

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE ET OPTIQUE

MEMOIRE

Présenté par :

SAHBATOU Amina

BENSALAH Nesrine

Pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Instrumentation et Métrologie

**Thème : Développement d'une Métrologie embarquée à faible
coût pour l'agriculture intelligente**

Soutenu le 25 Juin 2025, devant la commission d'examen

Dr CHREIT Amine	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Président
Dr GOURBI Abdelkader	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Examineur
Dr BENSIKADDOUR El Habib	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Encadrant

Année Universitaire 2024-2025

Sommaire

Ce travail pratique présente le développement d'un système de métrologie embarqué à faible cout destiné à l'agriculture intelligente, permettant la mesure de divers paramètres environnementaux du sol et de l'air.

Partant de là, notre objectif était de concevoir et de réaliser un système de capteurs connectés à une carte STM32F103C8T6 (Blue Pill) pour mesurer en temps réel des grandeurs telles que l'humidité du sol, la température, l'intensité lumineuse et la présence de pluie.

Deux configurations ont été testées : une première en local, avec affichage des données via un module UART, et une seconde en mode distant, où les données sont transmises sans fil à un Raspberry Pi grâce à des modules de communication nRF24L01, pour assurer la surveillance et l'analyse à distance.

Cette application permet une surveillance continue et à distance des conditions environnementales agricoles, ce qui ouvre la voie à une meilleure gestion des ressources et à une prise de décision plus éclairée pour les agriculteurs.

Abstract

This practical work presents the development of a low-cost embedded metrology system intended for smart agriculture, enabling the measurement of various environmental parameters of soil and air.

Based on this, our objective was to design and implement a sensor system connected to an STM32F103C8T6 (Blue Pill) board to measure in real time variables such as soil moisture, temperature, light intensity, and the presence of rain.

Two configurations were tested: a local test with data displayed via a UART module, and a remote test where data is wirelessly transmitted to a Raspberry Pi using nRF24L01 communication modules to ensure remote monitoring and analysis.

This platform allows continuous and remote monitoring of agricultural environmental conditions, paving the way for better resource management and more informed decision-making for farmers.

ملخص

يعرض هذا العمل التطبيقي تطوير نظام قياس مدمج منخفض التكلفة موجه للزراعة الذكية، يتيح قياس مختلف المعايير البيئية للتربة والهواء

وانطلاقاً من ذلك، كان هدفنا هو تصميم وإنجاز نظام يحتوي على مجموعة من الحساسات المتصلة بمعالج الحبة STM32F103C8T6. الزرقاء لقياس معطيات مثل رطوبة التربة، درجة الحرارة، شدة الاضاءة، ووجود المطر

UA تم اختبار هذا النظام في حالتين: الحالة الأولى محلية، حيث تعرض البيانات عبر وحدة خاصة

والحالة الثانية عن بعد، حيث ترسل البيانات لاسلكياً إلى معالج آخر لضمان المراقبة والتحليل عن بعد

يتيح هذا النظام مراقبة مستمرة وعن بعد للظروف البيئية الزراعية، مما يساهم في تحسين إدارة الموارد واتخاذ قرارات زراعية أكثر دقة.

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu Tout Puissant de nous avoir donné la force et la patience pour réaliser ce modeste travail et qui nous à faciliter notre chemin.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre encadrant monsieur

« BENSIKADDOUE EL HABIB » pour son accompagnement, sa disponibilité et la qualité de ses conseils tout au long de ce travail.

Nous présentons également notre profonde gratitude à monsieur « CHERIET Amine » et monsieur « GOURBI Abdelkader », qui nous ont fait l'honneur de s'intéresser à ce modeste travail et d'avoir accepté de le juger.

Et enfin à tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la présentation de ce mémoire.

Table des matières

Sommaire	ii
Remerciements	iv
Table des matières	v
Liste des abréviations	viii
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xi
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition et Importance de l'agriculture Intelligente	3
1.2.1 Les Révolutions de l'agriculture	4
1.2.2 Objectifs de l'agriculture Intelligente	5
1.2.3 Importance de Agriculture intelligente pour l'Algérie	7
1.3 Typologie de l'agriculture intelligente	8
1.4 Technologies Clés du l'agriculture intelligente	10
1.4.1 Les technologies d'acquisition et d'automatisation	12
1.4.2 Les technologies de transmission de données	17
1.4.3 Internet des objets agricoles (Agri-IoT)	19
1.4.4 Intelligence Artificielle et agriculture intelligente	19
1.5 Défis de l'Agriculture Intelligente	21
1.5.1 Coûts initiaux élevés	21
1.5.2 Accès limité dans les zones rurales	21
1.5.3 Manque de connaissances techniques	21
1.5.4 Risques liés à la sécurité des données	22
1.6 Conclusion	22
Chapitre 2 : Conception du Système de métrologie embarquée	23
2.1 Introduction	23
2.2 Métrologie embarquée	23

2.3	Plan de développement	25
2.3.1	Définition des exigences	26
2.4	Architecture de ME	27
2.5	Sélection du processeur	27
2.5.1	Le cœur de la carte Blue Pill	29
2.6	Conception de hardware	29
2.6.1	Bloc Capteurs météorologiques	30
2.6.2	Bloc Capteurs Agricoles	31
2.6.3	Bloc Communication	31
2.6.4	Bloc Afficheur	33
2.6.5	Bloc d'énergie	34
2.6.6	Prototype de métrologie embarqué réalisé	35
2.7	Conception de software	36
2.7.1	Utilisation du RTC (Real-Time Clock)	38
2.7.2	Gestion du mode veille (Sleep Mode)	38
2.7.3	Logiciels utilisés dans notre projet	38
2.8	Conclusion	39
Chapitre 3 : Réalisation, Tests et Résultats		40
3.1	Introduction	40
3.2	Test de fonctionnement en mode local	40
3.2.1	Application Python développée	40
3.3	Tests et validation des capteurs via PyCharm	42
3.3.1	Test du capteur DHT11 (Température et humidité)	43
3.3.2	Test du capteur FC-28 (Humidité du sol)	44
3.3.3	Test du capteur MH-RD (Détection de pluie)	46
3.3.4	Test du capteur LDR (Lumière ambiante)	47
3.3.5	Test du système complet avec tous les capteurs	48
3.4	Test de fonctionnement en mode distant	49
3.4.1	Architecture du système en mode distant	50
3.4.2	Essai initial avec Raspberry Pi 4 (tentative échouée)	51
3.4.3	Passage au Raspberry Pi Pico et réception des données	53

3.5 Perspectives d'amélioration	54
3.6 Conclusion	55
Conclusion générale	56
Annexe A Schéma électrique de la carte conçue	57
A.1 Le schéma électrique du module conçu	57
A.1.1 Schéma électrique des capteurs météorologiques	58
A.1.2 Schéma électrique des capteurs agricoles	58
A.1.3 Schéma électrique du module nRF24L01	59
A.1.4 Schéma électrique du afficheur LCD	59
Annexe B Vues 3D du prototype conçu	60
B.1 Vues 3D de la carte prototype développée	60
Annexe C Circuit imprimé développé.....	61
C.1 Top layer du circuit imprimé	61
C.2 Bottom layer du circuit imprimé	61
Bibliographie.....	62

Liste des abréviations

IoT - Internet des objets (Internet of Things)

IA - Intelligence Artificielle (Artificial Intelligence)

UART - Universal Asynchronous Receiver Transmitter

RF - Radio Fréquence

SPI - Serial Peripheral Interface

I2C - Inter-Integrated Circuit

ADC - Analog-to-Digital Converter

GPIO - General-Purpose Input/Output

RTC - Real-Time Clock

PWM - Pulse Width Modulation

USB - Universal Serial Bus

LiDAR - Light Detection and Ranging

RGB - Rouge, Vert, Bleu (Red, Green, Blue)

UAVs - Unmanned Aerial Vehicles (Drones)

LoRaWAN - Long Range Wide Area Network

MQTT - Message Queuing Telemetry Transport

LCD - Liquid Crystal Display

LED - Light-Emitting Diode

PCB - Printed Circuit Board (Circuit Imprimé)

NE555 - Circuit intégré temporisateur

Li-ion - Lithium-ion

DC-DC - Convertisseur de tension continu à continu

ARM - Architecture de processeur (Advanced RISC Machine)

Cortex-M3 - Cœur de processeur ARM

STM32 - Famille de microcontrôleurs STMicroelectronics

SSH - Secure Shell (protocole de communication sécurisé)

DHT11 - Capteur de température et d'humidité

FC-28 - Capteur d'humidité du sol

MH-RD - Capteur de pluie

LDR - Light Dependent Resistor (photorésistance)

ME – Métrologie Embarqué

Liste des tableaux

<i>Tableau 1-1. Les projets prometteurs dans l'agriculture intelligente en Algérie. [6]</i>	8
<i>Tableau 1-2. Technologie à courte portée (Couche 1 → Couche 2) [20-25].</i>	17
<i>Tableau 1-3. Technologie à longue portée (Couche 1 → Couche 2) [26].</i>	18
<i>Tableau 1-4. Technologies cellulaires (Couche 2 → Couche 3). [27]</i>	18
<i>Tableau 2-1. Les exigences fonctionnelles de la métrologie embarquée.</i>	26
<i>Tableau 2-2. Les exigences non fonctionnelles de la métrologie embarquée.</i>	26
<i>Tableau 2-3. Comparaison entre Arduino Nano et Blue Pill. [9]</i>	28
<i>Tableau 2-4. Fonctionnalités du cœur ARM Cortex-M3 32 bits</i>	29
<i>Tableau 2-5. Capteurs météorologiques sélectionnés.</i>	30
<i>Tableau 2-6. Capteurs agricoles sélectionnés.</i>	31
<i>Tableau 2-7. Les trois protocoles utilisés : UART, SPI et Enhanced ShockBurs [17], [18], [19]</i>	33
<i>Tableau 2-8. Moyens d'alimentation du système [22], [23]</i>	35
<i>Tableau 2-9. Fonctionnalités logicielles principales.</i>	37
<i>Tableau 2-10. Logiciels utilisés pour la conception de ME</i>	39
<i>Tableau 3-1. Connexions et fonction des capteurs et modules réalisées dans STM32CubeIDE</i>	43
<i>Tableau 3-2. Outils de Software utilisés</i>	51
<i>Tableau 3-3. Branchement du Raspberry Pi Pico avec nRF24L01</i>	53

Liste des figures

<i>Figure 1-1. Les révolutions de l'industrie et de l'agriculture. [3]</i>	5
<i>Figure 1-2. Cycle de gestion typique de l'agriculture intelligente. [5]</i>	5
<i>Figure 1-3. Cycle de gestion typique de l'agriculture intelligente. [5]</i>	7
<i>Figure 1-4. Agriculture intelligente en champ ouvert [10].</i>	9
<i>Figure 1-5. Serre Intelligente [11].</i>	9
<i>Figure 1-6. Agriculture verticale intelligente [12]</i>	10
<i>Figure 1-7. Les technologies typiques dans les différentes couches de l'Architecture de l'agriculture intelligente [5].</i>	11
<i>Figure 1-8. Classification des capteurs utilisés en agriculture intelligente.</i>	13
<i>Figure 1-9. Cartographie de rendement à partir des mesures réalisées par capteur embarqué sur une moissonneuse-batteuse [43]</i>	14
<i>Figure 1-10. Types d'images utilisées dans l'agriculture intelligente [14].</i>	14
<i>Figure 1-11. Utilisation des drones Agricole (UAVs) dans la récolte, l'irrigation, la cartographie, et la détection [16].</i>	16
<i>Figure 1-12. Tracteur autonome [17]</i>	16
<i>Figure 1-13. Robots de désherbage autonomes [18]</i>	16
<i>Figure 1-14. Réseaux utilisés dans la couche de connectivité de l'architecture agricole intelligente [5].</i>	17
<i>Figure 1-15. Internet des objets agricoles (Agri-IoT) [29].</i>	18
<i>Figure 1-16. Les Applications de l'Intelligence Artificielle en Agriculture. [34]</i>	19
<i>Figure 2-1. Exemples des stations de mesure [2, 3]</i>	24
<i>Figure 2-2. L'utilisation des deux types de stations ensemble dans le même système [4].</i>	24
<i>Figure 2-3. Exemple d'une station agrométéorologique et des paramètres qu'elle peut mesurer [5].</i>	25
<i>Figure 2-4. Plan de développement de notre projet [6]</i>	25
<i>Figure 2-5. Architecture bloc de notre Métrologie embarquée</i>	27
<i>Figure 2-6. A gauche : Arduino Nano ; A droite : Carte Blue Pill [8]</i>	28

<i>Figure 2-7. Cœur ARM Cortex-M3 32 bits microcontrôleur STM32 [10].</i>	29
<i>Figure 2-8. Capteurs météorologiques sélectionnés</i>	30
<i>Figure 2-9. Les capteurs agricoles sélectionnés.</i>	31
<i>Figure 2-10. Module de transmission NRF24L01 [14], [15]</i>	32
<i>Figure 2-11. Adaptateur UART-USB CH343 [16]</i>	32
<i>Figure 2-12. Ecran LCD 2x16</i>	34
<i>Figure 2-13. Système photovoltaïque couplé à une batterie rechargeable</i>	34
<i>Figure 2-14. Prototype de métrologie embarqué réalisé.</i>	36
<i>Figure 2-15. Organigramme logique de la conception du software.</i>	37
<i>Figure 3-1. Vue initiale de l'interface de l'application</i>	41
<i>Figure 3-2. Ajout des graphiques suite au clic sur "Add Plot"</i>	42
<i>Figure 3-3. Test du capteur DHT 11</i>	43
<i>Figure 3-4. Visualisation des données du DHT11</i>	44
<i>Figure 3-5. Test du capteur FC-28</i>	44
<i>Figure 3-6. Visualisation des données de FC-28 (humidité du sol inférieure)</i>	45
<i>Figure 3-7. Visualisation des données de FC-28 (humidité du sol supérieure)</i>	45
<i>Figure 3-8. Test du capteur MH-RD.</i>	46
<i>Figure 3-9. Visualisation en absence de pluie.</i>	46
<i>Figure 3-10. Visualisation en présence de pluie</i>	47
<i>Figure 3-11. Test de LDR</i>	47
<i>Figure 3-12. visualisation des données de la LDR</i>	48
<i>Figure 3-13. Test du système complet.</i>	49
<i>Figure 3-14. Visualisation des données de l'ensemble des capteurs.</i>	49
<i>Figure 3-15. Architecture globale du système en mode distant.</i>	50
<i>Figure 3-16. La carte Raspberry PI 4</i>	51
<i>Figure 3-17. Configuration successive de Raspberry pi 4</i>	52
<i>Figure 3-18. Tentative de connexion SSH (commande introuvable)</i>	52
<i>Figure 3-19. Branchement du Raspberry Pi Pico avec nRF24L01</i>	53
<i>Figure 3-20. Branchement du système complet</i>	54
<i>Figure 3-21. L'interface de Thonny IDE dans l'état « en attente de données »</i>	54

Introduction générale

L'agriculture intelligente est une nouvelle approche qui combine les technologies numériques et les systèmes embarqués pour améliorer la productivité agricole tout en préservant les ressources naturelles. Parmi les outils émergents dans ce domaine figure la métrologie embarquée, qui permet de mesurer en temps réel divers paramètres environnementaux essentiels au suivi de l'état du sol et de l'air. [1]

Dans un contexte où les changements climatiques, la sécheresse, et la dégradation des sols affectent gravement les rendements agricoles, la mise en place de systèmes de surveillance efficaces devient une nécessité. Grâce aux progrès de l'électronique embarquée et de la miniaturisation des capteurs, il est désormais possible de concevoir des solutions de monitoring à faible coût, accessibles même aux petites exploitations. [2],[3]

L'objectif de notre projet est donc de développer un système de métrologie embarqué, basé sur une carte STM32F103C8T6 (Blue Pill) et une série de capteurs environnementaux, pour la surveillance locale et à distance de la qualité du sol et de l'air. Ce système vise à fournir des données précises et continues sur des paramètres tels que l'humidité du sol, la température, la luminosité ambiante et la présence de pluie.

