la direction.
2. **Simplicité de mise en œuvre** avec peu de composants (MOSFET + résistances de pull-up).
3. **Faible coût** et disponibilité sur des modules prêts à l'emploi.
4. **Fiabilité** dans la gestion des signaux 3.3V ↔ 5V, notamment pour les communications I²C. /

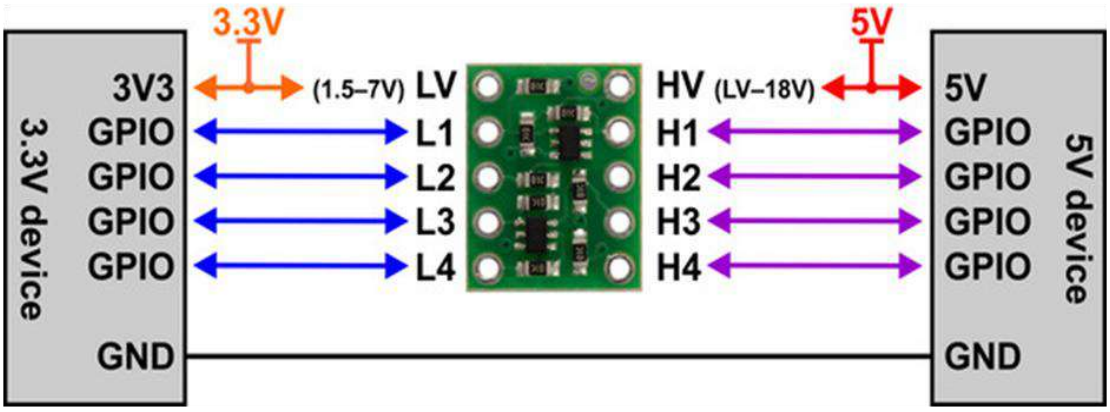


Figure II.15 : Convertisseur de niveau logique [43].

II.6.10-GPS

Système de positionnement global (GPS) permet une localisation précise d'un objet ou d'un corps en mouvement grâce à un réseau de satellites. Ce système est largement utilisé dans la majorité des technologies modernes.

Dans notre projet, en plus des différents capteurs utilisés dans la station de mesures climatiques, nous allons intégrer un système de géolocalisation GPS pour synchroniser les données en temps réel. En outre, dans le cas où l'agriculteur possède plusieurs champs ou de vastes terres, cela facilitera la gestion et le suivi des données climatiques.

II.6.1-Principe de fonctionnement

Le système de positionnement global (GPS) fonctionne en recevant directement les signaux émis par les satellites via une antenne intégrée dans le module GPS. Le récepteur (Receiver) capte ces signaux et les déchiffre. Les coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude) sont déterminées grâce au calcul du décalage temporel entre les signaux envoyés par plusieurs satellites.

Après le traitement interne des données, le module GPS envoie les résultats (les coordonnées) au microcontrôleur via une interface de communication telle que l'UART. Ensuite, le microcontrôleur transmet les données à l'utilisateur ou à un système central comme un écran d'affichage ou un serveur distant.

La carte GPS reçoit des signaux unidirectionnels émis par une constellation de 24 satellites du système mondial de positionnement (GPS). Ces satellites fonctionnent en coordination pour fournir des informations de localisation précises.

Le microcontrôleur associé à la carte GPS calcule les différences de temps entre les signaux reçus de plusieurs satellites. En analysant ces décalages temporels, il est possible de déterminer avec une grande précision la position géographique de la station (latitude, longitude et altitude).

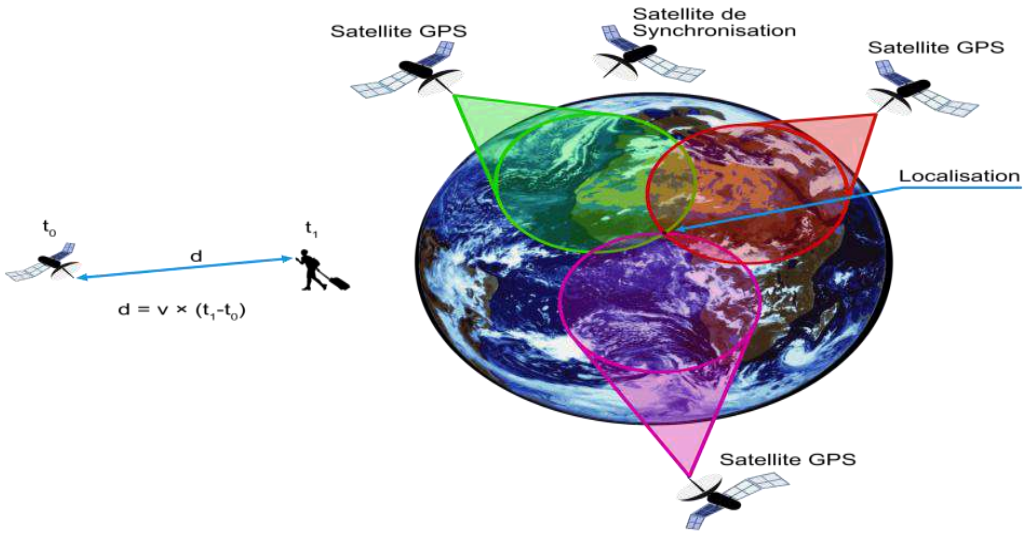


Figure II.16 : Principe de fonctionnement d'une carte électronique GPS [44].

II.6.1-Composants intégrés sur le module

1. Antenne GPS : Permet de capter les signaux émis par les satellites GPS.
2. Récepteur GPS : Reçoit les signaux satellites et calcule le temps de propagation pour déterminer la position.
3. Décodeur / Processeur : Traite les signaux reçus pour extraire les coordonnées géographiques (latitude, longitude, altitude).
4. Interface de communication (UART/I2C) : Assure la communication entre le module GPS et un microcontrôleur.
5. Régulateur de tension : Adapte la tension d'alimentation au besoin du module (souvent 3.3V ou 5V).
6. Mémoire tampon (facultative):Stocke temporairement des données comme la dernière position ou l'historique de trajet.

II.7-Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous confirmons que les composants sélectionnés avec un soin méticuleux - depuis le microcontrôleur jusqu'aux capteurs et y compris la carte SIM - possèdent une haute intégrabilité et une efficacité concrète dans la réalisation de notre projet. Ces éléments satisfont pleinement aux exigences techniques, établissent un équilibre optimal entre les performances requises et les coûts, et s'adaptent aux conditions climatiques pour constituer une infrastructure capable de créer une station de mesures climatiques connectée. Cette station sera parfaitement opérationnelle pour exécuter ses missions et fournir des données et alertes précises en temps réel, répondant ainsi aux objectifs fixés. La complémentarité technique de ces composants soigneusement choisis garantit la fiabilité et l'efficience du système global.

.

Chapitre III

Réalisation et mise en marche

III.1-Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter en détail les étapes de réalisation de la station météorologique, en commençant par l'assemblage et le câblage des capteurs, puis par la programmation du microcontrôleur et la configuration du système de communication. Ensuite, nous décrirons comment les données sont envoyées efficacement vers la plateforme ThingSpeak pour être stockées et visualisées. Enfin, nous expliquerons le système d'alerte automatique, déclenché lorsque certaines valeurs climatiques critiques sont détectées.

III.2-Architecture Générale de système

L'architecture générale de notre station météorologique intelligente repose sur la connexion d'un ensemble de capteurs environnementaux (température, humidité, pression atmosphérique, vitesse du vent, direction du vent, quantité de précipitations, etc.) à une unité de contrôle microcontrôleur de type ESP32. Cette unité se charge de la lecture périodique des données, de leur traitement local, puis de leur envoi automatique vers la plateforme ThingSpeak via une connexion GPRS utilisant le module de communication SIM800L.

Ce schéma permet de visualiser rapidement l'architecture du système et les interactions fonctionnelles entre les différents éléments du projet **Figure III.1.**

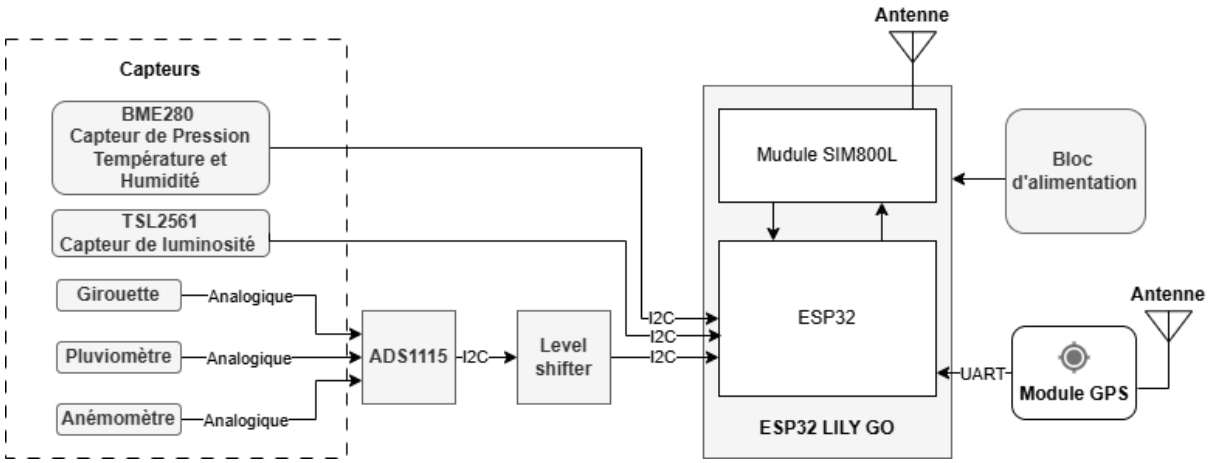


Figure III.1 : Schéma synoptique de la station météorologique connectée

Les données transmises sont affichées en temps réel sur l'interface ThingSpeak sous forme de valeurs numériques précises et de graphiques interactifs, permettant à l'agriculteur de suivre à distance l'état climatique de sa ferme, que ce soit via son smartphone ou son ordinateur. Le système comprend également un mécanisme d'alerte automatique qui envoie des messages SMS à un numéro de téléphone dédié en cas de dépassement des seuils admissibles pour certaines valeurs mesurées (comme une température élevée, une vitesse de vent dangereuse,

etc.), garantissant ainsi une réaction rapide et efficace face aux conditions météorologiques critiques.

ThingSpeak conserve les données propres à chaque utilisateur dans un fichier accessible, offrant ainsi à l'agriculteur la possibilité de consulter une base de données lorsqu'il en a besoin.

III.3-Partie logicielle (Software)

La partie logicielle représente l'environnement invisible et constitue véritablement l'âme de la station météorologique intelligente. En son absence, les composants matériels restent inactifs et incapables d'assurer leurs fonctions. C'est grâce à cette couche logicielle que chaque élément du système est programmé pour remplir un rôle bien défini, selon une logique précise assurant l'intégration et la coordination entre les capteurs, le microcontrôleur et les modules de communication.

Dans notre projet, cette partie a été développée à l'aide de l'environnement de développement Arduino IDE, une plateforme open source largement utilisée pour la programmation des systèmes embarqués. Cet environnement repose sur des protocoles de communication standards tels qu'I²C, tout en intégrant des bibliothèques spécialisées permettant la lecture des données des capteurs, le contrôle des modules de communication et l'envoi des informations vers la plateforme Cloud.

Ainsi, la partie logicielle garantit une interaction fluide et efficace entre les différents composants du système, tout en offrant la possibilité d'évoluer ou d'être mise à jour selon les besoins futurs.