Dans cette expérience, deux scénarios d'utilisation seront abordés :

Le premier consiste à tester le système en mode local, avec affichage des données via un module UART connecté à un ordinateur ;

Le second vise à transmettre les données sans fil vers un Raspberry Pi à l'aide de modules nRF24L01, pour une surveillance à distance.

Cette mémoire sera structuré en trois chapitres :

Introduction générale

Le premier chapitre présentera les concepts généraux liés à l'agriculture intelligente, en mettant l'accent sur l'apport des technologies numériques, notamment l'Internet des objets (IoT), dans la modernisation des pratiques agricoles.

Le deuxième décrit les étapes de conception du système de métrologie embarqué pour l'agriculture intelligente, depuis la définition des besoins jusqu'au prototypage. L'architecture matérielle, les capteurs utilisés et les choix techniques y sont présentés.

Enfin, le troisième chapitre exposera la réalisation pratique du système, les tests effectués ainsi que les résultats obtenus pour évaluer les performances de la solution proposée.

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

1.1 Introduction

L'agriculture intelligente émerge comme une réponse incontournable aux défis croissants de la sécurité alimentaire, de la rareté des ressources et des changements climatiques. En intégrant des technologies avancées telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA), la robotique et l'analyse prédictive, cette approche révolutionne les pratiques agricoles traditionnelles en les rendant plus précises, durables et efficaces.

Ce chapitre explore les fondements de l'agriculture intelligente, en détaillant ses technologies clés, ses applications pratiques, ses avantages, ainsi que les défis auxquels elle est confrontée. À travers cette étude, nous montrerons comment l'agriculture intelligente représente une opportunité majeure pour moderniser l'agriculture algérienne et répondre aux impératifs des trois « S » : Sécurité de l'eau, Sécurité sanitaire et Sécurité alimentaire.

1.2 Définition et Importance de l'agriculture Intelligente

L'agriculture intelligente est un concept moderne qui utilise des technologies avancées et des opérations agricoles basées sur des données (data-driven) pour optimiser la production agricole, maximiser l'efficacité des ressources et minimiser l'impact environnemental. Les technologies utilisées dans l'agriculture intelligente comprennent principalement [1] :

- Intelligence artificielle (IA) : Analyse de données agricoles pour prédire les rendements, détecter les maladies des cultures et optimiser l'utilisation des ressources.
- Automatisation : Utilisation de machines autonomes pour la plantation, l'irrigation et la récolte.

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

- Internet des objets (IoT) : Capteurs connectés permettant de surveiller l'humidité du sol, la météo et la santé des cultures en temps réel.

Les innovations agricoles et l'utilisation de nouvelles technologies rendent le travail sur le terrain plus efficace et plus pratique. Les grands producteurs agricoles n'appliquent plus l'eau, les engrais, les pesticides et autres intrants de manière arbitraire ou uniforme dans les champs. Grâce aux technologies agricoles avancées, il est désormais possible d'appliquer avec précision ce qui est nécessaire à chaque endroit et d'adapter le traitement à chaque plante de manière minutieuse [2].

1.2.1 Les Révolutions de l'agriculture

L'histoire de l'agriculture se structure en quatre révolutions majeures, chacune portée par des avancées technologiques alignées sur les progrès industriels, comme illustré dans la Figure 1-1. [3]

- Agriculture 1.0 (avant 1950) : Basée sur le travail manuel et l'utilisation d'outils rudimentaires, avec une forte dépendance à la force animale.
- Agriculture 2.0 (1950-1990) : Apparition des machines agricoles (tracteurs), de l'utilisation des engrais et pesticides, marquant l'ère de la mécanisation et de la révolution verte.
- Agriculture 3.0 (1990-2010) : Pendant la période de l'Agriculture 3.0, le secteur agricole a connu une transformation numérique majeure grâce à l'introduction de technologies innovantes :
 - Suivi précis des rendements par géolocalisation
 - Systèmes de guidage automatisé pour les engins agricoles
 - Application à taux variable des intrants (engrais, pesticides)
 - Électronique embarquée pour un contrôle plus intelligent des équipements
- Agriculture 4.0 (2010-aujourd'hui) : Émergence des fermes autonomes, de l'agriculture de précision avec capteurs IoT, intelligence artificielle (IA) et analyse

des mégadonnées, visant une production plus durable et efficace grâce à l'intelligence artificielle et aux systèmes interconnectés.

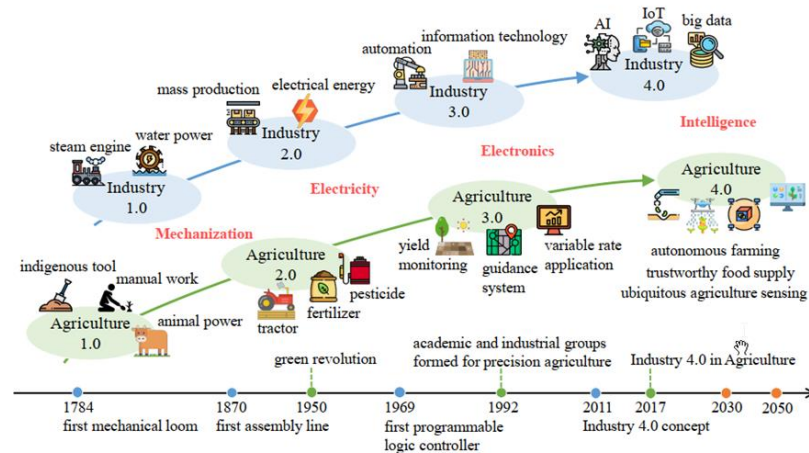


Figure 1-1. Les révolutions de l'industrie et de l'agriculture. [3]

1.2.2 Objectifs de l'agriculture Intelligente

L'objectif fondamental de l'agriculture intelligente est d'exploiter des données issues de sources variées pour optimiser la compréhension, la prévision et l'organisation des activités agricoles. La figure 1-2 représente l'agriculture intelligente en illustrant un processus intégré où des capteurs surveillent les cultures en temps réel et génèrent des données. Ces données sont ensuite collectées et analysées via une plateforme utilisant des logiciels et des techniques d'intelligence artificielle. En fonction des analyses, plusieurs possibilités d'intervention sont définies, et l'agriculteur décide alors comment intervenir sur ses cultures, soit directement à l'aide de son propre matériel, soit en utilisant des machines automatisées [4].

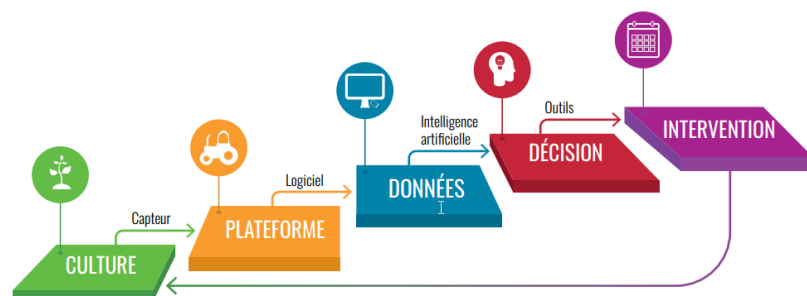


Figure 1-2. Cycle de gestion typique de l'agriculture intelligente. [5]

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

La figure 1-3 montre les avantages de l'agriculture intelligente. Cette approche technologique permet de [5] :

1. **Augmenter de l'efficacité de la production agricole** : L'agriculture intelligente utilise des technologies avancées pour optimiser les pratiques agricoles. Cela inclut l'utilisation de capteurs pour surveiller les conditions des cultures et des sols, et l'analyse des données pour prendre des décisions éclairées.
2. **Optimiser des engrais et des pesticides** : Grâce à des capteurs et des systèmes de gestion des données, l'agriculture intelligente permet d'appliquer des engrais et des pesticides de manière plus précise.
3. **Conserver de l'eau** : La gestion efficace de l'eau est déterminante pour l'agriculture durable. L'agriculture intelligente utilise des capteurs d'humidité du sol et des systèmes d'irrigation automatisés pour s'assurer que les cultures reçoivent la quantité d'eau optimale.
4. **Réduire des coûts opérationnels** : L'automatisation et l'optimisation des pratiques agricoles permettent de réduire les coûts liés à la main-d'œuvre et aux ressources.
5. **Fournir de données en temps réel** : Ces informations permettent aux agriculteurs de prendre des décisions rapides et informées pour gérer leurs cultures de manière plus efficace.
6. **Réduire des émissions de gaz à effet de serre et de l'érosion des sols** : En optimisant l'utilisation des ressources et en réduisant le gaspillage, l'agriculture intelligente contribue à diminuer les émissions de gaz à effet de serre.

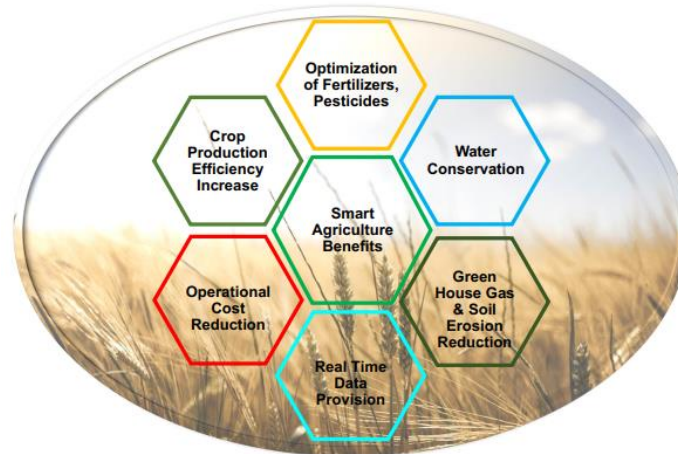


Figure 1-3. Cycle de gestion typique de l'agriculture intelligente. [5]

1.2.3 Importance de Agriculture intelligente pour l'Algérie

L'agriculture intelligente représente une opportunité stratégique pour l'Algérie, en particulier pour répondre aux défis liés aux trois « S » :

- **Sécurité de l'eau** : L'Algérie, pays à climat aride et semi-aride, fait face à une rareté croissante des ressources en eau. L'agriculture intelligente peut aider à une gestion optimisée de l'eau grâce à :
 - L'irrigation de précision basée sur des capteurs d'humidité et des prévisions climatiques.
 - L'utilisation de l'IA pour optimiser l'apport en eau et éviter le gaspillage.
- **Sécurité de la santé** : L'agriculture intelligente contribue à une alimentation plus saine et à la protection de l'environnement grâce à :
 - La réduction des pesticides et engrais chimiques grâce à des traitements ciblés.
 - Le suivi en temps réel des cultures et du bétail pour éviter les maladies et garantir une production saine.
- **Sécurité alimentaire** : Avec une dépendance aux importations alimentaires, l'Algérie peut renforcer son autosuffisance grâce à :
 - L'augmentation des rendements agricoles via l'optimisation des cycles de production.

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

- L'utilisation de drones et de robots agricoles pour améliorer la productivité.
- L'exploitation de l'IA pour prédire et prévenir les pertes agricoles dues aux conditions climatiques

Selon l'agroéconomiste et formateur en IA, Brahim Lekfal, "il existe des expériences réussies dans le cadre de l'agriculture de précision basée sur l'IA dans le domaine de l'horticulture en Algérie, Ces expériences ont permis de quadrupler voire quintupler le rendement de certains légumes " [6]. Le tableau 1-1 mentionne certains projets prometteurs dans ce secteur en Algérie. [6]

Tableau 1-1. Les projets prometteurs dans l'agriculture intelligente en Algérie. [6]

Projet	Porteur du projet	Description du projet
Sakai	Nasser Bouziani et Mourad Bouzit	Il s'agit de robots autonomes utilisant l'énergie solaire pour générer leur propre carburant et sont utilisés pour l'irrigation et la fertilisation profonde des racines, permettant également une distribution adéquate d'eau et d'engrais.
Les fermes modernes	Le groupe "Souakri" avec un partenaire turc.	Il s'agit d'un système d'automatisation complet doté de l'intelligence artificielle, contrôlant toutes les étapes de production de la tomate cerise destinée à l'exportation
Farm AI	Startup algérienne « deuxième meilleure startup dans la compétition internationale Tech 4 Good en Chine »	Il s'agit du développement d'un système de détection des maladies de plantes à l'aide de drones.

1.3 Typologie de l'agriculture intelligente

L'agriculture intelligente se divise principalement en deux grandes catégories, chacune exploitant des technologies adaptées pour améliorer la production et répondre aux contraintes environnementales :

1. Agriculture intelligente en champs ouverts (Open Field Smart Agriculture) :

Agriculture en plein air, dépendant des conditions naturelles. Ce type d'agriculture intelligente se concentre sur la gestion de vastes étendues de terres cultivées (Figure 1-4).