III.3.1-Environnement de développement (arduino ADE)

L'Arduino IDE est un logiciel développé par la plateforme Arduino. Il est utilisé pour écrire le code, le compiler, puis téléverser vers les microcontrôleurs compatibles avec cet environnement, tels que l'Arduino UNO, Mega, et autres. Ce logiciel se distingue par son interface simple et sa facilité d'utilisation, ce qui le rend adapté aussi bien aux débutants qu'aux développeurs. Il prend en charge les langages C et C++, et comprend un éditeur de texte, un compilateur, ainsi que des outils de correction. Il constitue un outil essentiel dans le développement de projets électroniques embarqués, largement utilisé dans les domaines de l'éducation, de la recherche et du prototypage rapide.

Dans le logiciel Arduino IDE, on trouve plusieurs composants essentiels qui permettent à l'utilisateur d'écrire, de modifier puis de téléverser directement le code sur les cartes Arduino

ou ESP32. Le logiciel se distingue par une interface simple et facile à utiliser, contenant un ensemble d'outils variés, que nous allons détailler ci-après :

III.3.1.1-La barre de menus (Menu Bar)

Elle contient les menus suivants : Figure III.2

1. File : pour ouvrir, enregistrer ou créer un nouveau projet
2. Edit : pour modifier le code
3. Sketch : pour vérifier et téléverser le code
4. Tools : pour choisir le type de carte et le port
5. Help : pour l'aide et la documentation



Figure III.2: menu bar

III.3.1.2-La barre d'outils supérieure (Toolbar) Figure III.3

1. Verify : vérifie le code et détecte les erreurs.
2. Upload : transférer le code sur la carte.
3. Start Debugging pour exécution du code pas à pas.
4. Sélection du type de carte et du por .
5. Serial moniteur: C'est une fenêtre permettant de lire les données textuelles échangées entre l'environnement de développement et le microcontrôleur, y compris les messages d'erreurs.
6. Serial plotter: C'est une interface qui affiche les données entrantes sous forme de graphiques, facilitant ainsi leur interprétation visuelle.



Figure III.3: toolbar

III.3.1.3-La barre latérale

1. Sketchbook **(**Carnet de croquis) : Permet d'accéder rapidement aux croquis (sketchs) enregistrés localement.
2. Board Manager (Gestionnaire de cartes) : Sert à installer ou sélectionner le type de carte (comme Arduino Uno, ESP32…).
3. Library Manager (Gestionnaire de bibliothèques) : Permet d'ajouter, mettre à jour ou supprimer des bibliothèques nécessaires aux modules et capteurs.

4. Debug (Débogueur) : Utilisé pour exécuter le code étape par étape et identifier les erreurs de fonctionnement.
5. Search(Recherche) : Sert à rechercher du texte dans le code ouvert (fonctions, variables…).

III.3.1.4-L'éditeur de code (Code Editor)

C'est l'espace où l'on écrit le code. Il contient deux fonctions principales :

- Void setup () est une fonction fondamentale dans l'environnement Arduino, utilisée pour l'initialisation des composants du système. Elle est exécutée une seule fois au démarrage de la carte ou après une réinitialisation. Cette fonction permet généralement de configurer les ports d'entrée/sortie (pinMode), d'établir la communication série (Serial.begin) et d'effectuer les réglages nécessaires au bon fonctionnement des capteurs et modules utilisés.
- voidloop() est une fonction principale, conçue pour exécuter de manière répétitive et continue les instructions du programme, après l'exécution unique de la fonction setup(). Elle fonctionne en boucle infinie, permettant ainsi la lecture continue des capteurs, la commande des actionneurs et le suivi en temps réel des changements dans le système.

III.3.2-Thingspeak

C'est une API (Application Programming Interface) et une application open source pour l'IOT (Internet des objets) facilitant la collecte, le stockage, l'analyse, la visualisation et l'interaction avec les données provenant de capteurs ou d'actionneurs comme Arduino, Raspberry Pi. Vous pouvez concevoir des applications d'enregistrement de capteurs, de suivi géographique et même un réseau social pour partager des mises à jour de l'état.

ThingSpeak agit comme un intermédiaire entre des dispositifs de périphérie tels que les capteurs de température et de pression pour recueillir des données, et un logiciel d'analyse de données exploratoire (MATLAB) pour analyser les données.

Dans notre projet, nous allons utiliser ThingSpeak pour visualiser des données collectées en temps réel, comme des données de température de l'air , des données d'humidité de l'air, des données d'irradiance, de pluies et autres.

III.3.2.1-Principales de ThingSpeak

ThingSpeak nous donne la possibilité de regrouper, de visualiser et d'examiner des flux de données en temps réel dans le Cloud. Voici quelques-unes des caractéristiques principales de ThingSpeak :

- Configurez facilement les appareils pour envoyer des données à ThingSpeak en utilisant des protocoles IoT populaires.
- Visualisez vos données de capteurs en temps réel.
- Agrégé des données à la demande provenant de sources tierces.
- Utilisez la puissance de MATLAB pour donner un sens à vos données IoT
- Exécutez vos analyses IoT automatiquement en fonction des horaires ou des événements.
- Prototyper et construire des systèmes IoT sans configurer de serveurs ni développer de logiciels web.
- Agissez automatiquement sur vos données.

On peut illustrer de nombreux systèmes IoT grâce au diagramme suivant : Figure III.4.

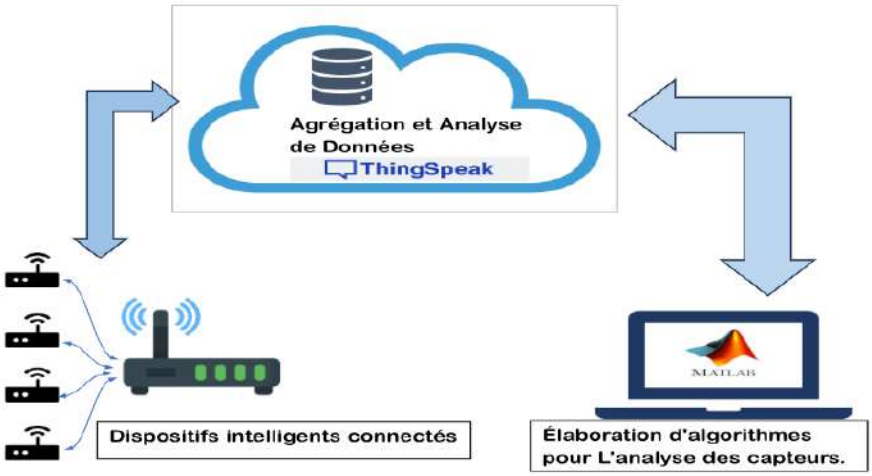


Figure III.4 : schéma général de ThingSpeak.

Voici les etapes d'utilisation de la plateforme ThingSpeak dans notre projet :

1. Créer un compte sur le site thingspeak.com.
2. Créer un nouveau canal (New Channel) :

- Donner un nom au canal.
- Activer les champs nécessaires (Field 1 = Température, Field 2 = Humidité, etc…).
- Enregistrer le canal pour obtenir : l'ID du canalet la clé API d'écriture (Write API Key).

3. Configurer l'ESP32 pour l'envoi des données : Le connecter au réseau Wi-Fi ou GSM.
4. Envoyer les données vers ThingSpeak : par un instruction arduino

"http://api.thingspeak.com/update";

5. Les valeurs apparaissent sous forme de graphiques.
6. Exporter les données au format CSV.

III.3.3-GSM/GPRS et Protocol TCP/IP ET HTTP

III.3.3.1-GSM : (global system mobile)

La technologie **GSM** est une technologie mondiale de communication sans fil appartenant à la deuxième génération (2G). Elle permet la transmission de la voix et des messages texte (SMS) sur des fréquences de 900 et 1800 MHz. Le station mobile envoie une demande de connexion à la station de base (BTS) la plus proche et disponible. Le réseau traite cette demande et établit la communication via le centre de commutation (MSC). Le GSM est également utilisé dans des modules comme le SIM800L pour transmettre sms en cas de changement climatique dangereux.

III.3.3.2-GPRS : (général packet radio service)

La technologie GPRS est une évolution des réseaux GSM, connue comme une technologie de génération 2.5, située entre la deuxième génération (2G) et la troisième génération (3G). Le GPRS permet la transmission de données via Internet en utilisant le principe de commutation par paquets au lieu de la commutation de circuits. Il offre une connexion permanente avec des débits théoriques pouvant atteindre 114 kbps, permettant ainsi l'envoi continu des données sans nécessiter de reconnexion. Cette technologie s'appuie sur l'infrastructure GSM et utilise des canaux temporels basés sur la technique TDMA. Elle est couramment utilisée pour envoyer des données provenant de capteurs vers des plateformes Cloud (Thingspeak).

III.3.3.3-TCP/IP et HTTP : (Transmission control Protocol / internet Protocol et hypertext transfer Protocol)

Les protocoles TCP/IP et HTTP sont très importants pour les communications sur Internet. On peut les comparer à l'envoi d'une lettre. Le protocole IP est comme l'adresse ou le code postal sur l'enveloppe, il sert à envoyer les données au bon endroit sur le réseau. Le protocole TCP est comme l'enveloppe qui contient la lettre, il découpe les données en petits morceaux bien ordonnés, vérifie qu'ils arrivent tous, et renvoie ceux qui sont perdus pour que tout soit complet. Le protocole HTTP est comme le facteur qui s'occupe de la lettre, il lit les demandes et les réponses entre le serveur et l'utilisateur.

III.4-Partie matérielle (hardware)

La partie matérielle constitue un élément essentiel de ce projet. Elle nécessite l'assemblage de plusieurs capteurs pour créer un réseau de stations météorologiques intelligentes. Ces stations sont capables de mesurer différents paramètres climatiques et d'envoyer les données en temps réel vers la plateforme ThingSpeak afin d'aider les agriculteurs à suivre les conditions météorologiques. Le système peut aussi envoyer des SMS en cas de changement climatique dangereux pour alerter immédiatement les utilisateurs.

III.4.1- Composants utilisés

III.4.1.1-Les capteurs météorologiques

1. **BME280** : pour mesurer la température, l'humidité et la pression atmosphérique.
    - Nous utilisons l'interface I2C.
    - Voltage 3.3-5 v.
    - Caractéristique principal:

Tableau III.1: caractéristique de BME280.

Précision	Plage de mesure	Paramètre
±1,0 °C	de -40 °C à +85 °C	Température
±1 hPa	de 300 à 1100 hPa	Pression atmosphérique
±3 % HR	de 0 % à 100 % HR	Humidité relative

2. **TSL2561:** pour mesurer le rayonnement solaire.
    - Interface I2C.
    - Voltage 3.3-5 v.
    - Plage de mesure 0.1-40 k lux.
3. **MS-WH-SP-RG:** Pluviomètre à augets basculants pour mesurer le volume de précipitation en mm, 1 impulsion =2 mm.
4. **ZTS_3000_fxjt_v05 :** capteur pour mesure la direction et vitesse de vent.
5. **L'unité de traitement :** le microcontrôleur dans notre système c'est l'ESP 32 collecter les données traitement et transmission.
6. **L'alimentation de système :** l'alimentation de station météorologique par le secteur car Contenu, facilité d'intégration.