- 2. Agriculture intelligente en environnement contrôlé (Controlled Environment Smart Agriculture) :** Ce type d'agriculture se déroule dans des environnements fermés et régulés, comme les serres (Figure 1-5) et les installations d'agriculture verticale (Figure 1-6). L'objectif est de maximiser la production en optimisant les conditions de croissance des plantes, indépendamment des variations climatiques extérieures.

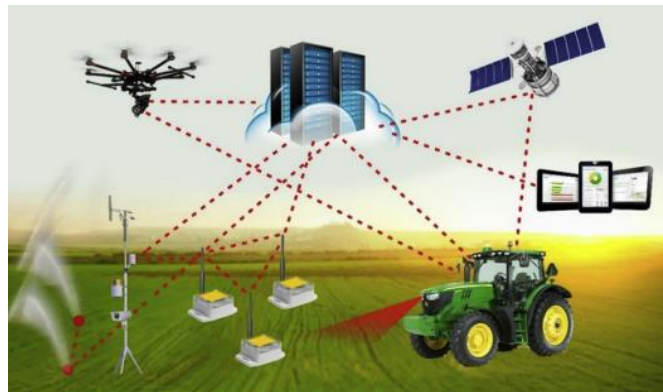


Figure 1-4. Agriculture intelligente en champ ouvert [10].

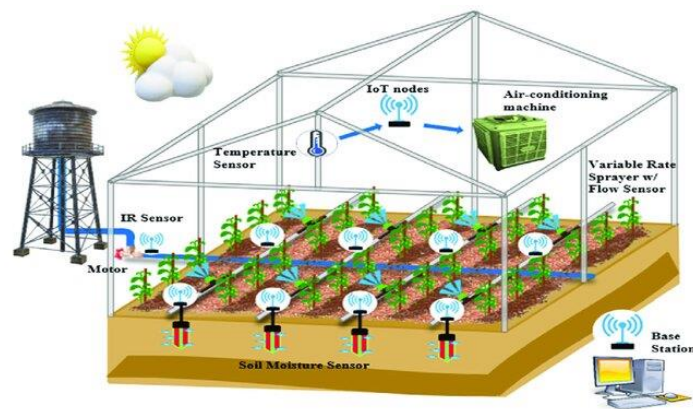


Figure 1-5. Serre Intelligente [11].

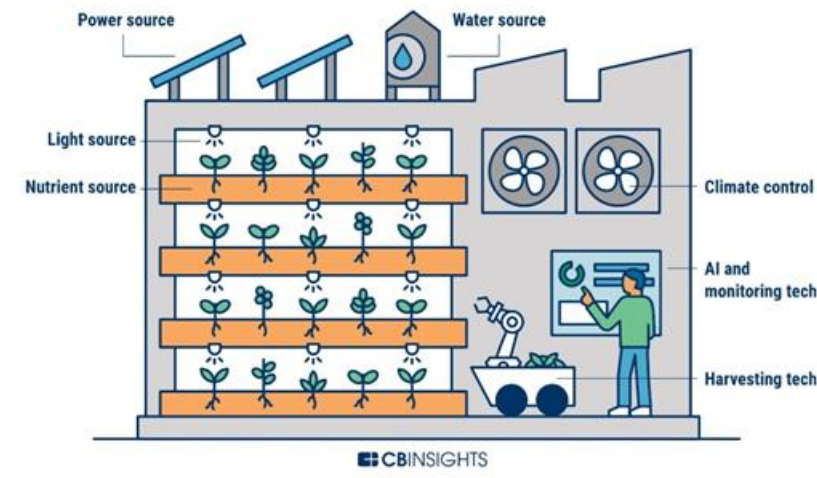


Figure 1-6. Agriculture verticale intelligente [12]

Les deux catégories reposent sur des technologies communes, telles que l'IoT, l'IA, les capteurs environnementaux et l'analyse de données, permettant une gestion optimisée des cultures. Cependant, chaque catégorie utilise des technologies spécifiques adaptées à ses objectifs :

- En champs ouverts, l'imagerie satellite, les drones et la technologie à taux variable permettent une surveillance et une intervention à grande échelle [8].
- En environnement contrôlé, par exemple les serres et l'agriculture verticale exploitent l'hydroponie, l'aéroponie, l'éclairage LED intelligent et les systèmes automatisés de gestion climatique pour optimiser la croissance des plantes [9].

1.4 Technologies Clés du l'agriculture intelligente

L'agriculture intelligente repose sur l'intégration de technologies avancées à chaque étape du processus agricole, permettant d'optimiser les rendements, d'améliorer l'efficacité des ressources et de réduire l'impact environnemental. La figure 1.7 présente les technologies typiques dans les différentes couches de l'architecture intelligente, mettant en lumière leur rôle crucial dans la transformation des pratiques agricoles traditionnelles.

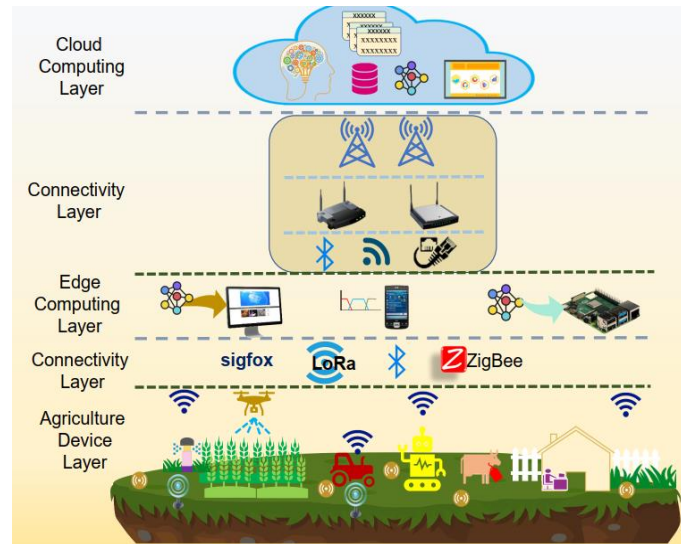


Figure 1-7. Les technologies typiques dans les différentes couches de l'Architecture de l'agriculture intelligente [5].

Les différentes couches de l'architecture en agriculture intelligente peuvent être résumées comme suit [5] :

1. **Couche des dispositifs agricoles (Agriculture Device Layer) :** Cette couche constitue le cœur de l'architecture intelligente. Elle intègre diverses technologies de détection, telles que les capteurs, l'imagerie et les systèmes d'automatisation, pour surveiller et gérer les cultures et les ressources de manière optimisée.
2. **Première Couche de connectivité (Connectivity Layer) :** Cette couche assure la transmission des données entre les dispositifs agricoles et les systèmes de traitement. Elle utilise diverses technologies de communication, telles que Sigfox, LoRa, Bluetooth et ZigBee, qui permettent une transmission efficace des données sur de longues distances tout en minimisant la consommation d'énergie.
3. **Couche de calcul en périphérie (Edge Computing Layer) :** Cette couche comprend des ordinateurs et des microcontrôleurs qui traitent les données localement avant de les envoyer vers le cloud. Elle permet d'effectuer une première analyse des données en temps réel, optimisant ainsi la réactivité des systèmes agricoles. Les systèmes d'agriculture intelligente simples peuvent se limiter à cette couche lorsque seule une gestion locale est requise.

4. **Deuxième couche de connectivité (Connectivity Layer) :** Cette couche assure la communication entre les systèmes de calcul en périphérie et les services de stockage ou d'analyse de données distants. Elle repose sur des technologies comme le Wi-Fi, la 5G, les réseaux cellulaires ou les connexions filaires.
5. **Couche de cloud computing (Cloud Computing Layer) :** Cette dernière couche regroupe les plateformes d'analyse et de stockage des données agricoles. Elle permet d'utiliser des technologies d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique (Machine Learning) pour optimiser les décisions agricoles. On y retrouve des services de gestion des données, des applications web et des outils d'aide à la décision.

Les technologies utilisées au sein de ces couches peuvent être regroupées en trois grandes catégories : Technologies d'acquisition et d'automatisation, Technologies de transmission des données et Analyse des données et intelligence artificielle. Ces technologies seront détaillées dans les sections suivantes.

1.4.1 Les technologies d'acquisition et d'automatisation

Ces technologies sont utilisées dans le niveau de la couche des dispositifs agricoles, elles englobent :

- Technologies de détection
- La cartographie et l'imagerie
- Robotique et automatisation

1.4.1.1 Les technologies de détection

Un système d'agriculture intelligente repose sur la mesure de paramètres essentiels : paramètres du sol, conditions climatiques et santé végétale. Ces paramètres sont quantifiés grâce à des capteurs spécialisés, permettant une surveillance précise. La Figure 1.8 illustre une classification des capteurs utilisés dans ce contexte.

Dans les environnements contrôlés, des capteurs supplémentaires sont déployés pour mesurer et réguler précisément des paramètres tels que l'humidité de l'air, la concentration en CO₂, ou encore la luminosité, afin d'optimiser les conditions de croissance.

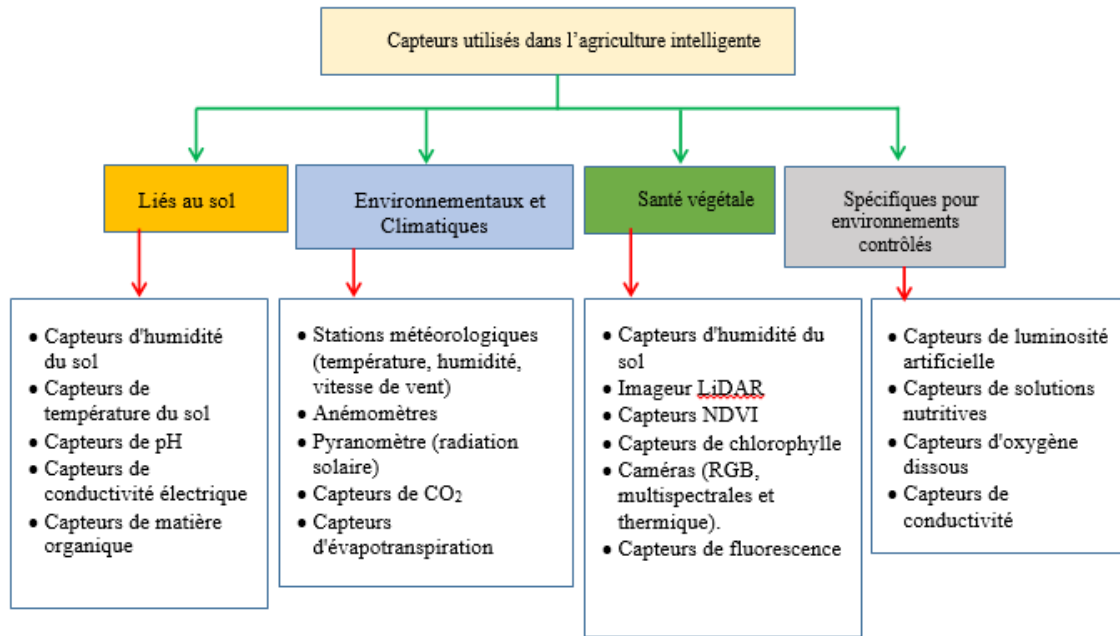


Figure 1-8. Classification des capteurs utilisés en agriculture intelligente.

1.4.1.2 Cartographie et imagerie

La cartographie permet de représenter graphiquement des données spatiales, telles que les limites des parcelles, les types de sols et les zones de productivité. Cette visualisation aide les agriculteurs à analyser les caractéristiques physiques et géographiques de leurs terres, facilitant ainsi une planification et une gestion optimisées des cultures.

Dans l'agriculture en champs ouverts (Open Field Agriculture), les systèmes d'information géographique (SIG) et les systèmes mondiaux de navigation par satellite (GNSS) permettent de générer des cartes d'élévation, des cartes des sols et des cartes de rendement. Ces outils sont précieux pour identifier les zones nécessitant des ajustements en fertilisation ou en irrigation [13]. La figure 1-9 présente un exemple d'une cartographie de rendement à partir des mesures réalisées par capteur embarqué sur une moissonneuse-batteuse.

Les technologies d'imagerie en agriculture, quant à elle, incluent l'utilisation de robots de détection terrestre, l'imagerie par drone aérien et la télédétection par imagerie satellitaire. Ces technologies d'acquisition d'images permettent d'examiner et de surveiller les cultures en temps réel afin de mieux évaluer leur état sanitaire, d'estimer le rendement et de déterminer

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

l'état du sol, ce qui permet d'obtenir des produits de meilleure qualité et d'optimiser la planification. Les technologies d'imagerie permettent de détecter diverses anomalies, telles que : Les zones de stress végétal, les carences nutritionnelles, les maladies et les problèmes d'irrigation. Elles offrent ainsi une capacité d'intervention rapide pour minimiser les pertes. Les principales technologies d'imagerie utilisées en agriculture comprennent l'imagerie rouge, verte et bleue (RVB), l'imagerie hyperspectrale multispectrale et l'imagerie thermique, comme illustré à la figure 1-10 [14].

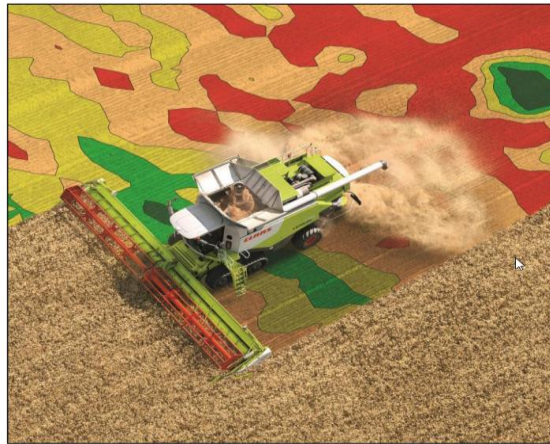


Figure 1-9. Cartographie de rendement à partir des mesures réalisées par capteur embarqué sur une moissonneuse-batteuse [43]

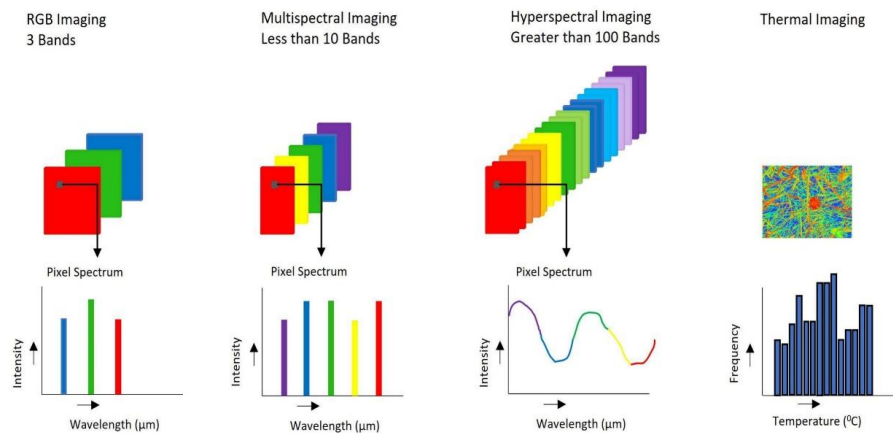


Figure 1-10. Types d'images utilisées dans l'agriculture intelligente [14].