III.4.1.2-Connexion entre les composants

1. **Connexion du Capteur BME280 (Température, Humidité, Pression)**

   Brochage:
    - VIN → 3.3V
    - GND → GND
    - SCL → GPIO19
    - SDA → GPIO18

2. **Connexion du Capteur TSL2561 (Rayonnement Solaire)**

   Brochage:

   - VCC → 3.3V
   - GND → GND
   - SCL → GPIO19
   - SDA → GPIO18

3. **Connexion du Convertisseur ADS1115 (Pour Capteurs Analogiques)**

   Brochage:

   - VDD → 5V (alimentation externe)
   - GND → GND commun
   - SCL → GPIO19
   - SDA → GPIO18

- A0, A1, A2 → Capteur de vitesse et direction du vent et priticipation (signal analogique)

4. Connexion du Pluviomètre (MS-WH-SP-RG)

   Brochage:

   - VCC→ 5V
   - GND → GND
   - Signal → A2

5. Connexion du Capteur de Vitesse et direction du Vent (ZTS_3000_FXJT_V05)

   Brochage:

   - Signal → A0, A1 de l'ADS1115
   - GND → GND de l'ADS1115
   - VCC → 5V de l'ADS1115.

6. Connexion du Module GSM (SIM800L)

   Brochage:

   - VCC → Alimentation `4V` (source externe 2A)
   - GND → GND
   - SCL→ GPIO22
   - SDA → GPIO21

7. Connexion du Module GPS

   Brochage:

   - VCC→ 3.3V
   - GND → GND
   - RX → GPIO 01
   - TX → GPIO 03

8. Connexion du Level Shifter (Pour Conversion 5V ↔ 3.3V)

   Brochage:

   - HV2 (5V) → SDA de l'ADS1115
   - LV2 (3.3V) → GPIO18 de l'ESP32
   - HV1 (5V) → SCL de l'ADS1115
   - LV1 (3.3V) → GPIO19 de l'ESP32
   - HV → 5V
   - LV → 3.3V

III.4.2-Schéma électrique

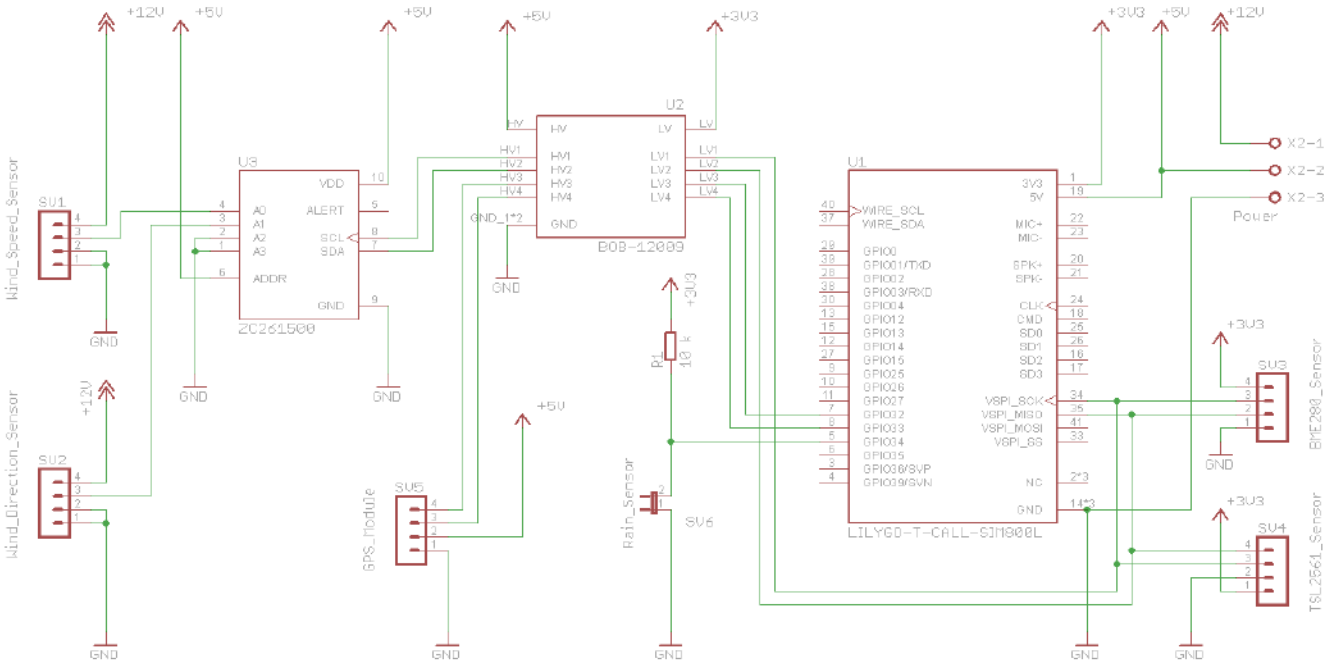


Figure III.5: schéma électrique qui représenté le câblage des capteurs.

III.4.3-Schéma d'implémentation et PCB

Le schéma d'implantation illustre la connexion physique des différents composants sur une plaque d'expérimentation, ce qui a facilité les phases de test et de prototypage, Le schéma du circuit imprimé a été réalisé à l'aide du logiciel EAGLE, en respectant les contraintes

d'espacement et les normes de routage. Il permet de réduire l'encombrement et de fiabiliser l'installation du système sur le terrain.

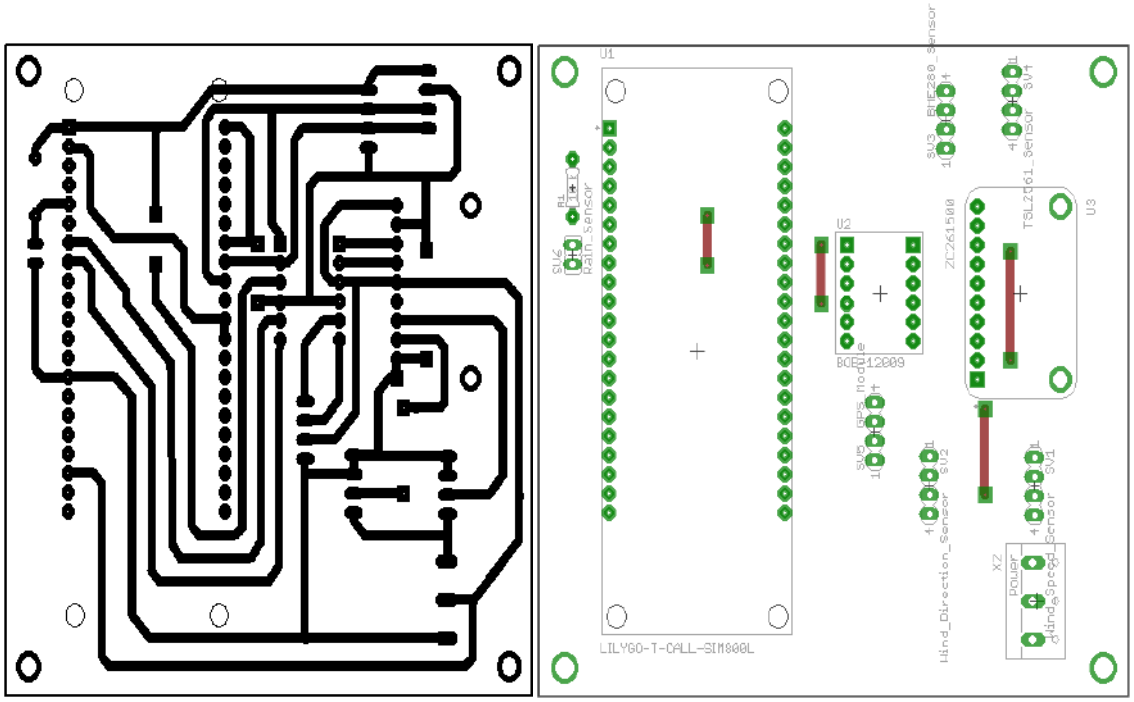


Figure III.6 : Schéma d'implémentation des composants et PCB

III.4.4-L'organigramme de système

Cet organigramme illustre le fonctionnement séquentiel de la station météorologique intelligente. Le système commence par une initialisation suivie d'une synchronisation via le module GPS. Toutes les cinq minutes, les données climatiques sont mesurées et comparées à des seuils prédéfinis Figure III.8.

Si toutes les valeurs sont dans les plages normales, les données sont envoyées à la plateforme ThingSpeak et enregistrées dans un fichier CSV. En cas de dépassement de l'un des seuils, une alerte SMS est immédiatement envoyé à l'agriculteur.

Ce processus permet une surveillance précise et en temps réel des conditions météorologiques, contribuant ainsi à une agriculture plus réactive, intelligente et durable.

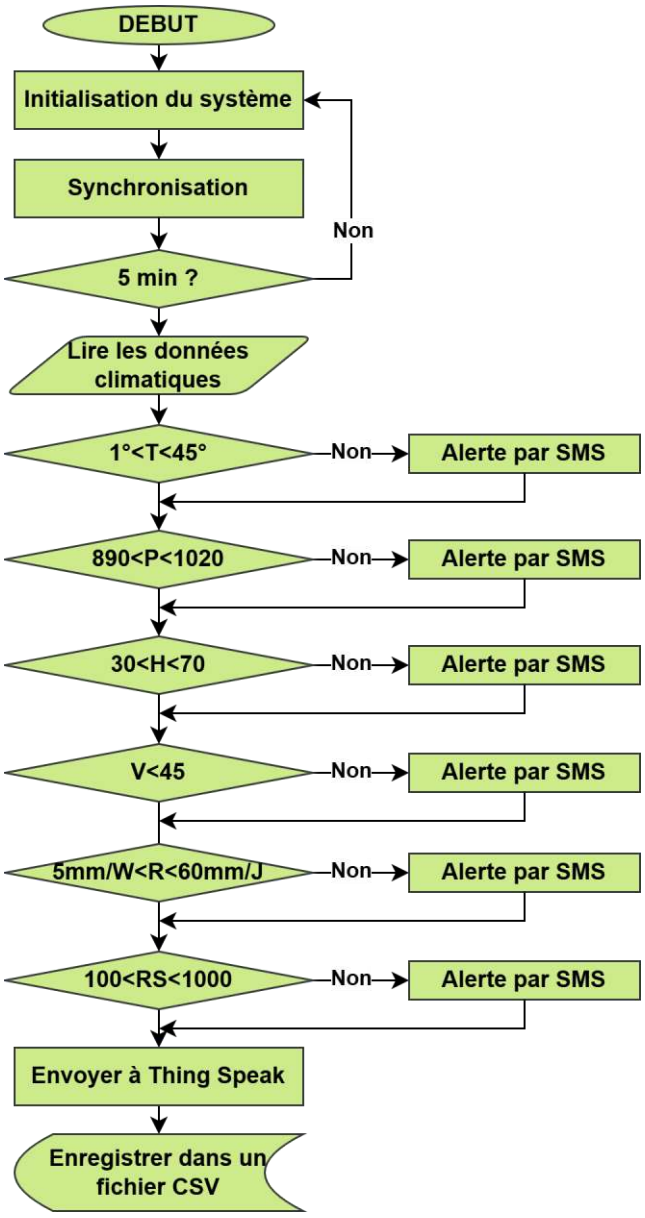


Figure III.7: l'organigramme de système.

III.4-Test et résultat

Les tests réalisés avec la station météorologique connectée ont confirmé son efficacité dans la mesure et la transmission des paramètres climatiques en temps réel, ont fourni des données précises et stables, avec des marges d'erreur conformes aux spécifications techniques. Visualisation sur ThingSpeak : Les données sont envoyées toutes les 10 minutes vers la plateforme IoT ThingSpeak via le module SIM800L (GSM/GPRS).