1.4.1.3 Robotique et automatisation

L'agriculture intelligente intègre des systèmes robotiques et des solutions d'automatisation pour accomplir une multitude de tâches, réduisant ainsi la dépendance aux interventions manuelles et augmentant l'efficacité des opérations agricoles.

Ces dernières années, plusieurs innovations ont émergé dans le secteur agricole [15] :

- **Drones agricoles** : Utilisés pour la pulvérisation de pesticides, la surveillance des cultures et la cartographie des champs avec une grande précision (Figure 1.11).
- **Systèmes d'irrigation automatisés** : Basés sur des capteurs d'humidité du sol et des prévisions météorologiques, ces systèmes adaptent l'arrosage en temps réel pour éviter le gaspillage d'eau.
- **Véhicules autonomes agricoles** : Cette catégorie englobe plusieurs types d'engins équipés de GPS, de capteurs avancés et d'intelligence artificielle pour réaliser diverses tâches sans intervention humaine :
 - **Tracteurs autonomes** : Effectuent le labour, le semis et la récolte de manière automatique (Figure 1.12).
 - **Moissonneuses et machines de récolte automatisées** : Récoltent les cultures en fonction de leur maturité détectée par des capteurs optiques.
 - **Robots de désherbage autonomes** : Détectent et éliminent les mauvaises herbes grâce à des caméras et de l'intelligence artificielle, réduisant ainsi l'usage des herbicides (Figure 1.13).
 - Et d'autres

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

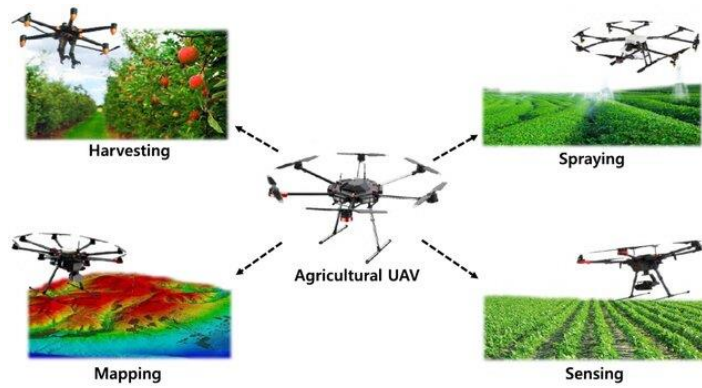


Figure 1-11. Utilisation des drones Agricole (UAVs) dans la récolte, l'irrigation, la cartographie, et la détection [16].



Figure 1-12. Tracteur autonome [17]



Figure 1-13. Robots de désherbage autonomes [18].

1.4.2 Les technologies de transmission de données

Les technologies de communication sans fil constituent un élément essentiel des systèmes agricoles intelligents, car les champs couvrent généralement une grande superficie et nécessitent que les composants du système soient placés à des endroits éloignés.

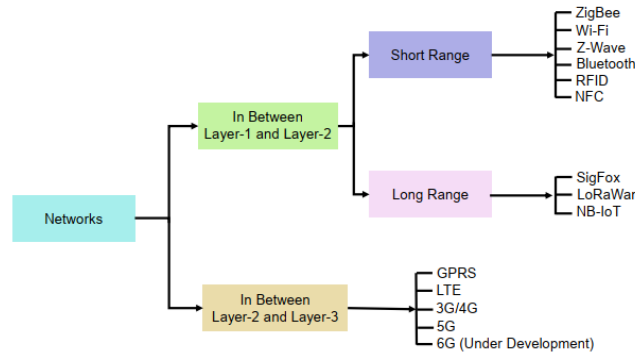


Figure 1-14. Réseaux utilisés dans la couche de connectivité de l'architecture agricole intelligente [5].

La figure 1.14 représente les protocoles de communication utilisés pour établir la communication entre les couches 1-2 et les couches 2-3 décrits dans la Section 1.4. Ces réseaux sont divisés en trois catégories principales et qui sont présentés dans les tableaux 1-2, 1-3 et 1-4.

La sélection des technologies de communication pour un système agricole intelligent repose sur plusieurs critères clés, dont la portée, le débit de transmission, la consommation d'énergie, et les spécificités des applications agricoles. [19]

Tableau 1-2. Technologie à courte portée (Couche 1 → Couche 2) [20-25].

Technologie	Portée	Débit	Consommation d'énergie	Applications agricoles
ZigBee	10-100m	250 Kbps	Très faible	Réseaux de capteurs, surveillance environnementale, contrôle d'irrigation
Wi-Fi	50-100m	150-600 Mbps	Moyenne à élevée	Transfert de données volumineuses, vidéosurveillance, connectivité des stations météo
Z-Wave	30-100m	100 Kbps	Faible	Automatisation de bâtiments agricoles, contrôle d'équipements
Bluetooth	10-100m	1-3 Mbps	Faible à très faible	Communication entre appareils mobiles et capteurs, diagnostics d'équipements
RFID	10cm-100m	4 Kbps	Très faible	Identification et suivi du bétail, gestion des stocks, traçabilité

Chapitre 1 : Smart Agriculture : Contexte de l'étude et État de l'Art

NFC	<10cm	100-424 Kbps	Très faible	Étiquetage des plantes, maintenance d'équipements, authentification
-----	-------	--------------	-------------	---

Tableau 1-3. Technologie à longue portée (Couche 1 → Couche 2) [26].

Technologie	Portée	Débit	Consommation d'énergie	Applications agricoles
SigFox	10-40km	100-600 bps	Très faible	Surveillance de grands champs, suivi du bétail, capteurs distants
LoRaWAN	2-15km	0.3-50 Kbps	Très faible	Surveillance de l'humidité du sol, suivi météorologique, systèmes d'alerte
NB-IoT	10-15 km	20-250 Kbps	Faible	Capteurs de terrain, suivi de qualité de l'eau, surveillance des silos

Tableau 1-4. Technologies cellulaires (Couche 2 → Couche 3). [27]

Technologie	Portée	Débit	Consommation d'énergie	Applications agricoles
GPRS	5-10km	56-171 Kbps	Moyenne	Transmission de données de base, surveillance à distance
LTE	2-5 km	100-300 Mbps	Moyenne à élevée	Transfert de données volumineuses, vidéosurveillance, agriculture de précision
3G/4G	2-5km	3G : 384 Kbps, 4G : 300 Mbps	Moyenne à élevée	Applications mobiles agricoles, streaming vidéo, transfert d'images
5G	1-10km	1-10 Gbps	Élevée	Agriculture autonome, robotique agricole, traitement de données en temps réel
6G (en développement)	>10km	>100 Gbps	Optimisée grâce à l'intégration de l'IA	Applications agricoles avancées, jumeaux numériques, réalité augmentée dans les champs

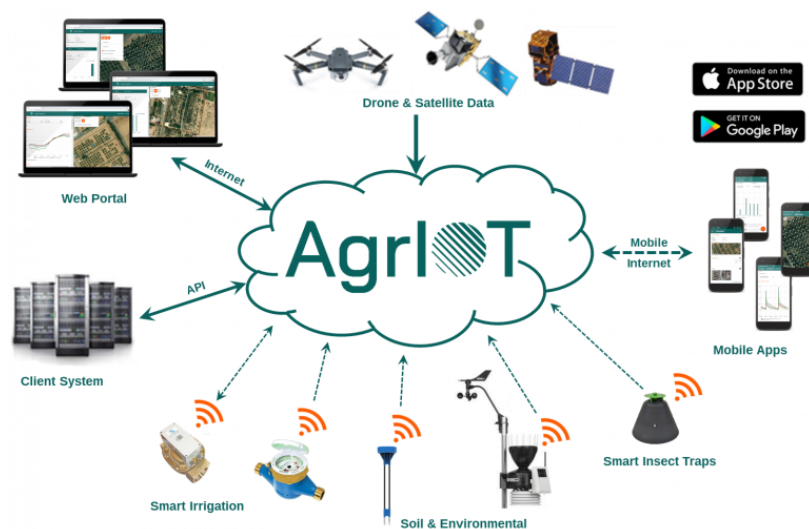


Figure 1-15. Internet des objets agricoles (Agri-IoT) [29].

1.4.3 Internet des objets agricoles (Agri-IoT)

L'Agri-IoT, présenté dans la figure 1.15, désigne l'application des technologies IoT en agriculture. Il s'agit de connecter à Internet des dispositifs physiques (capteurs, machines agricoles, drones, véhicules autonomes) pour collecter, analyser et partager des données en temps réel. Cette interconnexion permet aux agriculteurs de prendre des décisions basées sur des informations précises, améliorant ainsi l'efficacité, la productivité et la durabilité de leurs exploitations [28].

1.4.4 Intelligence Artificielle et agriculture intelligente

L'intelligence artificielle (IA) joue aujourd'hui un rôle clé dans l'évolution de l'agriculture vers des pratiques plus intelligentes, efficaces et durables. Cette technologie permet d'exploiter au mieux les données collectées à partir de capteurs, de satellites, de drones et d'autres sources. Elles offrent ainsi aux agriculteurs une aide précieuse pour prendre des décisions plus rapides et plus précises.

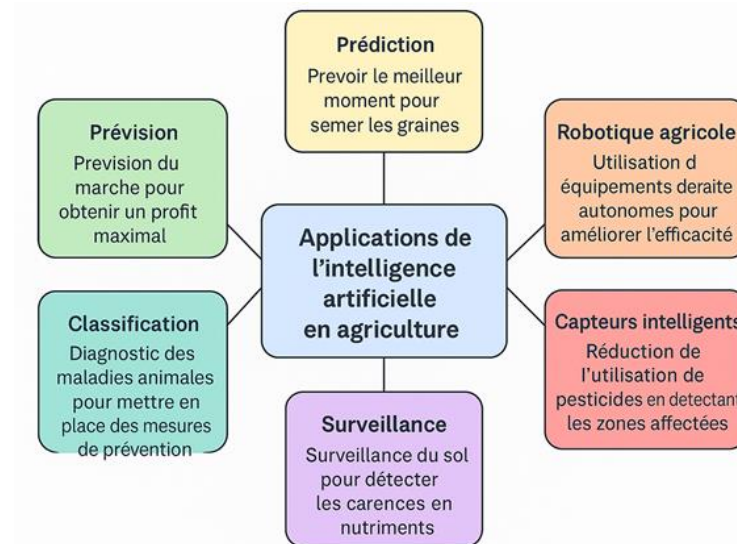


Figure 1-16. Les Applications de l'Intelligence Artificielle en Agriculture. [34]

L'IA est incorporée dans plusieurs applications (figure 116) afin de servir le domaine de l'agriculture. Elle est utilisée pour l'analyse prédictive, la perception visuelle par ordinateur, l'amélioration des opérations agricoles et pour les interfaces intelligentes destinées aux agriculteurs. Nous détaillons ces applications dans la section suivante :

a. L'analyse prédictive : Grâce aux algorithmes d'apprentissage automatique, il est possible d'anticiper une grande variété de phénomènes [30]. Par exemple :

- Prévoir les rendements des cultures en tenant compte des conditions météorologiques, de la qualité du sol ou des historiques de production.
- Détecter en amont les maladies ou infestations en croisant des données environnementales (humidité, température) avec des observations terrain ou des images.
- Planifier l'irrigation ou la fertilisation en anticipant les besoins futurs des plantes, pour éviter le gaspillage et optimiser les ressources.

b. La vision par ordinateur : L'IA est aussi utilisée pour analyser automatiquement des images issues de drones, satellites ou caméras fixes en appliquant les fonctions suivantes [31] :

- Repérer rapidement les signes de maladies sur les feuilles, le stress hydrique ou les carences.
- Surveiller la croissance des cultures tout au long de leur cycle.
- Identifier les mauvaises herbes ou d'autres anomalies, facilitant une intervention rapide et ciblée.

c. L'optimisation des activités agricoles : Les modèles d'IA comme les régressions (Regressions), forêts aléatoires (Random forests) ou réseaux de neurones (Neural networks) sont également utilisés pour effectuer les actions suivantes [32] :

- Optimiser les trajets des machines agricoles autonomes, ce qui permet de gagner du temps et de l'énergie.
- Adapter avec précision les apports en engrais ou en traitements phytosanitaires selon les besoins réels.
- Réduire la consommation globale en eau et en ressources en rendant chaque opération plus ciblée et plus efficace.

d. Les interfaces intelligentes pour les agriculteurs : L'IA se retrouve dans les interfaces et les systèmes d'aide à la décision (Decision Support Systems) utilisés sur le terrain. Ces outils permettent d'accomplir les opérations suivantes [33] :

- Proposer des recommandations personnalisées pour chaque parcelle,
- S'adapter aux préférences de l'agriculteur
- Fournir des alertes en temps réel, notamment en cas de sécheresse, de maladie ou de tout autre risque menaçant la culture.

1.5 Défis de l'Agriculture Intelligente

Même si l'agriculture intelligente apporte beaucoup d'avantages, son adoption reste difficile pour certains agriculteurs. Nous expliquant, ci-après, les principaux obstacles qui freinent son développement [40]:

1.5.1 Coûts initiaux élevés

Les équipements nécessaires (capteurs, drones, tracteurs autonomes, logiciels...) sont souvent très chers, ce qui rend leur achat difficile, surtout pour les petits agriculteurs. Dans certains pays d'Afrique ou d'Asie du Sud-Est, il est encore plus compliqué d'utiliser ces technologies, car elles nécessitent beaucoup de matériel et d'investissements, que tous les agriculteurs ne peuvent pas se permettre [41].

1.5.2 Accès limité dans les zones rurales

L'agriculture se pratique souvent dans des zones rurales éloignées, où l'accès à l'électricité ou à Internet est limité. Sans ces ressources de base, il est difficile de mettre en place des technologies intelligentes sur le terrain. Cela ralentit leur déploiement, même dans les zones agricoles prometteuses. [41]

1.5.3 Manque de connaissances techniques

Beaucoup d'agriculteurs, notamment dans les pays en développement, ne sont pas formés à l'utilisation de ces nouvelles technologies. Ils manquent de soutien, d'information et de formations adaptées. Cela les pousse souvent à rester sur des méthodes agricoles traditionnelles qu'ils maîtrisent mieux. [41]

1.5.4 Risques liés à la sécurité des données

L'agriculture intelligente repose sur la collecte et la transmission de données. Mais ces données doivent être bien protégées. Sans bonnes mesures de sécurité, il existe des risques de piratage ou de manipulation des systèmes, ce qui pourrait nuire aux cultures et à la production. [42]

1.6 Conclusion

L'agriculture est actuellement le centre d'une arrivée massive de technologies de l'information et de la communication, principalement axée sur les progrès dans les capteurs, la robotique ainsi que les outils et méthodes d'analyse de données.

L'agriculture intelligente est une solution d'avenir pour l'Algérie où l'eau est rare et dont la sécurité alimentaire est un enjeu crucial.

Dans ce chapitre nous avons présenté l'utilisation des nouvelles technologies dans le secteur de l'agriculture telles que les capteurs, les robots, l'intelligence artificielle et l'analyse de données. Ces outils permettent de mieux surveiller les cultures, d'économiser l'eau et les engrais, et d'augmenter la production agricole tout en protégeant l'environnement.

Chapitre 2 : Conception du Système de métrologie embarquée

2.1 Introduction

Comme déjà abordé dans le premier chapitre, l'agriculture intelligente repose sur l'utilisation de technologies avancées pour optimiser la production, améliorer la gestion des ressources et réduire l'impact environnemental. Au cœur de cette thématique, la métrologie embarquée joue un rôle fondamental. En intégrant des dispositifs de mesure intelligents directement dans les équipements agricoles ou sur le terrain, elle permet la collecte autonome, en temps réel, de données nécessaires telles que l'humidité, la température, la qualité de l'air et d'autres.

Dans ce chapitre, nous présentons les étapes suivies pour concevoir un système de métrologie embarquée dédié à l'agriculture intelligente. Une approche structurée a été adoptée pour accomplir ce travail. Nous détaillons chaque phase du plan, depuis la définition des exigences jusqu'à la finalisation de la conception du prototype. Les tests et la validation de ce système, qui permettront d'en évaluer les performances et la fiabilité, seront abordés dans le chapitre suivant.

2.2 Métrologie embarquée

La métrologie embarquée est considérée comme le noyau central d'un système d'agriculture intelligente. Elle regroupe l'ensemble des dispositifs intelligents, autonomes et intégrés à l'environnement agricole, capables de mesurer et de collecter des données en temps réel. Principalement, deux types de station peuvent être identifiés comme de métrologie embarquée dans l'agriculture intelligente :

- Stations de mesure agronomique : Ces stations se concentrent sur des paramètres agronomiques seulement (Figure 2-1 à gauche).

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

- Stations Agrométéorologiques : Ces stations mesurent des paramètres météorologiques et agronomiques, ou bien uniquement météorologiques (Figure 2-1 à droite).

Ces stations sont généralement utilisées ensemble dans le même système, comme il est montré dans la figure 2-2. Ces dispositifs peuvent fonctionner de manière indépendante, localement, ou être intégrés dans un réseau de capteurs sans fil (WSN), où ils jouent le rôle de nœuds communicants au sein d'un système distribué. [1]



Figure 2-1. Exemples des stations de mesure [2, 3]



Figure 2-2. L'utilisation des deux types de stations ensemble dans le même système [4].

La figure 2-3 présente un exemple de station agrométéorologique capable de mesurer plusieurs paramètres à la fois météorologiques et agronomiques.



Figure 2-3. Exemple d'une station agrométéorologique et des paramètres qu'elle peut mesurer [5].

Dans ce travail, l'objectif est de développer une métrologie embarquée de type station agrométéorologique.

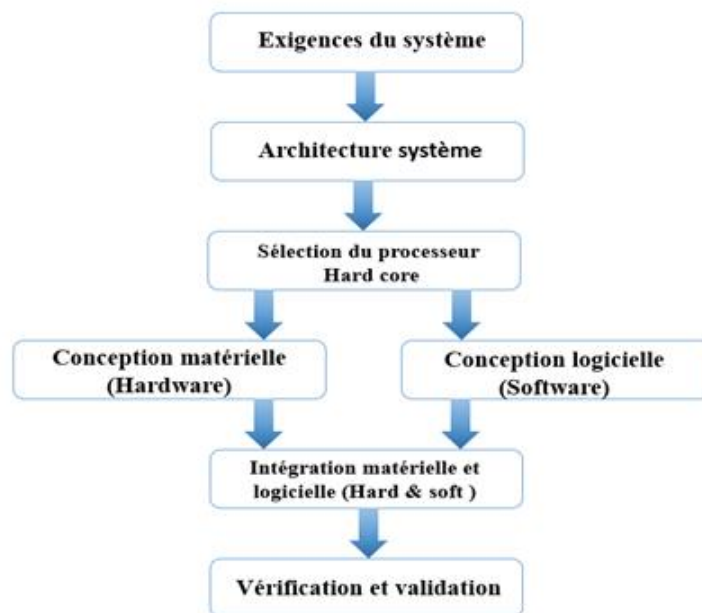


Figure 2-4. Plan de développement de notre projet [6]

2.3 Plan de développement

Le développement de systèmes embarqués, tels que la métrologie embarquée, nécessite un plan méthodique et bien structuré. La figure 2-4 illustre le schéma de développement

typique des systèmes embarqués, utilisé pour notre projet. Le plan se compose de plusieurs étapes séquentielles, à l'exception des phases la conception de hardware et la conception de software, qui peuvent être réalisées en parallèle. Le détail de chaque étape réalisée dans le cadre de ce développement est présenté dans les paragraphes suivants.

2.3.1 Définition des exigences

La définition des exigences constitue la première étape du processus de conception. Elle a pour objectif d'identifier les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles de l'application cible. Les exigences fonctionnelles décrivent les tâches que le système doit accomplir. En revanche, les exigences non fonctionnelles, également appelées exigences techniques, portent sur les performances attendues du système. Elles se concentrent sur des caractéristiques de qualité telles que la performance et la fiabilité [7]. Les tableaux 2-1 et 2-2 présentent respectivement les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles de notre projet.

Tableau 2-1. Les exigences fonctionnelles de la métrologie embarquée.

N°	Exigence	Description
01	Acquisition des données météorologiques	Le système doit collecter des données telles que la température, l'humidité, la pression, etc.
02	Acquisition des données agricoles	Le système doit recueillir des données spécifiques au domaine agricole (ex. : pH du sol, hygrométrie, etc.).
03	Communication en mode local et distant	Le système doit assurer la communication en mode local via une liaison UART, et en mode distant via une liaison RF.
04	Affichage sur site des données	Un afficheur local doit permettre de visualiser les données collectées directement sur le site.
05	Alimentation par énergie solaire et batterie rechargeable.	Le système doit être alimenté par une source d'énergie solaire, avec batterie rechargeable, afin de garantir une autonomie énergétique en site isolé.

Tableau 2-2. Les exigences non fonctionnelles de la métrologie embarquée.

N°	Exigence	Description
01	Utilisation d'un microcontrôleur réputé	La métrologie embarquée doit être basée sur un microcontrôleur fiable, bien documenté et largement utilisé.
02	Faible consommation énergétique	Le système doit être conçu pour minimiser la consommation d'énergie, afin de prolonger l'autonomie, notamment en mode

		veille.
03	Sélection rigoureuse des composants	Les composants électroniques doivent être sélectionnés pour leur fiabilité, leur disponibilité et leur compatibilité avec les conditions d'usage.
04	Optimisation logicielle	Le logiciel embarqué doit être optimisé en termes de mémoire, de vitesse d'exécution et de gestion des interruptions.
05	Modularité et évolutivité	L'architecture matérielle et logicielle doit permettre des mises à jour ou extensions fonctionnelles futures.

2.4 Architecture de ME

Afin de vérifier la satisfaction des exigences définies précédemment, la figure 2-5 suivante illustre l'architecture en blocs de notre système de métrologie embarquée (ME). Cette architecture est composée de six blocs principaux : le bloc processeur, le bloc de communication, les blocs de capteurs météorologiques et agricoles, le bloc d'énergie, ainsi que le bloc afficheur.

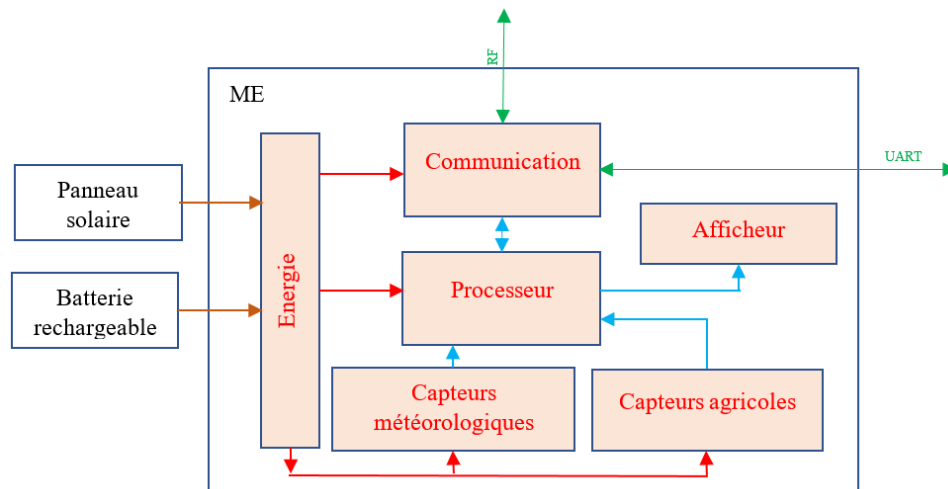


Figure 2-5. Architecture bloc de notre Métrologie embarquée

2.5 Sélection du processeur

Pour sélectionner un processeur adapté à notre application, deux cartes de développement couramment utilisées et facilement disponibles ont été retenues pour évaluation : l'Arduino

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

Nano, basée sur le microcontrôleur ATmega328P, et la carte Blue Pill, équipée du microcontrôleur STM32F103C8T6. Ces deux cartes sont illustrées dans la figure 2-6.

Une comparaison entre les deux cartes est présentée dans le tableau 2-3 en termes de microcontrôleur, fréquence d'horloge, mémoire, consommation énergétique, interfaces de communication, facilité d'utilisation, environnement de développement, communauté active, ainsi que le coût approximatif en dinars algériens (DZD). La carte Blue Pill offre de meilleures performances que l'Arduino Nano. Malgré une utilisation un peu plus complexe et une communauté moins large, ses avantages techniques ont motivé notre choix.

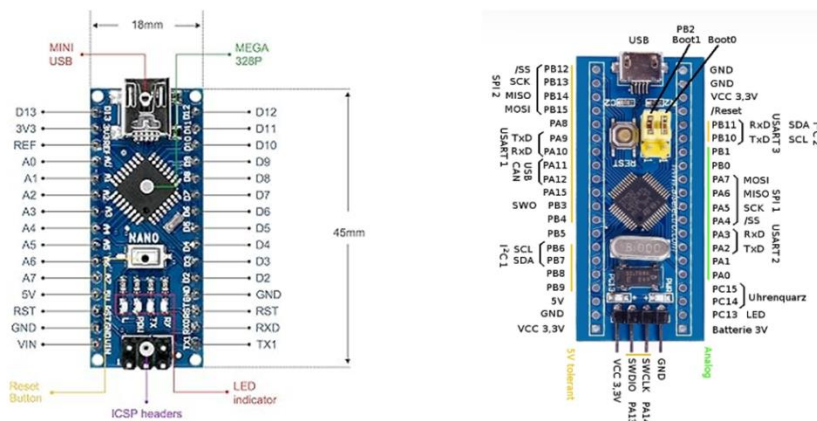


Figure 2-6. A gauche : Arduino Nano ; A droite : Carte Blue Pill [8]

Tableau 2-3. Comparaison entre Arduino Nano et Blue Pill. [9]

Critère	Arduino Nano	Blue Pill
Microcontrôleur	ATmega328P	STM32F103C8T6 (ARM Cortex-M3)
Fréquence d'horloge	16 MHz	72 MHz
Mémoire Flash	32 Ko	64 Ko
RAM	2 Ko	20 Ko
Tension de fonctionnement	5 V	3,3 V
Consommation	Moyenne à faible	Faible à très faible
Nombre d'E/S numériques	14 (dont 6 PWM)	37 (dont plusieurs PWM, SPI, I2C, UART, ADC)
Nombre d'entrées analogiques	8	10
Interfaces de communication	UART, SPI, I2C	UART (x3), SPI (x2), I2C (x2), USB, CAN
Communauté	Très large	Large et croissante
Coût	1000 à 2000 DZD	800 à 1400 DZD

Critère	Arduino Nano	Blue Pill
Facilité d'utilisation	Très simple	Plus complexe

2.5.1 Le cœur de la carte Blue Pill

Le microcontrôleur STM32F103C8T6 est basé sur un cœur ARM Cortex-M3 32 bits (figure 2-7) fonctionnant à 72 MHz. Ce type de processeur est moderne, rapide et efficace, tout en restant peu coûteux.



Figure 2-7. Cœur ARM Cortex-M3 32 bits microcontrôleur STM32 [10].

Nous expliquons dans le tableau 2-4 ci-dessous les fonctionnalités du cœur du processeur choisi afin de justifier notre choix du microcontrôleur [11], [12], [13] :

Tableau 2-4. Fonctionnalités du cœur ARM Cortex-M3 32 bits

Fonctionnalité	Description
Architecture 32 bits	Fonctionnement plus fluide, surtout avec plusieurs capteurs connectés.
Fréquences élevé (72 MHz)	Gestion en temps réel des capteurs et pilotage des actionneurs.
Faible consommation d'énergie	Idéale pour les systèmes autonomes (batterie/ panneau solaire).
Evolutivité	Compétences réutilisables pour des applications avancées

2.6 Conception de hardware

Dans cette section, la conception hardware de chaque bloc est présentée. Nous exposons les choix techniques effectués, tandis que le schéma global sera présenté en annexe. Le

logiciel EasyEDA a été utilisé pour la conception des circuits électriques et du circuit imprimé.