01. Rayonnement solaire :

Les données du rayonnement solaire ont été enregistrées à l'aide du capteur TSL2561. Les résultats ont montré que les valeurs sont restées stables pendant la journée, avec une intensité lumineuse comprise, ce qui indique une lumière solaire forte et directe pendant

l'expérience. Après 19h30, une chute brutale de la valeur a été observée, ce qui correspond au coucher du soleil.et apres le 5h00 Une hausse brutale de la valeur a été observée, ce qui correspond au lever du soleil, Ces résultats montrent que la station peut mesurer avec précision les variations de la lumière. Figure III.8.

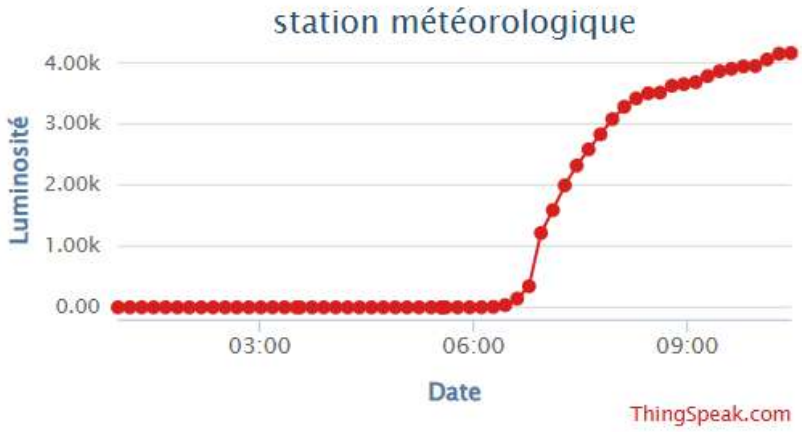


Figure **III.8 :** Rayonnement solaire **(lux).**



Figure **III.9 :** Les résultats de tsl2561 âpres le couché de soleil.

Enfin, une indication "Aucune lumière détectée" suggère que le capteur a détecté une absence de lumière à un moment donné. Cela reflète une fiabilité variable des mesures, potentiellement influencée par les conditions d'éclairage ou la sensibilité du capteur. Figure III.9**.**

02. Température de l'air :

Les valeurs relevées montrent une température stable variant entre 28° et 20°durant la période de mesure. Cela indique une soirée modérée avec des températures relativement stables, typiques d'un climat tempéré et agréable, Ce résultat confirme la cohérence des données avec l'intensité élevée du rayonnement solaire observée précédemment Figure III.10.

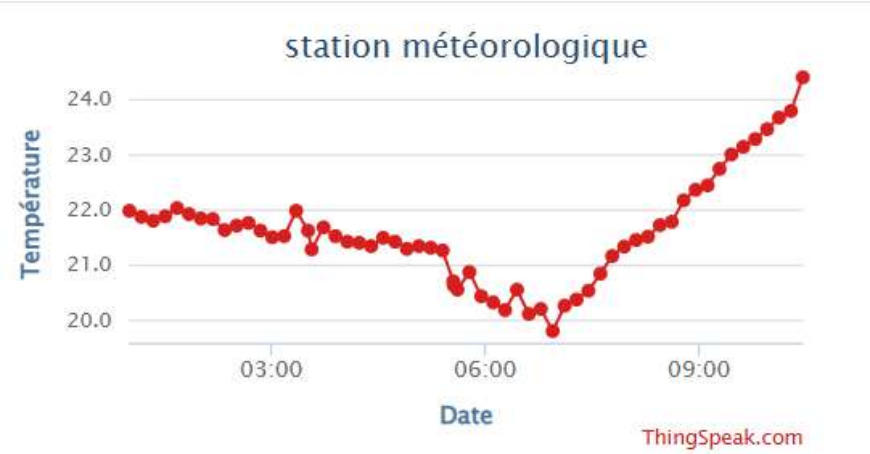


Figure III.10 : Température ambiante **(°C).**

03. Pression atmosphérique :

La pression atmosphérique observée est 924, ce qui indique une situation météorologique stable, sans perturbations importantes comme des orages ou des vents violents. Ce genre de données permet aux agriculteurs d'anticiper les changements climatiques et planifier leurs activités. Figure III. 11.

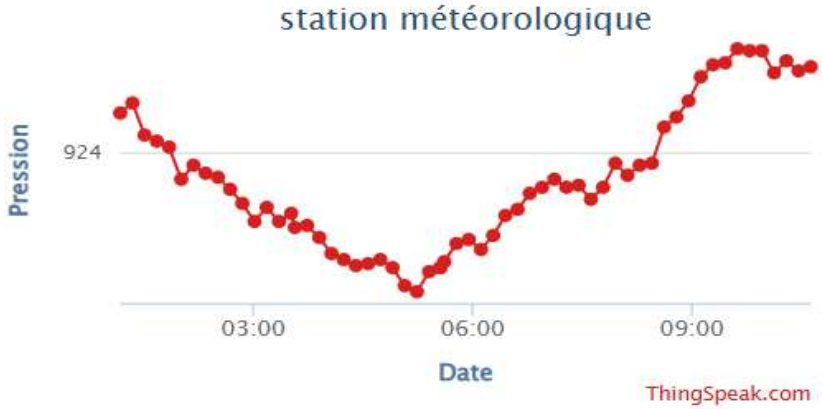


Figure III.11 : Pression atmosphérique (hPa).

04. Humidité relative

L'humidité relative a connu une augmentation progressive, passant d'environ 31 % à un pic proche de 37 % vers minuit, avant de redescendre légèrement à l'approche du matin. Cette évolution est cohérente avec la loi physique selon laquelle la baisse de la température entraîne une hausse de l'humidité relative. Ces résultats démontrent l'efficacité du capteur à détecter avec précision les variations de l'humidité ambiante, en particulier durant les périodes nocturnes Figure III.12.

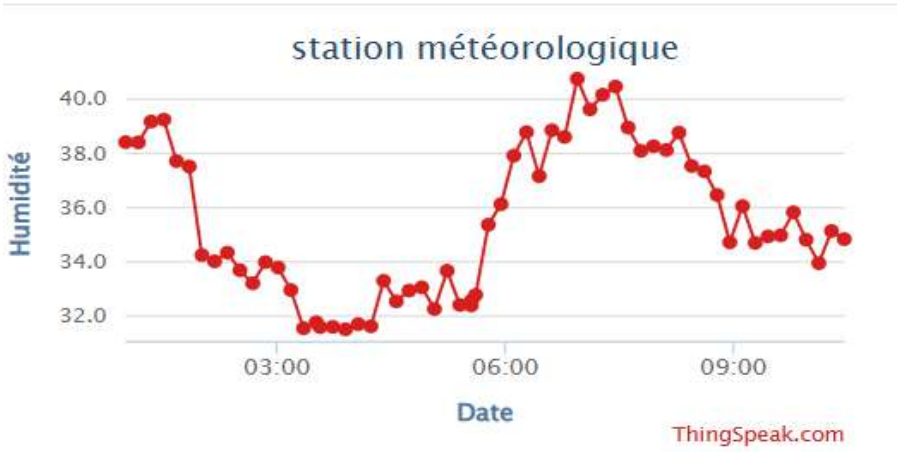


Figure III.12 : Humidité relative **(%)**.

05. Vitesse de vent

Les données montrent quelques rafales de vent intermittentes entre 21h et minuit, atteignant un maximum d'environ 1,5 m/s. Ensuite, la vitesse diminue progressivement jusqu'à se stabiliser à zéro. Ce comportement indique une légère activité éolienne en début de soirée, suivie d'un calme nocturne. Ces résultats confirment la sensibilité du capteur et sa capacité à détecter avec précision les variations de la vitesse du vent, même à de faibles intensités Figure III.13.

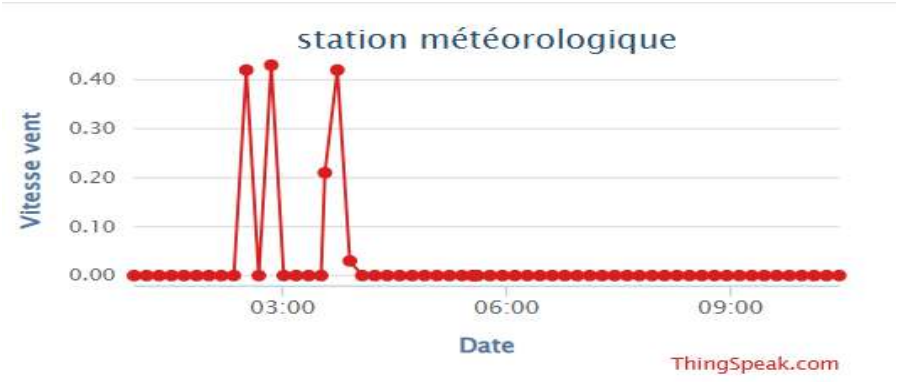


Figure III.13 : vitesse de vent (km/h).

III.5 Conclusion

Le Chapitre 3 a permis de détailler la conception et la mise en œuvre du système embarqué de la station météorologique intelligente. Les tests réalisés ont confirmé la fiabilité des capteurs (BME280, anémomètre, pluviomètre, etc.) et la robustesse de la transmission des données via le module GSM/GPRS (SIM800L). L'intégration de l'ESP32 comme unité centrale a démontré sa capacité à traiter et transmettre en temps réel les paramètres climatiques vers la plateforme IoT (ThingSpeak). Les défis rencontrés, tels que la calibration des capteurs et la gestion de l'énergie, ont été résolus grâce à des algorithmes d'optimisation. Ces résultats

valident l'approche technologique adoptée et ouvrent des perspectives pour des améliorations futures, comme l'ajout de l'IA pour l'analyse prédictive. Les données montrent quelques rafales de vent intermittentes entre 21h et minuit, atteignant un maximum d'environ 1,5 m/s. Ensuite, la vitesse diminue progressivement jusqu'à se stabiliser à zéro. Ce comportement indique une légère activité éolienne en début de soirée, suivie d'un calme nocturne. Ces résultats confirment la sensibilité du capteur et sa capacité à détecter avec précision les variations de la vitesse du vent, même à de faibles intensités.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

À la fin de ce projet, nous avons réussi à réaliser une station météorologique intelligente et complète, qui constitue une solution innovante pour soutenir le secteur agricole. Le système utilise la technologie de l'Internet des Objets (IoT) et transmet les données via les réseaux GSM/GPRS, ce qui permet aux agriculteurs de surveiller le climat de leurs champs avec précision et en temps réel. Ce système aide à prendre de meilleures décisions au quotidien, comme le moment idéal pour irriguer ou fertiliser, ce qui améliore la productivité et réduit le gaspillage des ressources, notamment de l'eau.

Nous avons conçu le schéma électrique de la station à l'aide du logiciel EAGLE, un outil professionnel de conception de circuits électroniques. Cette étape nous a permis de définir avec précision les connexions entre les composants et d'assurer l'efficacité et la fiabilité du montage final.

En outre, nous avons utilisé la plateforme **ThingSpeak** pour stocker les données climatiques dans le cloud et les analyser. Cette plateforme permet d'afficher les données sous forme de graphiques et d'appliquer des algorithmes d'analyse intelligents, ce qui aide à prévoir les changements climatiques et à prendre des décisions agricoles plus précises et efficaces.

La station est écologique et évolutive. Elle peut être connectée à des systèmes d'irrigation intelligents ou intégrée à des technologies d'intelligence artificielle (IA). Le projet est également flexible et adaptable à différents climats. Il est possible d'ajouter à l'avenir d'autres capteurs pour mesurer, par exemple, la qualité du sol.

Cette innovation représente une étape importante vers une agriculture de précision durable, contribuant à assurer la sécurité alimentaire tout en préservant les ressources naturelles pour les générations futures.