2.6.1 Bloc Capteurs météorologiques

Plusieurs capteurs météorologiques seront utilisés afin de collecter les données nécessaires (Voir figure 2-8). Les critères de sélection des capteurs pour notre projet incluent le coût, la disponibilité, et la facilité d'intégration. Le tableau 2-4 présente les capteurs météorologiques sélectionnés pour notre application.

Tableau 2-5. Capteurs météorologiques sélectionnés.

Donnée mesurée	Capteur sélectionné	Justification
Température et Humidité	Capteur DHT11 (Figure 2-8 (A))	Faible coût, facile à intégrer, mesure température et humidité simultanément.
Capteur de pluie	MH-RD (Figure 2-8 (B))	Détection simple de présence de gouttes, faible consommation
Radiation solaire	LDR (Figure 2-8 (C))	Peu coûteux, permet une estimation relative de la luminosité.
Vitesse du vent	Anémomètre analogique (Figure 2-8 (D))	Mesure mécanique facile à interfacer, utile pour l'étude de la ventilation
Direction du vent	Girouette à effet Hall (Figure 2-8 (E))	Donne la direction du vent en degrés, facile à intégrer avec des sorties analogiques

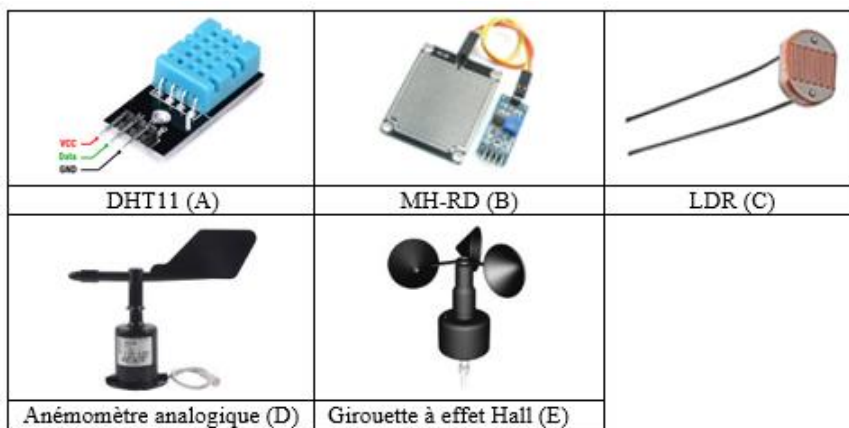


Figure 2-8. Capteurs météorologiques sélectionnés

2.6.2 Bloc Capteurs Agricoles

Dans une optique d'optimisation des pratiques agricoles, plusieurs capteurs spécifiques au sol et aux plantes ont été sélectionnés. Le choix a été guidé par les paramètres mesurables identifiés dans Le tableau 2-5 représentant une station agrométéorologique typique. La figure 2-9 suivant synthétise les capteurs agricoles sélectionnés.

Tableau 2-6. Capteurs agricoles sélectionnés.

Donnée mesurée	Capteur sélectionné	Justification
Humidité du sol	Capteur FC-28 (Figure 2-9 (A))	Surveillance directe de la teneur en eau du sol pour l'irrigation de précision.
Conductivité électrique (CE)	Capteur CE du sol (Figure 2-9 (B))	Permet d'évaluer la salinité du sol et d'ajuster les apports d'engrais
Température du sol	Thermistance intégrée (Figure 2-9 (C))	Essentiel pour le suivi des conditions de germination ou de croissance.

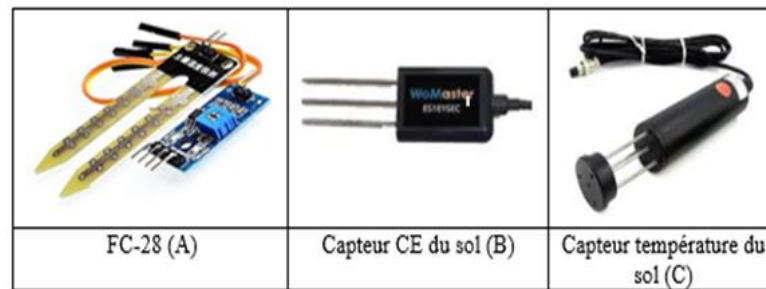


Figure 2-9. Les capteurs agricoles sélectionnés.

2.6.3 Bloc Communication

La communication des données collectées repose sur deux modalités complémentaires : une liaison locale pour les tests et la supervision directe, et une liaison distante pour la transmission des mesures vers une unité centrale.

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

- La Communication locale via la technologie UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) permet la transmission série de données entre le microcontrôleur et un terminal local (PC ou écran série). Un adaptateur UART-USB type est utilisé pour établir cette communication (figure 2-11)
- Tandis que la Communication distante via la technologie de liaison Radio Fréquence (2.4 GHz) permet le transfert sans fil des données capteurs vers une unité de réception distante (base de données/cloud). Le circuit nRF24L01 a été sélectionné pour cette communication (figure 2-10)



Figure 2-10. Module de transmission NRF24L01 [14], [15]

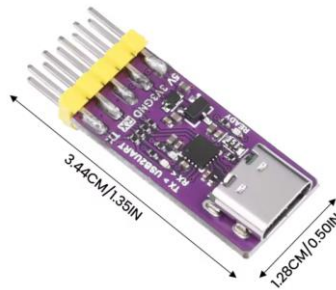


Figure 2-11. Adaptateur UART-USB CH343 [16]

Le module nRF24L01 communique avec le microcontrôleur via le protocole SPI et gère la transmission sans fil à l'aide du protocole embarqué Enhanced ShockBurs, qui simplifie les échanges en assurant la retransmission automatique, l'accusé de réception et le contrôle d'intégrité. [17]

Le tableau 2-6 suivant regroupe les trois protocoles : UART, SPI et Enhanced ShockBurst utilisés pour la communication locale ainsi que distante dans notre projet.

Tableau 2-7. Les trois protocoles utilisés : UART, SPI et Enhanced ShockBurst [17], [18], [19]

Protocole	Type de communication	Utilisation	Interface physique	Vitesse	Mode de communication
UART	Série asynchrone	Communication locale	TX / RX (2 fils)	Jusqu'à 1 Mbps	Point à point (full-duplex)
SPI	Série synchrone	Interface entre MCU et module nRF24L01	MOSI, MISO, SCK, CS (4 fils)	Jusqu'à 10 Mbps	Maître-esclave (full-duplex)
Enhanced ShockBurst	Radio sans fil propriétaire	Communication distante entre nœuds	Radio Fréquence (2,4 GHz ISM)	250 kbps, 1 Mbps, 2 Mbps	Multiceiver

2.6.4 Bloc Afficheur

Le bloc d'affichage utilise un écran LCD 2x16, accompagné d'un montage monostable basé sur le circuit NE555. Ce montage permet d'allumer le rétroéclairage de l'écran pendant une durée d'une minute. La figure 2-12 montre l'afficheur sélectionné.

2.6.4.1 Le rôle et fonctionnement de circuit monostable à base de NE555

Le circuit monostable basé sur le circuit NE555 agit comme un générateur d'impulsion unique. Lorsqu'il reçoit un front descendant sur la broche Trigger, il déclenche une impulsion de sortie de durée déterminée, pendant laquelle la sortie reste à l'état haut. [20]

Cette durée est définie par la formule suivante :

$$T = 1.1 \times R \times C$$

Où R est une résistance et C un condensateur.

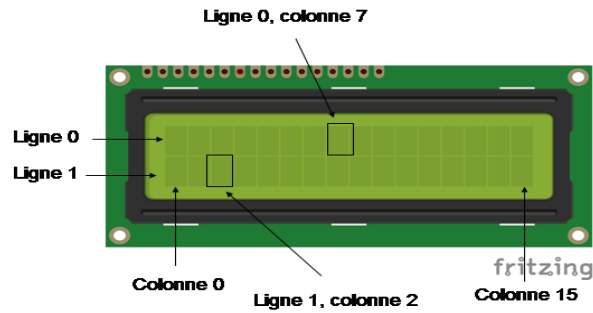


Figure 2-12. Ecran LCD 2x16

2.6.5 Bloc d'énergie

Afin d'assurer l'autonomie énergétique du module, un système photovoltaïque couplé à une batterie a été retenu. Deux sources d'énergie complémentaires sont ainsi intégrées pour alimenter notre système (Voir figure 2-13).

- **Une batterie rechargeable :** qui fournit l'énergie nécessaire durant la nuit ou les périodes sans soleil. Elle permet au dispositif de fonctionner de manière autonome et continue.
- **Un panneau solaire :** est utilisé pour recharger la batterie et alimenter directement le système pendant la journée. Cette solution convient parfaitement aux environnements isolés et favorise l'autonomie énergétique.

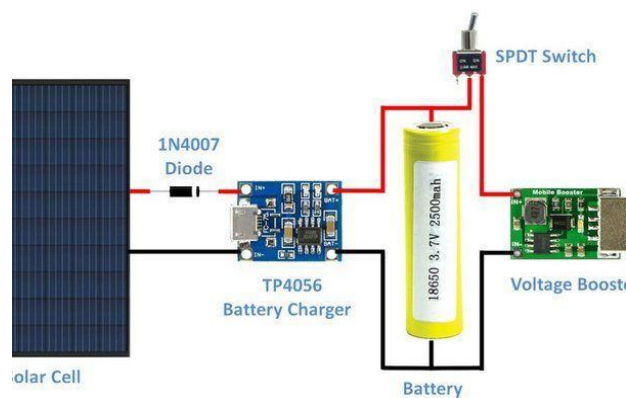


Figure 2-13. Système photovoltaïque couplé à une batterie rechargeable

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

Un module booster DC-DC est intégré dans le bloc d'alimentation afin d'élever la tension de la batterie (généralement 3.7 V) à une tension stable de 5 V, nécessaire pour certains modules ou capteurs du système. Ce convertisseur élévateur garantit un fonctionnement constant, même lorsque la batterie est partiellement déchargée. [21]

Le tableau 2-7 ci-dessous présente les moyens d'alimentation de notre système.

Tableau 2-8. Moyens d'alimentation du système [22], [23]

Source d'énergie	Batterie rechargeable	Panneau solaire
Technologie	Lithium	Photovoltaïque (5V / 6V)
Composants utilisés	Batterie Li-ion 3.7V	Panneau solaire compact
Utilisation	Fournir une alimentation autonome durant la nuit	Fournir une alimentation en journée et recharger la batterie
Justification	Haute densité énergétique, rechargeable, légère, facilement intégrable	Source renouvelable, adaptée aux zones rurales

- **Dimensionnement du panneau solaire:**

Pour dimensionner correctement la puissance du panneau solaire, nous avons tout d'abord estimé la consommation totale du système en utilisant la formule :

$$Puissance (mW) = Tension (V) \times Courant (mA).$$

Tout en prévoyant une marge de sécurité. La consommation prévue du système est d'environ 0,5 W. Afin de compenser les pertes éventuelles et de garantir une recharge efficace, nous avons retenu une puissance de panneau solaire comprise entre 1,5 W et 2 W au minimum.

Le dimensionnement de la batterie a été calculé en tenant compte de la consommation électrique de chaque composant du système. Le microcontrôleur STM32F103C8T6 consomme 20 mA sous 3,3 V (66 mW), tandis que les capteurs DHT11, FC-28 et MH-RD requièrent respectivement 2,5 mA (8,25 mW), 30 mA (150 mW) et 10 mA (50 mW). Le module nRF24L01 ajoute 14 mA (46,2 mW) sous 3,3 V. La consommation totale estimée se situe entre 80 et 100 mA, avec une puissance globale d'environ 320 à 350 mW. Pour anticiper

les pertes et les pics de consommation, une marge a été appliquée, portant la puissance nominale à 500 mW pour le dimensionnement final de la batterie.

2.6.6 Prototype de métrologie embarqué réalisé

Un premier prototype du système de métrologie embarqué a été conçu et assemblé à l'aide d'une carte à pastilles (Veroboard), permettant une mise en œuvre manuelle des composants électroniques par soudure. Ce prototype, représenté dans la figure 2-14, constitue une étape préliminaire avant l'éventuelle réalisation d'un circuit imprimé définitif.

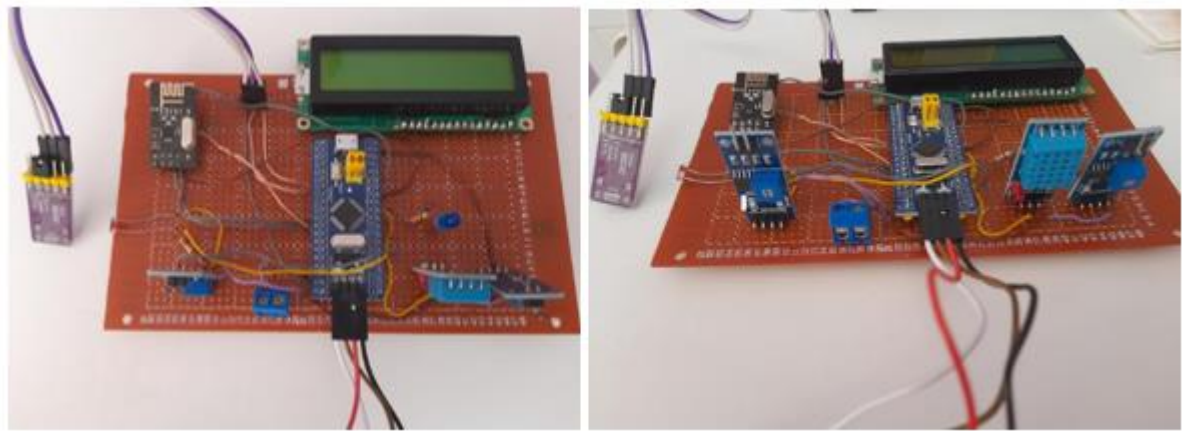


Figure 2-14. Prototype de métrologie embarqué réalisé

2.7 Conception de software

La conception logicielle de notre système repose sur une approche déterministe et modulaire, adaptée aux contraintes du système embarqué avec une basse consommation. Cette conception se compose des opérations logiques, une activation périodique via RTC (Real-Time Clock), et un mode veille énergétique (Sleep Mode) pour optimiser l'autonomie. L'ensemble de l'algorithme est implémenté dans l'environnement STM32CubeIDE, en langage C.

Le programme principal de notre conception est structuré en trois blocs fonctionnels successifs, définissant une boucle de traitement continue : l'initialisation, l'acquisition des données et la transmission. Ces blocs sont gérés via un organigramme logique représenté

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

dans la figure 2-15 ci-dessous. Les principales fonctionnalités de la conception sont représentées dans le tableau 2-8.