Bibliographie

Bibliographie

[1] A. Benidir, S. Rebah, and M. Kherbouche, "La transition agricole en Algérie : des réformes agraires aux politiques libérales," *Insaniyat*, no. 47, 2010. [Online]. Available: https://journals.openedition.org/insaniyat/7027. [Accessed: Mar. 2025].

[2] R. Ait-Amara, "La crise des oasis traditionnelles dans le désert algérien : le cas de l'oasis de Tolga," *Insaniyat*, no. 78, 2018. [Online]. Available: https://journals.openedition.org/insaniyat/12532. [Accessed: Mar. 2025].

[3] "L'agriculture traditionnelle et son évolution," *Revue Tiers Monde*, vol. 2, pp. 123-140, 2012. [Online]. Available: https://shs.cairn.info/revue-tiers-monde-2012-2-page-123?lang=fr#s2n10. [Accessed: Mar. 2025].

[4] UMMTO, "Analyse des pratiques agricoles," *Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*, 2024. [Online]. Available: https://dspace.ummto.dz/server/api/core/bitstreams/e87b9e37-5291-404e-b039-28e149c961a4/content. [Accessed: Mar. 2025].

[5] École d'Agriculture, "Agriculture de précision : avantages et outils modernes," *École d'Agriculture*, 2024. [Online]. Available: https://www.ecoledagriculture.fr/agriculture-de-precision-avantages-et-outils-modernes/. [Accessed: Mar. 2025].

[6] SafetyCulture, "Thèmes: Agriculture de précision," *SafetyCulture*, 2024. [Online]. Available: https://safetyculture.com/fr/themes/agriculture-de-precision/. [Accessed: Mar. 2025].

[7] Météo France, "Une brève histoire de l'observation météorologique," *Météo France*, 2024. [Online]. Available: https://meteofrance.com/magazine/meteo-histoire/observation/une-breve-histoire-de-lobservation. [Accessed: Mar. 2025].

[8] M. M. Recioui and R. Abaidi, "Étude sur l'agriculture et la météorologie," *Journal de Recherche Scientifique*, vol. 35, no. 4, pp. 210-225, 2022.

[9] ZPAG, "Humidité et météorologie," *ZPAG Météo*, 2024. [Online]. Available: https://www.zpag.net/Meteo/humidite.htm. [Accessed: Mar. 2025].

[10] T. Rabah, "Météorologie et climat," *Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*, 2013.

[11] M. Hamadouch and R. Hammelna, "Thèse sur la météorologie et l'agriculture," *Thèse de Doctorat*, ESSA Tlemcen, 2022.

[12] D. Ben Ghochi and M. B. Tounsi, "Mémoire COMPL (1) - Ismahan Nina (1)," 2024. [Online]. Available: https://theses.hal.science/tel-00163980/file/dsd_0251.pdf.

[13] M. Kouadria, *Microprocesseurs et Microcontrôleurs*. Université Ibn-Khaldoun de Tiaret, Département de Génie Électrique, 2024.

[14] Atrakeur. "ESP8266 vs ESP32, Lequel choisir?" Atrakeur Blog. [Online]. Available: https://www.atrakeur.com/blog/diy/esp8266-vs-esp32-lequel-choisir/. [Accessed: Apr. 13, 2025].

[15] W. Silen, T. E. Machen, et J. G. Forte, « Acid-base balance in amphibiangastricmucosa », *Am. J. Physiol.*, vol. 229, no. 3, p. 721–730, sept. 1975, doi: 10.1152/ajplegacy.1975.229.3.721.

[16] A. Schmoldt, H. F. Benthe, and G. Haberland, "Digitoxinmetabolism by rat liver microsomes," *BiochemicalPharmacology*, vol. 24, no. 17, pp. 1639–1641, Sep. 1975.

[17] B. Hail, "Conception et réalisation d'un système de surveillance de température automatique par une carte intelligente WiFi (IoT)," *Mémoire de Master*, Université de Tlemcen, Algérie, 2024.

[18] L. Ballejos, "Qu'est-ce qu'un système embarqué ?", *NinjaOne*, 31 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur : https://www.ninjaone.com/fr/it-hub/endpoint-management/quest-ce-quun-systeme-embarque/. [Consulté le : 1 mai 2025].

[19] M. Idres, *Conception et réalisation d'un système de sécurité domotique complet à base d'un système de microcontrôleur ESP32*, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Faculté de Génie Electrique et Informatique, Département d'Informatique, Algérie, 2020.

[20] iStockphoto contributor, "Chinese farmer wearing hat and animal skin." Available online :https://www.istockphoto.com/fr/photo/homme-chinois-asiatique-berger-paysanne-en-chapeau-et-de-la-peau-animale-gm472145369-33938904/. [Consulté le : juin 2025].

[21] Vimanam.in, "Homepage." Available online: https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.vimanam.in%2F&psig=AOvVaw0M0pYLojV283PEa9t6r4ad&ust=1751051106187000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBMQjhxqFwoTCIC2_K-bko4DFQAAAAAdAAAAABAE/ . [Consulté le : juin 2025].

[22] Intenso, "Weather Man 7 Bedienungsanleitung (User Manual)." Available online: http://cdn.billiger.com/dynimg/CuD8yFvgzBjaSWI0-1uw-Xt4H9rycHjeBa9LTdXG2DAJ5Igz8NW5kNH1GscxbhcOCpPNhEPDnOs9sx3a3qeYjE/Intenso-Weather-Man-7-Bedienungsanleitung-47ad3b.pdf/ . [Consulté le : juin 2025].

[23] Adobe Stock, "Search results for thermomètre." Available online: https://stock.adobe.com/fr/search?k=thermom%C3%A8tre/. [Consulté le : juin 2025].

[24] Reichelt, "Arduino - capteur magnétique à effet Hall linéaire." Available online: https://www.reichelt.com/fr/fr/shop/produit/arduino_-_capteur_magnetique_a_effet_hall_lineaire-282517/. [Consulté le : juin 2025].

[25] ZPAG.net, "Humidité." Available online: https://www.zpag.net/Meteo/humidite.htm/ . [Consulté le : juin 2025].

[26] ZPAG.net, "Rayonnement et insolation." Available online: https://www.zpag.net/Meteo/Messure/rayonnement_et_insolation.htm/ . [Consulté le : juin 2025].

[27] Shutterstock, "Search results for cup anemometer." Available online: https://www.shutterstock.com/search/cup-anemometer/ . [Consulté le : juin 2025].

[28] Blynk Community, "Reading a tipping bucket rain gauge." Available online: https://community.blynk.cc/t/reading-a-tipping-bucket-rain-gauge/9260/ . [Consulté le : juin 2025].

[29] FAO, "Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements – FAO Irrigation and drainage paper 56." Available online: https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm/ . [Consulté le : juin 2025].

[30] H. Megnafi, *Système à micro contrôleur – EasyPIC V7*, École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, 2024. Available online: http://thesis.essa-tlemcen.dz/bitstream/handle/STDB_UNAM/506/polycopie%20Syst%C3%A8me%20%C3%A0%20micro%20contr%C3%B4leur%20–%20EasyPICV7-%2007%2005%202024.pdf?sequence=1&isAllowed=y/ . [Consulté le : juin 2025].

[31] Facebook, "Momoevrywher page." Available online: https://www.facebook.com/momoevrywher/ . Consulté le : juin 2025.

[32] PiShop Blog, "What is BME280: Pinout, Specifications, Working." Available online: https://blog.pishop.co.za/what-is-bme280-pinout-specifications-working/ . Consulté le : juin 2025.

[33] AliExpress, "Capteur anémomètre avec interrupteur magnétique." Available online: https://www.aliexpress.com/item/1005005215861587.html/ . Consulté le : juin 2025.

[34] PCE Instruments, "Technical data sheet - PCE product." Available online: https://www.pce-instruments.com/english/api/getartfile?_fnr=1562261&_dsp=inline/ . Consulté le : juin 2025.

[35] AliExpress, "Produit 1005007202570111." Available online: https://fr.aliexpress.com/item/1005007202570111.html/ . Consulté le : juin 2025

[36] PCE Instruments, "Air Flow Meter - KWG1." Available online: https://www.pce-instruments.com/english/measuring-instruments/test-meters/air-flow-meter-pce-instruments-air-flow-meter-kwg1-det_4606632.htm/ . Consulté le : juin 2025.

[37] Amazon.ae, "Wireless Transmitter Transducer Anemometer Instruments." Available online: https://www.amazon.ae/Wireless-Transmitter-Transducer-Anemometer-Instruments/dp/B0C96WRQ4D/ . Consulté le : juin 2025.

[38] Alibaba, "GY-302 BH1750 Light Intensity Illuminance Sensor." Available online: https://www.alibaba.com/product-detail/GY-302-BH1750-Light-Intensity-Illuminance_1601254600843.html/ . Consulté le : juin 2025.

[39] Kogan, “WH-SP-RG Weather Meter Rain Gauge for Misol Accessories.” Available online: https://www.kogan.com/au/buy/junchang-wh-sp-rg-weather-meter-rain-gauge-for-misol-accessories-hs65721/ . Consulté le : juin 2025.

[40] Nettigo, “SIM800L GSM GPRS Module - Spring Antenna.” Available online: https://nettigo.eu/products/sim800l-gsm-grps-module-spring-antenna/ . Consulté le : juin 2025.

[41] Amazon.in, “xcluma T-Call Wireless Antenna SIM800L.” Available online: https://www.amazon.in/xcluma-T-Call-Wireless-Antenna-SIM800L/dp/B0973D7ZH3/ . Consulté le : juin 2025.

[42] Components101, “ADS1115 Module with Programmable Gain Amplifier.” Available online: https://components101.com/modules/ads1115-module-with-programmable-gain-amplifier/ . Consulté le : juin 2025.

[43] Pololu, “Image view of a sensor module.” Available online: https://www.pololu.com/picture/view/0J4057/ . Consulté le : juin 2025.

[44] CanoProf, “Cinquième énigme - Jeu éducatif SNT.” Available online: https://cedric-lelievre.canoprof.fr/eleve/2SNT/escapegameSNT/co/Cinquieme_enigme.html/ . Consulté le : juin 2025.


(guide du projet)
Pour obtenir un diplôme/startup
Dans le cadre de l'Arrêté Ministériel 1275
juin
2025
CNCSIIU
MHESR
ALGERIA

Sommaire

1. Equipe d'encaderement 70

Le premier axe **71**

1. Idée du projet (la solution proposée) 72

2. Les valeurs ajoutées du projet de station météorologique intelligente 73

3. L'équipe de travail 74

4. Les objectifs de projet 74

5. Tableau chronologique du projet 75

Deuxième axe **77**

1. Nature de l'innovation 78

2. Domaines de l'innovation **78**

1. Nouveaux processus 78

1. L'analyse du secteur du marché 81

1.1 Le marché potentiel 81

1.2 Le marché cible 81

2. Mesurer l'intensité de la concurrence 82

1. Stations météorologiques intelligentes étrangères 82

3. Le mix marketing 84

Quatrième axe 88

1. Le processus de production 89

2. Politique d'approvisionnement 90

1. Politique d'achat 90

2. Principaux fournisseurs 91

3. Politique de distribution 91

4. Partenaires principaux du projet 93

Cinquième Axe 94

1. Les Coûts et charges 95

2. La main-d'œuvre(en Dinar Algérien) 96

3. Dépenses diverses (en Dinar Algérien) 96

4. Tableau des amortissements (en Dinar Algérien) 97

5. ..... **Ventes Mensuelles (en Dinar Algérien)** 98

6. **Résumé Financier Mensuel** (en Dinar Algérien) 98

Sixième axe 99

Liste des annexes 87

1. Equipe d'encaderement

Encadrant principal : dr. chadli samir	**Spécialité :** Doctor universitaire, spécialisé en électronique instrumentation
Co-encadrant 01 : dr. Ben Gharbia billel	Spécialité : Doctor universitaire, spécialisé e systèmes embarqués, l'IoT.