Notre système supporte deux modes de fonctionnement complémentaires :

- **Mode local** : les données collectées sont affichées immédiatement via l'interface UART sur un moniteur série ou un afficheur LCD, pour permettre un suivi en temps réel sur le terrain.
- **Mode distant** : les données sont transmises via RF (nRF24L01) vers une station de réception. Elles peuvent ensuite être stockées dans une base de données (InfluxDB) et visualisées via Grafana.

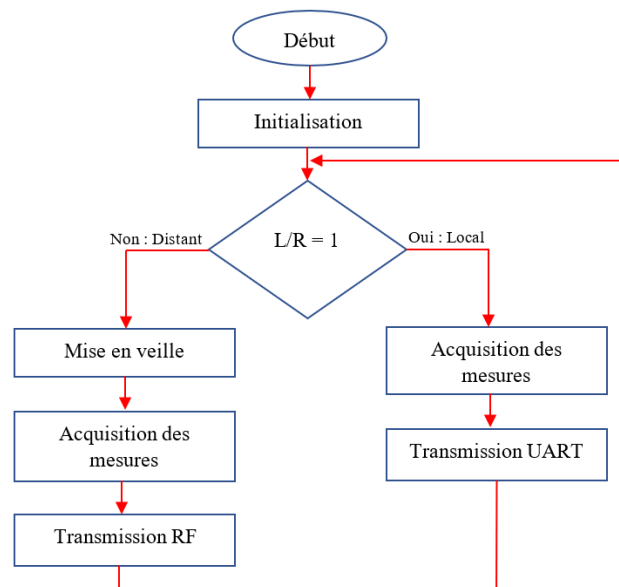


Figure 2-15. Organigramme logique de la conception du software.

Tableau 2-9. Fonctionnalités logicielles principales

Bloc fonctionnel	Fonctions exécutées
Initialisation	Configuration des périphériques internes : horloges, UART, RF, ADC, RTC, GPIO
Lecture capteurs	Activation des capteurs, acquisition de données analogiques et numériques

Traitement et transmission	Formatage des données, affichage sur écran, transmission UART et RF
Veille	Passage en mode sommeil avec réveil programmé par l'horloge RTC

2.7.1 Utilisation du RTC (Real-Time Clock)

Le RTC est configuré pour générer une interruption à intervalle régulier, pour notre système, nous la programmons toutes les 20 minutes. Lorsqu'une interruption est déclenchée, elle réveille le microcontrôleur STM32F103C8T6 pour lancer une nouvelle séquence de mesure. Cette méthode permet de réduire considérablement la consommation d'énergie. [24]

La carte Blue Pill, utilisée dans ce projet, possède une horloge externe de 32.768 kHz, idéale pour le RTC. Cette horloge donne une bonne précision et assure des réveils réguliers.

Le cristal de 32.768 kHz est utilisé dans le RTC car il s'agit d'une fréquence standard idéale pour les horloges : elle correspond à 2^{15} Hz, ce qui facilite la division binaire en secondes. Cette fréquence offre une grande précision tout en consommant très peu d'énergie, ce qui est parfaitement adapté aux systèmes embarqués fonctionnant en veille la majeure partie du temps. [25]

L'utilisation du RTC permet donc un fonctionnement automatique, régulier et économe en énergie, très utile pour les systèmes embarqués en agriculture connectée.

2.7.2 Gestion du mode veille (Sleep Mode)

Afin de maximiser l'autonomie énergétique, notre système utilise le mode veille profonde (Deep Sleep) disponible sur le microcontrôleur STM32F103C8T6. Entre deux cycles d'acquisition, le microcontrôleur désactive tous les périphériques inutilisés et entre dans un état de faible consommation. Il est ensuite réveillé par une interruption RTC ou une interruption externe où le paramètre de pluie est configuré. [26]

2.7.3 Logiciels utilisés dans notre projet

Dans le cadre de la réalisation de ce système de métrologie embarquée, plusieurs outils logiciels ont été mobilisés pour couvrir les différentes phases du développement la

Chapitre 2 : Conception du Système de Métrologie Embarquée

conception matérielle, l'acquisition et le traitement. Le tableau 2-9 ci-dessous résume les principaux logiciels utilisés, accompagnés de leur rôle spécifique dans notre projet.

Tableau 2-10. Logiciels utilisés pour la conception de ME

Logiciel	Fonction principale	Utilisation dans le projet
STM32CubeIDE	Développement et débogage embarqué	Programmation et configuration du microcontrôleur STM32F103C8T6 en langage C
EasyEDA	Conception du circuit électronique	Réalisation de schémas électroniques pour l'ensemble du système

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les fondements de la conception de notre métrologie embarquée destiné à l'agriculture intelligente. Nous avons détaillé l'approche méthodologique suivie, en commençant par la définition des exigences fonctionnelles et non fonctionnelles. Ces exigences ont guidé les choix techniques et architecturaux du système, en particulier la sélection de la carte (Blue Pill) et des capteurs, aussi bien météorologiques qu'agricoles. L'architecture matérielle en blocs a permis de structurer clairement les différentes fonctions du système, facilitant son développement et sa maintenance future.

Ce travail a permis de jeter les bases solides d'un système embarqué modulaire, évolutif, économe en énergie, et adapté aux conditions réelles du terrain. Dans le prochain chapitre, nous aborderons les tests du système

Chapitre 3 : Réalisation, Tests et Résultats

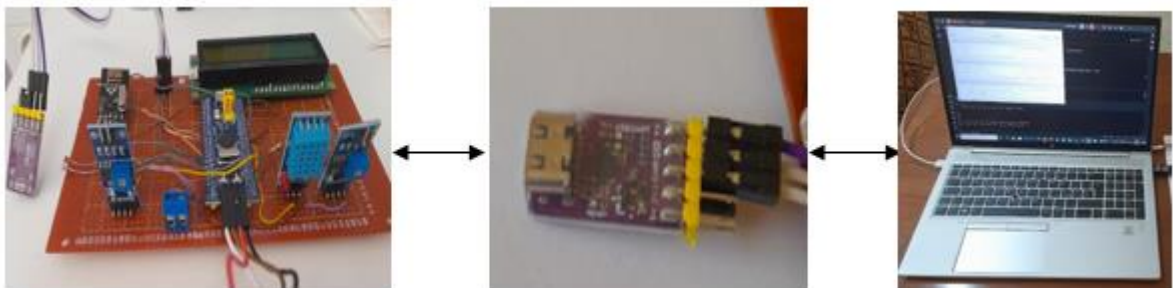
3.1 Introduction

Ce chapitre présente les tests réalisés pour vérifier que la solution de métrologie embarquée fonctionne correctement. Deux types de tests ont été faits :

- Le premier est un test local, basé sur une connexion UART directe entre la carte Blue Pill et un ordinateur.
- Le second est un test à distance, utilisant un module radio nRF24L01 qui envoie les données vers une carte Raspberry Pi 4. Cette carte joue le rôle de passerelle : elle reçoit les données via le protocole MQTT et les enregistre dans une base de données InfluxDB

3.2 Test de fonctionnement en mode local

L'objectif de ce test est de vérifier que les mesures sont bien acquises par le module développé et envoyée correctement via UART vers un ordinateur.



3.2.1 Application Python développée

Une application en Python a été conçue pour établir la communication UART entre le PC et le module embarqué. Cette application s'appuie principalement sur deux bibliothèques :

Chapitre 3 : Réalisation, Test et Résultats

- PyQt5 : utilisée pour la conception de l'interface graphique.
- PySerial : utilisée pour établir la communication série entre l'application et le module de métrologie embarquée.

L'environnement de développement utilisé est PyCharm, un outil très performant et largement adopté pour le développement d'applications Python, grâce à ses nombreuses fonctionnalités avancées et sa simplicité d'utilisation. La version python utilisée est 3.13.5.

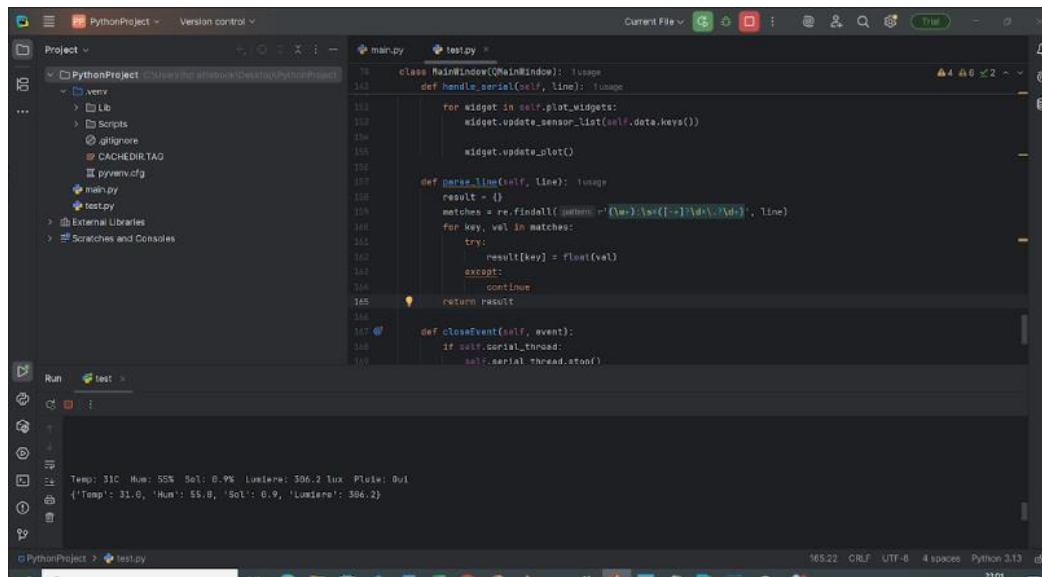


Figure 3-1. Vue initiale de l'interface de l'application

La figure 3-1 montre l'interface graphique au lancement de l'application développée. Avant l'ajout de tout graphique, seuls les contrôles principaux sont visibles :

- Les champs de configuration Port et Baudrate permettent de spécifier les paramètres de communication série.
- Le bouton "Open Serial" permet d'ouvrir le port série spécifié avec le module développé.
- Le bouton "Add Plot" permet d'ajouter dynamiquement des graphiques pour visualiser les mesures.
- La zone centrale, encore vide, est une zone de défilement destinée à contenir les futurs graphiques.

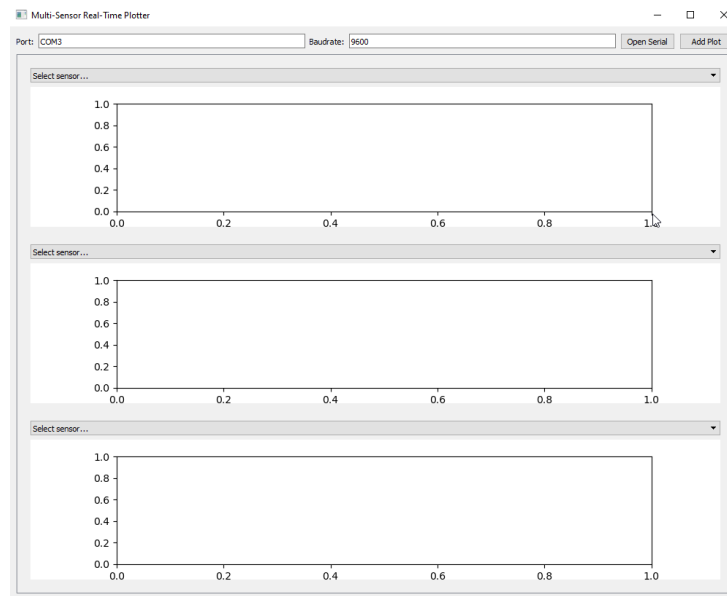


Figure 3-2. Ajout des graphiques suite au clic sur "Add Plot"

Dès que l'utilisateur clique sur le bouton "Add Plot", un nouveau widget graphique est ajouté dynamiquement à la zone centrale de l'interface (figure 3-2). Ce widget comprend :

- Une ComboBox en haut du graphique, qui liste automatiquement les noms des mesures détectées à partir des données série reçues. L'application lit chaque ligne de données envoyée (par exemple : Temp:25 Hum:60, ..) et reconnaît automatiquement les noms des mesures (Temp, Hum, etc.). Elle les ajoute dynamiquement à une liste déroulante pour permettre leur affichage.
- Une zone de tracé (graphique) où les données de la mesure sélectionnée seront affichées en temps réel sous forme de courbe.

L'utilisateur peut ajouter autant de graphiques que nécessaire, chacun étant configurable indépendamment grâce à sa propre ComboBox

3.3 Tests et validation des capteurs via PyCharm

Les capteurs du système ont été testés individuellement dans un environnement contrôlé à l'aide de scripts Python exécutés sous PyCharm, afin de vérifier la validité des valeurs mesurées. Les résultats ont été visualisés sous forme de graphiques pour faciliter l'analyse. Les tests illustrés par leurs graphiques sont présentés dans la section suivante.

Chapitre 3 : Réalisation, Test et Résultats

Le tableau 3-1 ci-dessous présente les connexions des capteurs et modules réalisées dans STM32CubeIDE.

Tableau 3-1. Connexions et fonction des capteurs et modules réalisées dans STM32CubeIDE

Capteur / Module	Broche STM32	Fonction dans STM32CubeIDE
DHT11 (DATA)	PA7	GPIO Output Open-Drain
FC-28 (Analogique)	PA0	ADC1_IN0
LDR	PA1	ADC1_IN1
MH-RD (Pluie)	PA2	ADC1_IN2
UART TX (USB)	PA9	USART1_TX
UART RX	PA10	USART1_RX
nRF24L01 – CE	PB0	GPIO Output Push-Pull
nRF24L01 – CSN	PB1	GPIO Output Push-Pull
nRF24L01 – SCK	PB3	SPI1_SCK
nRF24L01 – MISO	PB4	SPI1_MISO
nRF24L01 – MOSI	PB5	SPI1_MOSI

3.3.1 Test du capteur DHT11 (Température et humidité)

Le capteur DHT11 a été testé en le plaçant près d'une source de chaleur (un briquet allumé) afin de tester la température (figure 3-3), puis en soufflant de l'air humide pour simuler une augmentation de l'humidité. Le graphique de la figure 3-4 obtenu montre une température stable avec une hausse progressive de l'humidité relative.