2. Equipe de travail

Équipe de projet (à titre indicatif)	Faculté	Spécialité
Étudiant 01 : Bahloul Meroua Ikram	TECHNOLOGIE	système Télécommunication



Le premier axe

Présentation de projet



1. Idée du projet (la solution proposée)

Notre domaine d'activité s'inscrit dans le secteur agricole, plus précisément dans le soutien à l'agriculture de précision à travers le développement d'une station météorologique intelligente basée sur les technologies de communication cellulaire (GSM). Cette solution permet aux agriculteurs d'accéder à des données climatiques précises et en temps réel, afin de prendre des décisions efficaces visant à améliorer la productivité, assurer une qualité durable, et optimiser l'utilisation des ressources naturelles telles que l'eau et l'énergie.

Face aux pressions économiques et à la rareté des ressources, l'agriculteur algérien fait face à d'importants défis dans la gestion de son activité agricole, notamment en raison du manque d'outils de surveillance efficaces et de technologies capables de fournir des données vitales directement depuis le terrain. De plus, l'absence de sensibilisation quant à l'importance de l'agriculture de précision et de la planification basée sur les données constitue un obstacle majeur au passage vers un modèle de production plus intelligent et durable, notamment dans les zones rurales.

Notre station intelligente vise à répondre à ces problématiques en collectant des données climatiques (température, humidité, pression, etc.) via des capteurs intégrés à la carte ESP32 T-Call SIM800L, laquelle permet la transmission des données via le réseau mobile vers une application web ou mobile. Ces données sont ensuite stockées automatiquement dans une base de données locale ou cloud, permettant ainsi à l'agriculteur d'y accéder ultérieurement pour analyser les évolutions climatiques et effectuer une planification à long terme. Ces données lui permettent également de suivre les conditions météorologiques en temps réel et de recevoir des alertes concernant l'apparition de changements climatiques soudains.

Notre projet constitue un outil pratique, simple dans sa forme mais efficace dans sa fonction. Il intègre une technologie à faible coût et facile à utiliser au service d'une agriculture durable.

Il ouvre également de nouvelles perspectives aux agriculteurs en Les incitant à adopter des pratiques agricoles intelligentes, basées sur des données scientifiques plutôt que sur l'intuition ou l'imitation. Cela renforce leur capacité à s'adapter aux fluctuations du marché et aux risques climatiques.

Ce projet s'inscrit dans une approche organisationnelle et économique visant à améliorer la productivité et à réduire les coûts. Il peut également être évolutif et intégré à d'autres solutions

numériques (telles que l'intelligence artificielle ou les bases de données cloud), afin de devenir plus complet et mieux adapté aux besoins du terrain agricole.

La wilaya de Médéa a été choisie comme site pilote pour la mise en œuvre du projet, en raison de sa position géographique stratégique reliant le nord (zone de culture des agrumes) au sud (zone de mise en valeur des terres agricoles), ce qui en fait un point de liaison central permettant d'évaluer l'efficacité du projet dans deux environnements agricoles distincts.

2. Les valeurs ajoutées du projet de station météorologique intelligente

1. **Innovation :** Notre produit constitue une solution innovante et moderne sur le marché algérien, reposant sur des technologies avancées pour mesurer et analyser les données climatiques au service de l'agriculture de précision.
2. **Performance :** Le système offre une performance initiale estimée à 70 %, un niveau supérieur aux attentes des agriculteurs qui se basent généralement sur des prévisions générales ou des estimations empiriques.
3. **Adaptabilité et intégration :** La station est conçue pour être facilement intégrable avec d'autres technologies telles que l'intelligence artificielle, l'irrigation automatique et les systèmes de surveillance des serres agricoles, ouvrant ainsi la voie à des évolutions futures.
4. **Réduction des risques :**Elle permet d'anticiper les aléas climatiques (sécheresse, humidité excessive, vagues de gel, etc.) et de prévenir les maladies des plantes, contribuant ainsi à la réduction des pertes agricoles.
5. **Accessibilité locale :** En tant qu'alternative locale aux stations importées, souvent retardées par les procédures de livraison ou les problèmes logistiques, notre produit est disponible rapidement et avec un service d'assistance de proximité.
6. **Facilité d'utilisation :** L'interface a été pensée pour être intuitive et simple, accessible même aux agriculteurs peu familiarisés avec les technologies, grâce à un affichage visuel clair et des alertes directes.
7. **Prix compétitif :** Le produit est proposé à un prix abordable, bien inférieur à celui des stations météorologiques importées, tout en maintenant un bon niveau de qualité et de fiabilité.
8. **Suppression des abonnements payants :** Contrairement à d'autres solutions qui nécessitent des abonnements pour accéder aux services de données ou de cloud, notre

station fonctionne sans frais récurrents, réduisant ainsi les coûts d'exploitation à long terme.

3. L'équipe de travail

L'équipe de travail constitue la pierre angulaire de la réussite du projet. Grâce à une collaboration efficace, une répartition judicieuse des rôles et une définition précise des objectifs, le projet est guidé vers des résultats concrets, réalistes et applicables sur le terrain. Cette organisation permet d'assurer la viabilité, la cohérence et la durabilité de la solution proposée.

Nom et Titre	Spécialité	Rôle
Dr.chadlisamir	Dr universitaire, spécialisé en électronique instrumentation	Encadrant .porteur de l'idée et chef d'équipe du projet
Dr. ben GharbiaBillel	Dr universitaire, spécialisé en système embarque	Sous-encadrant. responsable de relation externe des projets
Bahloulmerouaikram	Étudiante en 2e année Master en système télécom	Responsable du projet sur le terrain

4. Les objectifs de projet

Sur la base de la planification préalable du projet, nous aspirons à réaliser des ambitions futures réfléchies, qui se concrétisent par un ensemble d'objectifs stratégiques visant à :

1. **Atteindre une première base d'utilisateurs :**

   Cibler 1 % des exploitations agricoles en Algérie, soit environ **11 180 exploitations**, durant la première année après le lancement.

2. Assurer la disponibilité du produit sur toutes les plateformes de vente en ligne telles que Alibaba, AliExpress et Temu, de manière à ce que ces canaux représentent 20 % des bénéfices totaux.
3. Assurer une campagne de marketing sur le terrain auprès des coopératives agricoles, avec un objectif de 200 unités distribuées par coopérative.
4. La promotion se fera par la participation à deux grands salons agricoles avant la fin de l'année 2026 : le salon international SIPSA-FILAHA & AGROFOOD à Alger, et le Salon national de l'agriculture saharienne à Adrar ou Ouargla.

5. Tableau chronologique du projet

Ce document vise à présenter un tableau détaillé pour la mise en œuvre du projet « Station météorologique connectée », en mettant l'accent sur les phases clés et les activités essentielles nécessaires à l'atteinte des objectifs économiques fixés. Ce calendrier constitue une partie intégrante d'un plan d'action global, visant à démontrer la viabilité économique du projet ainsi que la possibilité de générer un retour sur investissement efficace et durable.

Tableau 1.2: Tableau chronologique du projet.

Activités	Mois 1	Mois 2	Mois 3	Mois 4	Mois 5	Mois6jusqu 12
Études préliminaires: Choix du site, préparation des documents requis	✔					
Demand d'équipements		✔	✔			
Location d'un atelier de production			✔			
Constitution d'une équipe solide			✔			
Acquisition des matières premières				✔		
Début de la première production					✔	
Début des profits						✔



Deuxième axe

Aspect innovants



L'accélération technologique que connaît le monde aujourd'hui impose de grands défis aux pays du tiers-monde. Le retard dans l'adoption de ces avancées creuse davantage le fossé du sous-développement. Ces pays sont donc appelés à balayer la poussière du retard et à

s'engager sérieusement sur la voie de la technologie et de l'innovation afin de garantir leur place dans l'économie numérique mondiale.

1. Nature de l'innovation

L'innovation technologique est un processus de développement ou de création d'une technologie concurrentielle et améliorée, capable de provoquer un changement notable dans les méthodes de production ou de prestation de services.

Elle ne se limite pas uniquement à l'invention de technologies radicales, mais englobe également l'amélioration des technologies existantes ou l'intégration de plusieurs technologies complémentaires.

Son objectif principal est de stimuler l'économie nationale et améliorer le niveau de vie, en abandonnant les méthodes traditionnelles au profit de technologies nouvelles, capables de soutenir un développement durable dans tous les secteurs d'activité.

Notre projet représente une innovation technologique destinée à résoudre un problème réel rencontré dans le secteur agricole, à savoir la difficulté de prévoir les variations climatiques et leur impact direct sur la production agricole. Cette innovation vise à promouvoir l'agriculture de précision en fournissant un outil intelligent et précis pour surveiller en temps réel les fluctuations météorologiques.

Cette station météorologique intelligente aide l'agriculteur à suivre les conditions environnementales de son champ de manière terrain et instantanée, ce qui contribue à améliorer la qualité de ses décisions quotidiennes, telles que le moment de l'irrigation ou de la récolte. De plus, cet outil permet l'envoi de notifications instantanées sur le téléphone mobile en cas de détection de conditions climatiques dangereuses (comme des vagues de chaleur, des vents violents ou une chute soudaine de la pression atmosphérique), permettant ainsi à l'agriculteur de prendre les mesures préventives nécessaires à temps.

2. Domaines de l'innovation

1. **Nouveaux processus**

Le projet repose sur la collecte en temps réel des données climatiques grâce à **l'Internet des objets (IoT)**, permettant une surveillance continue et automatisée des changements météorologiques sans intervention humaine. Les alertes sont envoyées directement au téléphone du cultivateur, facilitant une prise de décision rapide sur le terrain.

2. **Nouvelles fonctionnalités**

Le système propose des fonctionnalités intelligentes, telles que :

- l'envoi de notifications d'alerte en cas de risques climatiques,
- le suivi en temps réel des conditions météorologiques,
- une interface simple et intuitive, avec des possibilités d'évolution vers un contrôle automatisé de l'irrigation ou de la fertilisation.

3. Nouveaux clients

Le projet cible une nouvelle catégorie d'utilisateurs qui n'avaient pas accès auparavant à des solutions numériques :

- les petits et moyens agriculteurs,
- les investisseurs dans l'agriculture de précision,
- les coopératives et institutions agricoles souhaitant réduire les coûts et améliorer la productivité.

4. Nouvelles offres

Le produit propose une offre concurrentielle :

- un coût réduit par rapport aux solutions importées,
- sans abonnement mensuel,
- service de maintenance inclus,
- possibilité de personnalisation en fonction des cultures ou des régions.
- la mise à disposition d'une technologie intelligente à un prix local,des services après-vente adaptés,
- la promotion de l'adoption de solutions agricoles intelligentes sans infrastructures complexes.

Troisième Axe

Analyse stratégique de marché



Le marché est un espace économique, physique ou virtuel, où se rencontrent les forces de l'offre et de la demande. Les vendeurs (individus ou entreprises) y proposent leurs produits ou services, tandis que les acheteurs (particuliers, entreprises ou institutions) expriment leurs besoins dans le but de réaliser des échanges commerciaux selon des mécanismes qui déterminent les prix et les quantités échangées. Au sein de cet espace global, l'entreprise identifie ce qu'on appelle le marché stratégique, c'est-à-dire le segment de marché qu'elle choisit comme cible principale de son activité marketing et commerciale, car il offre des opportunités pour renforcer sa position concurrentielle, assurer une croissance durable et atteindre un succès à long terme, en proposant des produits ou des services adaptés aux besoins et aux spécificités de ce marché ciblé.

1. L'analyse du secteur du marché

1.1 Le marché potentiel

Le marché potentiel désigne l'ensemble des individus ou des organisations susceptibles d'être intéressés par un produit ou un service, que ce soit à court ou à long terme, qu'ils en aient connaissance ou non, et qu'ils disposent ou non des moyens pour l'acquérir immédiatement.
Le marché potentiel de notre solution, à savoir une station météorologique connectée, s'inscrit dans une logique de soutien à l'agriculture intelligente et durable. Cette solution répond à des besoins variés exprimés par plusieurs acteurs clés, à savoir :

- **Les professionnels du secteur agricole**, que ce soit dans le cadre d'une agriculture traditionnelle, moderne ou de précision, qui ont besoin d'un outil fiable pour surveiller les conditions climatiques en temps réel.
- **Les établissements d'enseignement et les instituts de recherche** œuvrant dans les domaines de l'agronomie, de l'environnement ou de la météorologie, susceptibles d'intégrer cette technologie dans leurs travaux d'étude et d'expérimentation.
- **Les ingénieurs agronomes, les laboratoires spécialisés dans l'analyse climatique,** qui peuvent utiliser les données collectées pour la gestion locale des ressources ou la sensibilisation environnementale.
- **Les organismes publics et les institutions gouvernementales** intéressés par la digitalisation du secteur agricole, la résilience climatique ou encore le développement de politiques de soutien aux agriculteurs.

1.2 Le marché cible

Le marché cible est la partie du marché potentiel qu'une entreprise choisit de viser spécifiquement, car il correspond le mieux aux caractéristiques de son produit et présente la plus grande probabilité de conversion en clients effectifs.

Notre projet s'adresse principalement aux acteurs du secteur agricole qui ont besoin de données climatiques précises et en temps réel pour optimiser leurs pratiques. Le marché cible comprend :

- Tous les agriculteurs, en particulier ceux engagés dans l'agriculture de précision.
- Les exploitants de serres (agriculture sous abris), qui ont besoin de surveiller de près l'humidité, la température et le rayonnement solaire.
- Les grandes exploitations agricoles et coopératives, souhaitant améliorer leur rendement et maîtriser les risques climatiques.
- Les ingénieurs agronomes et conseillers techniques, qui s'appuient sur les données pour fournir des recommandations pertinentes.
- Les institutions de formation et de recherche spécialisées dans l'agriculture, l'environnement et le climat.
- Les organismes gouvernementaux impliqués dans la digitalisation de l'agriculture ou la surveillance environnementale.
- Les start-up et investisseurs dans les technologies agricoles (AgriTech) à la recherche de solutions intelligentes et intégrées.

2. Mesurer l'intensité de la concurrence

La majorité des concurrents dans notre domaine sont des entreprises étrangères qui proposent des solutions technologiques avancées mais à des prix très élevés, souvent inaccessibles pour les agriculteurs locaux. Les tableaux suivants présentent une comparaison entre ces principaux concurrents, en mettant en évidence leurs points forts et leurs faiblesses.

1. Stations météorologiques intelligentes étrangères

Élément	Forces	Faiblesses
Technologie avancée	Capteurs précis, analyse des données, intelligence artificielle intégrée	Prix élevé pour les agriculteurs locaux en Algérie

Fiabilité et précision	Collecte de données fiables sur le long terme	Interface souvent non adaptée au contexte local (langue, culture agricole)
Services cloud	Accès à distance, stockage cloud, alertes en temps réel	Dépendance à une connexion Internet stable
Support technique	Accompagnement professionnel, documentation complète	Assistance souvent limitée ou inexistante en Algérie
Offre complète	Intégration avec d'autres outils agricoles	Abonnements annuels coûteux et complexité d'installation

2. Systèmes d'irrigation automatisés

Élément	Forces	Faiblesses
Gestion optimisée de l'eau	Permet une irrigation précise selon les besoins des cultures	Ne fournit pas de données climatiques complètes (température, humidité de l'air...)
Économie de ressources	Réduction de la consommation d'eau et d'énergie	Nécessite souvent des capteurs supplémentaires non intégrés
Automatisation	Fonctionnement automatique selon des seuils définis	Coût initial élevé, et difficulté d'entretien pour les agriculteurs peu formés
Amélioration du rendement	Irrigation contrôlée = meilleure productivité	Manque de polyvalence : système dédié uniquement à l'irrigation
Compatibilité	Peut être couplé à des stations météo	Intégration limitée sans modules complémentaires

3. Les drones Agricole

Élément	Forces	Faiblesses
Couverture rapide	Survole de grandes surfaces en peu de temps	Coût d'achat et de maintenance élevé
Précision de pulvérisation	Application ciblée des produits phytosanitaires	Réglementation stricte, parfois interdits dans certaines zones
Imagerie aérienne avancée	Détection des maladies, cartographie thermique .	Données non continues, pas de surveillance météo 24/7
Technologie de pointe	Intégration d'IA, GPS, capteurs multi spectraux	Besoin de formation technique poussée, inaccessibles pour les petits agriculteurs
Gain de temps et d'efficacité	Automatisme dans les tâches répétitives	Usage ponctuel, ne remplace pas une station météo dans la surveillance quotidienne

3. Le mix marketing

Le mix marketing est un ensemble d'éléments utilisés par les entreprises pour promouvoir leurs produits et services afin d'attirer l'attention de l'utilisateur, constituant ainsi une base fondamentale pour le marché cible.

L'image suivante illustre les sept éléments clés du marketing mix, qui représentent les piliers fondamentaux sur lesquels les entreprises s'appuient pour développer efficacement leurs stratégies marketing.



1. produit (Product)

- Les services offerts par le produit sont :

1. La mesure et la surveillance en temps réel des conditions climatiques pour faciliter les activités quotidiennes.
2. L'envoi des données à l'utilisateur via une interface ThinkSpeak et leur stockage dans une base de données consultable.
3. L'envoi d'alertes par message texte sur le téléphone de l'utilisateur en cas de fluctuations météorologiques graves.

- Les bénéfices de ce projet sont les suivants :

1. Amélioration de la production locale et soutien à l'agriculture intelligente.
2. Réduction des coûts agricoles et optimisation de la consommation d'eau.
3. Précision dans le travail agricole et prise de décisions rapides et adaptées avant toute activité.

- Les avantages concurrentiels sont les suivants :

1. Prix abordable comparé aux solutions existantes.
2. Possibilité de développement, d'extension et d'intégration avec d'autres systèmes.
3. Interface utilisateur conviviale et facile à utiliser.
4. Adapté aux zones isolées.
5. Résistant aux conditions météorologiques difficiles.

2. prix (price)

1. Tarification compétitive, inférieure aux produits importés, accessible à tous les agriculteurs.
2. Réductions accordées en cas d'achat en quantité ou en groupe.

3. Distribution (Place)

La distribution de notre produit se fait par commande en ligne ou par téléphone, ce qui permet un contact direct avec les clients et un support rapide et efficace. Nous nous appuyons également sur des bureaux de distribution agréés pour assurer une livraison régulière et couvrir les différentes zones agricoles.

4. Promotion (Promotion)

1. Campagnes publicitaires numériques sur Instagram ,Facebook, LinkedIn
2. Campagnes promotionnelles ciblant les coopératives agricoles

3. La participation aux salons technologiques vise à promouvoir le produit et à souligner l'importance de cette innovation technologique dans la dynamique du progrès technique et le soutien à l'innovation dans le domaine agricole.
4. Mise en vente du produit sur des plateformes d'achat en ligne : AliExpress, Alibaba, Temu

5. Vidéos pédagogiques sur YouTube pour présenter le produit et expliquer son utilisation

5. <u>Processus (process)</u>

1. La commande se fait via internet (site web ou application dédiée) avec plusieurs options de paiement : Paiement à direct , Paiement par mandat postal ou CCP, Paiement électronique via Baridi Mob ou dans un bureau de poste, avec obligation d'envoyer le reçu de paiement pour validation.

2. Après confirmation de la commande, le produit est préparé, expédié, et le client est informé de chaque étape (confirmation – préparation – expédition – livraison).

3. Un numéro de téléphone dédié (ou WhatsApp) est mis à disposition pour : Les réclamations, La demande d'assistance technique, Le suivi de la maintenance, afin de garantir un service après-vente efficace et rapide.

6. <u>Les Personnes (People)</u>

1. Des techniciens spécialisés chargés de l'intégration des capteurs dans l'atelier et de l'assemblage des composants pour fabriquer le produit final.
2. L'équipe marketing, qui prend également en charge la réception des notifications liées aux problèmes techniques, à la maintenance, et assure un service après-vente efficace.
3. Des techniciens de terrain se déplacent vers les exploitations agricoles pour installer la station, expliquer son fonctionnement aux agriculteurs, et effectuer la maintenance si nécessaire.

7. <u>Preuve physique (Physical Evidence)</u>

1. Un design moderne, adapté aux environnements agricoles extérieurs

2. Une application mobile intelligente permettant d'afficher les données météorologiques en temps réel sous forme de tableaux, de graphiques dynamiques et de cartes interactives.

3. Des rapports météorologiques détaillés sont générés automatiquement et stockés dans l'application, permettant aux agriculteurs de consulter les données passées, d'identifier les tendances climatiques et de faciliter la prise de décision.

4. Une interface utilisateur intuitive, multilingue, avec la possibilité de personnaliser les alertes selon les paramètres critiques (comme une alerte de froid extrême ou de forte chaleur).
5. Des preuves concrètes de performance sur le terrain.

Quatrième axe

Plan de production et d'organisation



1. Le processus de production

1. Acquisition des matières premières

L'acquisition des matières premières constitue la première étape essentielle dans la chaîne de production de notre station météorologique connectée. Elle consiste à identifier et à acheter tous les composants nécessaires à l'assemblage du dispositif. Parmi ces éléments, on retrouve :

1. Les capteurs (température, humidité, pression atmosphérique, luminosité, etc.).
2. Les boîtiers de protection résistants aux conditions climatiques extrêmes (pluie, poussière, chaleur…).
3. Les câbles de connexion internes permettant de relier les capteurs à l'unité centrale de traitement.
4. Les câbles de connexion externes destinés à l'alimentation électrique de la station (via une batterie ou un panneau solaire).

2. Test des capteurs

Avant l'intégration des capteurs dans la station météorologique, chaque capteur est soumis à un test individuel approfondi afin de vérifier son bon fonctionnement et sa fiabilité. Cette étape constitue une mesure préventive essentielle permettant de détecter toute défaillance éventuelle en amont, évitant ainsi les difficultés de diagnostic une fois le système assemblé, et garantissant la fiabilité des données climatiques collectées.

3. La programmation efficace

La programmation commence par la connexion des différents capteurs entre eux, suivie de leur configuration via la plateforme Arduino. Cette étape permet de vérifier que chaque composant fonctionne correctement et que l'ensemble du système est opérationnel.

4. Assemblage et conception

Le processus d'assemblage consiste à intégrer les capteurs en tenant compte de la sensibilité de chaque composant, afin d'assurer leur bon fonctionnement. Une fois cette étape

achevée, on passe à la phase de conception, qui permet d'adapter l'ensemble aux besoins du projet et aux caractéristiques du produit final.

5. Vente et livraison

La vente s'effectue directement depuis l'atelier ou via des bureaux de distribution, avec un service de livraison pour les zones isolées. Il est également possible de se déplacer chez l'agriculteur pour installer la station et choisir l'emplacement le plus adapté, garantissant ainsi une performance optimale, notamment pour les agriculteurs disposant de terres variées ou éloignées.

6. Après-vente

1. Recueillir les retours d'expérience, les évaluations et même les critiques des agriculteurs afin d'assurer une relation solide entre le vendeur et le client.
2. Assurer la maintenance et se déplacer sur les sites d'exploitation pour intervenir directement.

2. Politique d'approvisionnement

1. Politique d'achat

1.1 Critères de sélection

1. Les équipements et les logiciels doivent être conformes aux exigences du projet en termes de performance et de fiabilité.
2. Ils doivent respecter les normes de qualité.
3. Le prix : il doit être conforme au budget du projet tout en tenant compte du rapport qualité/prix.

1.2 Procédures d'achat

1. Une demande d'offres est envoyée à des fournisseurs agréés.
2. Les offres sont analysées en fonction de la qualité des produits, du prix et des services après-vente.
3. Le fournisseur le plus approprié est sélectionné sur la base de cette analyse.

2. Principaux fournisseurs

1. Fournisseurs locaux ils sont sollicités pour fournir rapidement les capteurs et composants à un coût approprié.
2. Fournisseurs en ligne comme les plateformes AliExpress ou Alibaba, pour l'acquisition de composants précis ou indisponibles localement**.**

3. Politique de distribution

1. La vente se fait directement depuis l'atelier ou via des distributeurs agréés.
2. Commande possible par internet ou par téléphone.
3. Possibilité de livraison dans des zones isolées et installation de la station sur le terrain.

3. Main-d'œuvre

Après l'expansion du projet, nous pourrons recruter davantage de personnel. Mais actuellement, nous disposons de **7 travailleurs** dont les rôles sont les suivants :

1**. Responsable d'atelier (Chef d'atelier)**

- **Tâches** :
    1. Gérer le travail de l'atelier et organiser l'équipe.
    2. Contrôler le respect des consignes et renforcer la sécurité.
    3. Maintenir la propreté et l'organisation du matériel.
- **Expérience requise** : Gestion d'ateliers techniques ou industriels.

2. Technicien en électronique expérimenté (Technicien en électronique)

- **Tâches** :
    1. Tester et mettre en service les capteurs.
    2. Monter et faire fonctionner les circuits et microcontrôleurs (ESP32, capteurs…).
    3. Assurer la performance électronique et l'intégration des composants.
    4. Réaliser des connexions électriques sûres et efficaces.
    5. Installer les capteurs mécaniques (anémomètre, girouette…).

- **Expérience requise** : Assemblage électronique de précision et systèmes embarqués.

3. <u>Technicien mécanique / structure métallique</u>

1. **Tâches** :
    1. Monter la structure externe de la station.
    2. Installer les capteurs mécaniques (anémomètre, girouette…).
2. **Expérience requise** : Assemblage mécanique et soudure fine des structures.

4<u>. Développeur embarqué et responsable des communications</u>

- **Tâches** :

1. Programmer les microcontrôleurs (ESP32, Arduino…).
2. Créer des interfaces web et relier les appareils aux bases de données.
3. Installer et configurer les modules GSM/GPRS, Wi-Fi et LoRa.
4. Assurer la connexion entre la station et le serveur (local/cloud).

1. **Expérience requise** : Langage Arduino, bases de données et technologies de communication.

5. <u>Responsable maintenance et support technique sur terrain</u>

- **Tâches** :
    1. Se déplacer vers les sites pour l'installation et la maintenance.
    2. Choisir l'emplacement optimal et installer la station.
    3. Tester la station sur le terrain et assurer sa fiabilité.
- **Expérience requise** : Diagnostic des pannes techniques et compétences en communication.

6<u>. Responsable marketing et service après-vente</u> (Responsable marketing et SAV)

- **Tâches** :
    1. Réceptionner et confirmer les commandes clients.
    2. Promouvoir le projet via les médias et la communication directe.
    3. Assurer le suivi des clients et le support après-vente.
    4. Gérer les relations avec les partenaires et les distributeurs.
- **Expérience requise** : Marketing digital, gestion de la relation client.

7. Responsable financier et comptabilité

- **Tâches** :
    1. Gérer le budget et les dépenses générales.
    2. Traiter les factures, impôts et loyers.
    3. Maintenir les relations avec les fournisseurs et superviser les achats.
- **Expérience requise** : Comptabilité, gestion financière des projets, négociation fournisseurs.

4. Partenaires principaux du projet

1. L'incubateur Yahia Farès : Apporte un soutien en matière d'accompagnement, d'encadrement et d'incubation technique du projet.
2. L'établissement public de soutien aux projets entrepreneuriaux : Fournit un appui financier et administratif.
3. Le ministère de l'Agriculture : Représenté par la direction chargée de la numérisation et du développement du secteur agricole, pour intégrer le projet dans les stratégies nationales de digitalisation.
4. Les coopératives agricoles participent à la mise en œuvre pratique du projet à travers la création de fermes pilotes destinées à tester et évaluer l'efficacité de la station météorologique intelligente sur le terrain.

Cinquième Axe

Plan financier



Créer un plan financier est une étape importante pour savoir si une entreprise peut réussir avant même de la lancer. Ce plan aide à comprendre combien d'argent il faut, combien on peut gagner, et comment gérer les dépenses. Grâce à cela, on peut mieux organiser le travail sur le moyen et long terme. Le plan financier sert donc de guide pour avancer de manière claire et éviter les problèmes. Il permet aussi de prendre de bonnes décisions pour atteindre les objectifs fixés.

1. Les Coûts et charges

Les coûts et les charges constituent la colonne vertébrale de la rentabilité et de la prise de décisions financières. Dans le monde des affaires et de la comptabilité, comprendre les coûts et les charges est un élément crucial pour l'analyse de la rentabilité, la détermination des prix et la prise de décisions stratégiques éclairées. Chacun d'eux a une signification comptable et managériale différente : les coûts représentent la valeur monétaire des ressources utilisées dans la production de biens, tandis que les charges sont les paiements effectifs et les engagements financiers de l'entreprise.

Les coûts financiers nécessaires pour produire du produit final :

Matérielle	Nombre	Prix	Prix annuel
Bureau de réception	01	20000	20000
Bureau de travaille	01	14000	14000
chaise de réception	02	3200	6400
Chaise de travail	03	10000	30000
Pc	01	100000	100000
Imprimante	01	35000	35000
Fer a' soudé	02	2000	4000
Perceuse	01	2500	2500

La somme	/	/	211900

2. La main-d'œuvre(en Dinar Algérien)

Les ressources humaines sont le cœur battant de l'entreprise. Elles ne sont pas simplement un outil d'exécution, mais un atout stratégique qui détermine le succès ou l'échec de toute organisation. Lorsqu'elles sont gérées efficacement, notamment à travers un système équitable de salaires et de primes, cela se reflète sur la productivité des employés, leur loyauté envers l'entreprise, et la réputation de celle-ci sur le marché du travail.

Personne	**n**	**Salair**	**Cnas**	**Prix total**	**Prix d'année**	**Prix de tout**
Responsable d'atelier	01	65000	16900	81900	982800	982800
Technicien électronique	02	50000	13000	63000	756000	1512000
Développeur et respode télécommunication	01	60000	15600	75600	907200	907200
Respo maintenance sur le terrain	01	50000	13000	63000	756000	756000
Respo marketing et service après vent	01	50000	13000	63000	756000	756000
Responsable financier et comptabilité	01	50000	13000	63000	756000	756000
Total	07	325000	84500	409500	5595000	5670000

3. Dépenses diverses (en Dinar Algérien)

	jan	fev	mar	avr	mai	juin	jult	out	sept	ouc	nov	dec	tot
loyer	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	30000	360000
f.electricite	15000			15000			15000			15000			60000
internet	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	2500	30000
f.d'eau	1500			1500			1500			1500			6000

4. Tableau des amortissements (en Dinar Algérien)

Il est défini comme la diminution progressive de la valeur des immobilisations corporelles telles que les équipements et les machines en raison de leur utilisation ou de l'évolution technologique. Ce concept est utilisé dans l'analyse financière et comptable pour répartir le coût de l'actif sur sa durée de vie utile estimée.

Equipements	Montant amortissable	Taux d'amortissement	L'amortissement d'années
Équipements de bureau	107900	10%	10790
Équipements d' info	135000	25%	33750
Équipement électronique	6500	15%	975
Total	249400	/	45515

- Le Centre de soutien à l'entrepreneuriat de Médéa : vise à encourager les étudiants et les diplômés à adopter la culture du travail indépendant au lieu de dépendre entièrement de la fonction publique.

5. Ventes Mensuelles (en Dinar Algérien)

C'est un outil analytique et de planification utilisé en économie et en gestion des affaires pour suivre et visualiser la performance des ventes au cours d'un mois donné.

	jan	fevr	mars	avril	mai	juin	juillt	aout	sept	octo	nov	dec	total
Quantité	80			100			100			100			380
Prix d'unité	70000												
Prix total	26600000												

6. **Résumé Financier Mensuel** (en Dinar Algérien)

12	11	10	09	08	07	06	05	04	03	02	01	
216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	2216666	**Ventes mensuelles**
31951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	531951	**Coûts mensuels**
684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	1684714	**Bénéfice brut avant impôt**
20095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	320095	**Montant des taxes mensuelles**
364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	1364619	**Bénéfice net après impôt**
16375428												**Bénéfice net annuelle**

6. **tableau final**(en Dinar Algérien)

Cout et charge	6337900
amortissement	45515
Ventes Mensuelles	26600000
Bénéfice net annuelle	16375428

Sixième axe

Prototype expérimental







Conclusion

Notre startup vise à offrir une solution intelligente et pratique aux agriculteurs grâce à une station météorologique connectée qui les aide à améliorer leur production et à prendre des décisions précises. Le projet repose sur une équipe complète et un plan clair couvrant la fabrication, la distribution et le service après-vente. Cela nous distingue et nous donne une réelle chance de réussir sur le marché agricole.

Liste des annexes



Key Partners

- Incubateur Yahia Farès
- Centre de soutien à l'entrepreneuriat de Médéa
- Ministère de l'Agriculture
- Coopératives agricole
- Fournisseurs

Key Activities

- Conception et production Distribution (atelier, en ligne, distributeurs), Marketing, Service après-vente (installation, maintenance),

Key Resources

- Humaines : Équipe de 7 personnes
- Matérielles : Capteurs, boîtiers résistants, ESP32, équipements d'atelier
- Techniques : Arduino, ThingSpeak, base de données, réseau GSM.
- Financières : Soutien de l'incubateur Yahia Farès et du Centre de soutien à l'entrepreneuriat.

Value Propositions

Station intelligente à bas coût pour données météo en temps réel (température, humidité, pression), sans abonnement, interface simple, alertes SMS, soutien à l'agriculture de précision (productivité, réduction pertes, optimisation ressources), intégrable avec autre technologie .

Customer Relationship

Support technique (WhatsApp/téléphone), installation et formation sur site, collecte retours clients, campagnes de sensibilisation numériques et terrain.

Channel

- Vente directe
- Plateformes e-commerce (Ali baba, Ali Express, T'ému).
- Publicités .
- Salons agricoles
- Visites terrain

Customer Segments

- Agriculteurs (petits, moyens, serres, grandes exploitations)
- coopératives agricoles, institutions
- académiques/recherche, ingénieurs agronomes/conseillers,
- institutions publiques, entreprises Agri Tech.

Cost Structure

Coûts des matériaux
Coûts de la main-d'œuvre
Coûts généraux
Coûts d'amortissement

Revenue Stream

- Vente stations à prix compétitif
- réductions pour achats groupés
- ventes en ligne
- services installation/maintenance sans frais récurrents