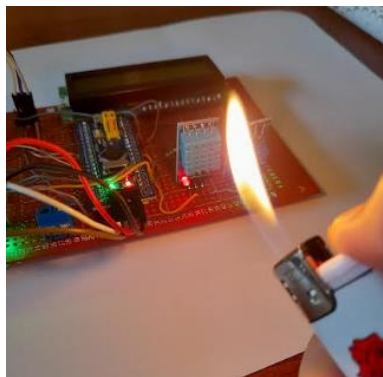


Figure 3-3. Test du capteur DHT 11

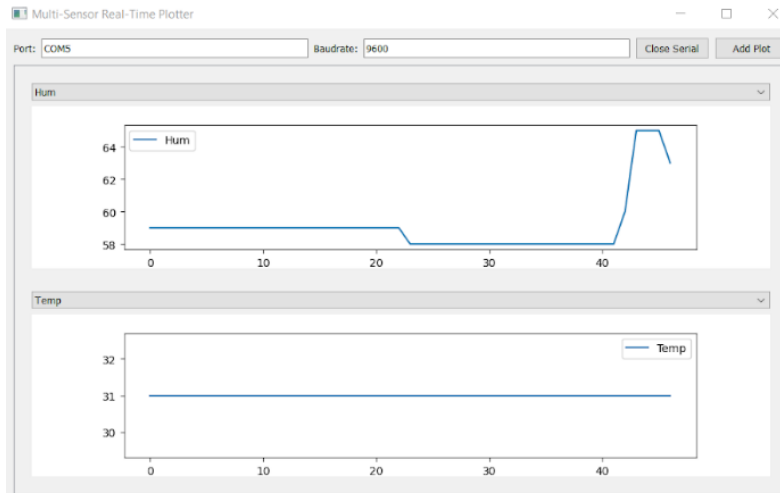


Figure 3-4. Visualisation des données du DHT11

3.3.2 Test du capteur FC-28 (Humidité du sol)

Le FC-28 a été inséré dans un sol sec, puis de l'eau a été ajoutée progressivement comme il montré dans la figure 3-5. Les graphiques 3-6 et 3-7 reflètent une valeur faible de l'humidité du sol au départ, qui augmente de façon nette après l'humidification du substrat. Cela valide la capacité du capteur à détecter l'humidité en conditions réelles.



Figure 3-5. Test du capteur FC-28

Chapitre 3 : Réalisation, Test et Résultats

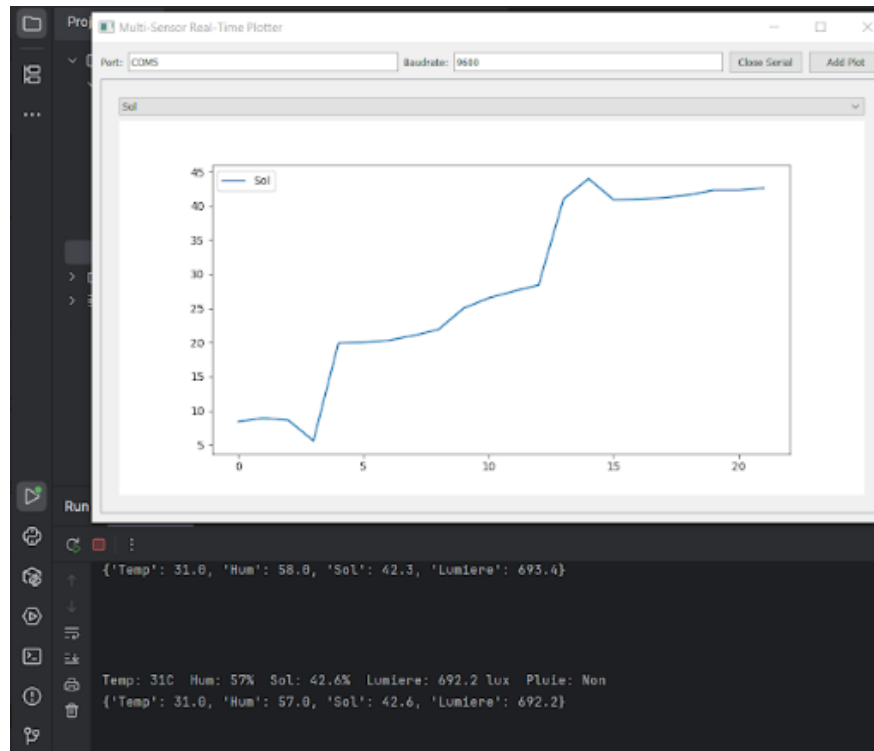


Figure 3-6. Visualisation des données de FC-28 (humidité du sol inférieure)

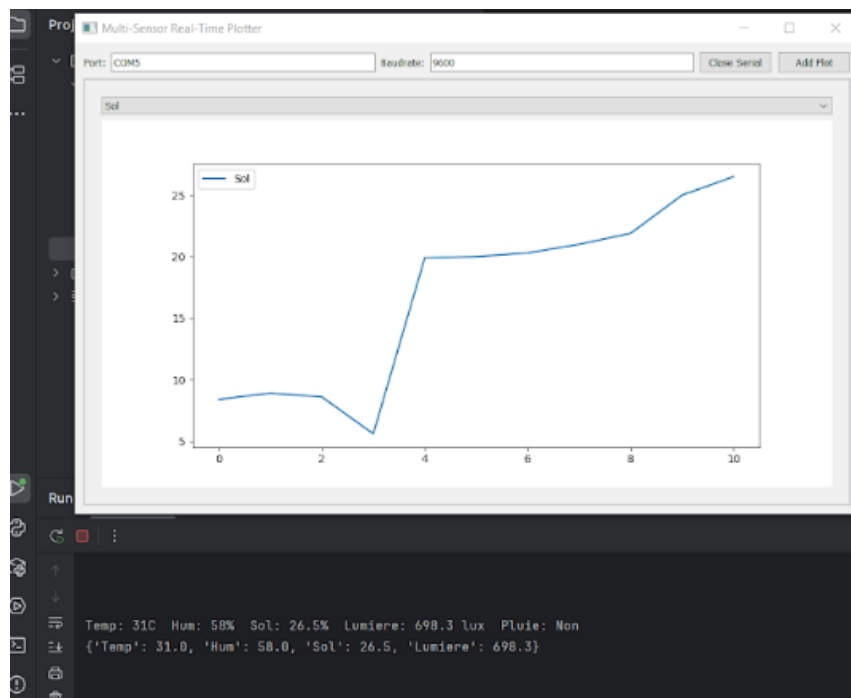


Figure 3-7. Visualisation des données de FC-28 (humidité du sol supérieure)

3.3.3 Test du capteur MH-RD (Détection de pluie)

Pour simuler une condition de pluie, quelques gouttes d'eau ont été déposées sur le capteur MH-RD (figure 3-8). Le système affiche "OUI" en présence d'eau et "NON" dès qu'il est sec (figures 3-9, 3-10). Ce test confirme le fonctionnement binaire fiable du capteur.

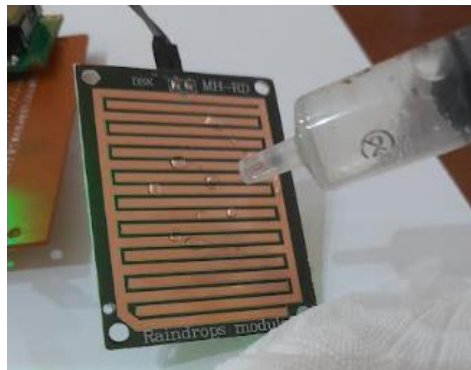


Figure 3-8. Test du capteur MH-RD

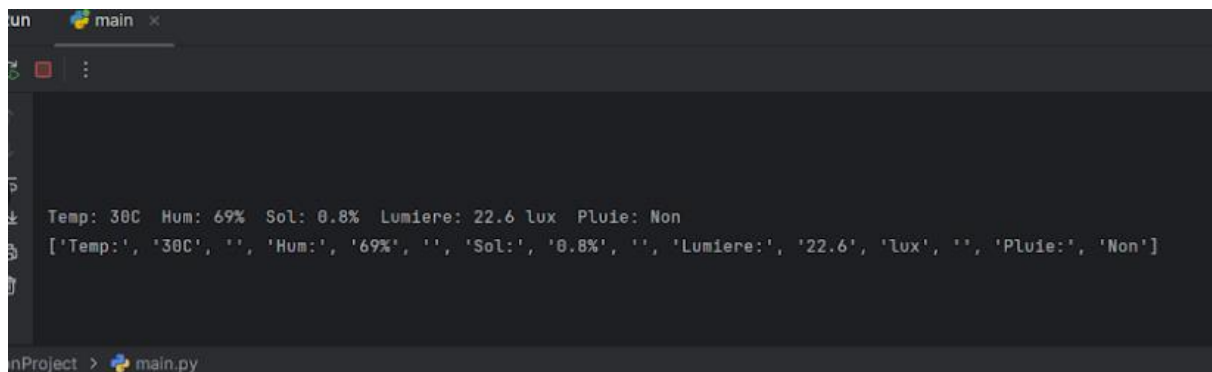


Figure 3-9. Visualisation en absence de pluie

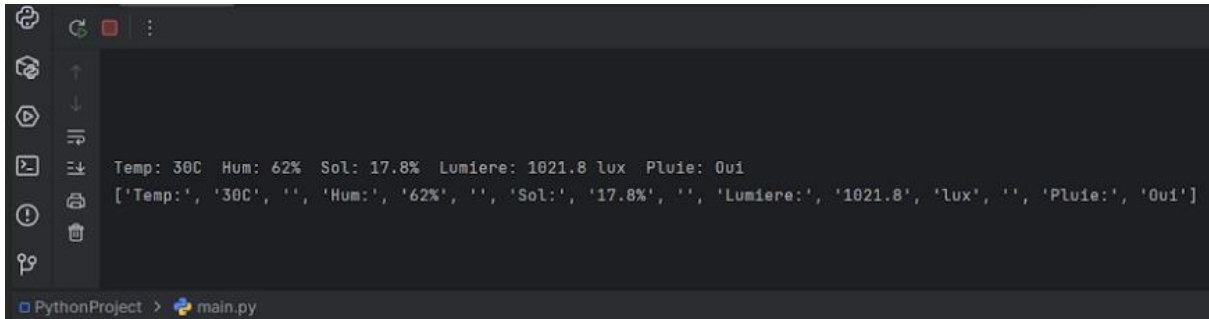


Figure 3-10. Visualisation en présence de pluie

3.3.4 Test du capteur LDR (Lumière ambiante)

Le capteur LDR a été testé dans deux conditions : en lumière ambiante normale, puis en couvrant la cellule avec le doigt (figure 3-11). On observe sur le graphique de la figure 3-12 une valeur élevée de luminosité sans obstacle, et une baisse nette lorsque la lumière est obstruée.

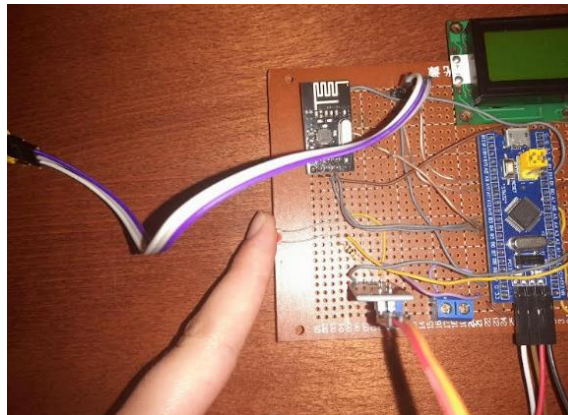


Figure 3-11. Test de LDR

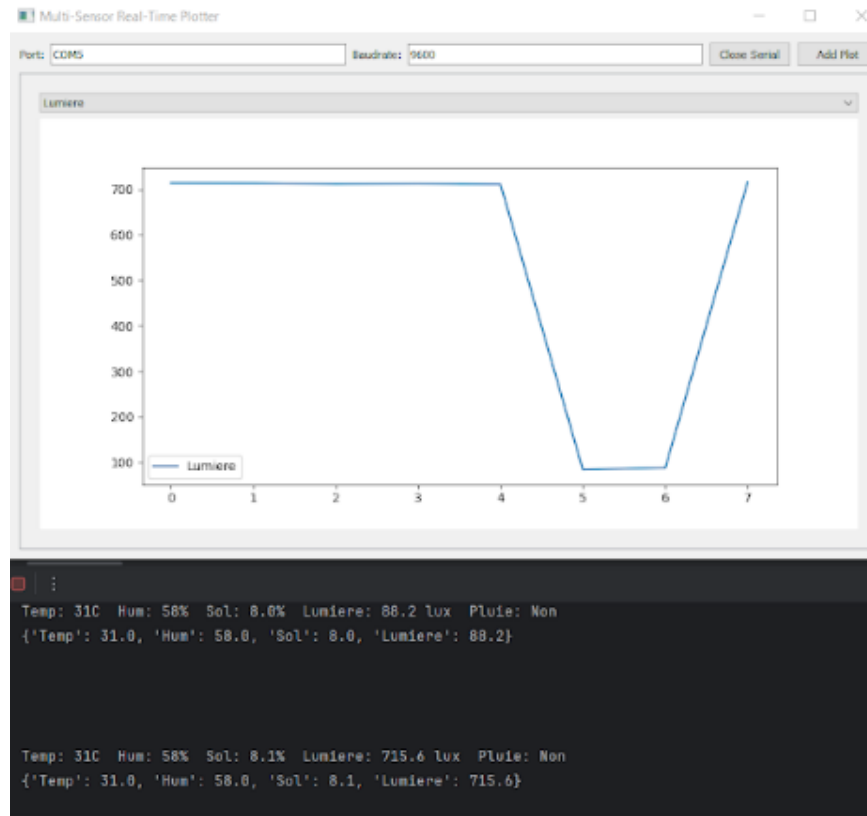


Figure 3-12. Visualisation des données de la LDR

3.3.5 Test du système complet avec tous les capteurs

Après la validation individuelle de chaque capteur, un test global a été réalisé en intégrant l'ensemble des capteurs (DHT11, FC-28, MH-RD, LDR) dans le système. Ce test a pour but de simuler une situation réelle de mesure environnementale en fonctionnement simultané.

Chaque capteur a été soumis à une condition spécifique de test (chaleur, humidité, gouttes d'eau, ombrage) comme représenté dans la figure 3-13, et les données ont été visualisées en temps réel à l'aide de scripts Python exécutés sous PyCharm, avec affichage graphique (figure 3-14). Cela permet de vérifier non seulement la cohérence des mesures, mais aussi l'interaction fluide entre les différents blocs fonctionnels du système embarqué.

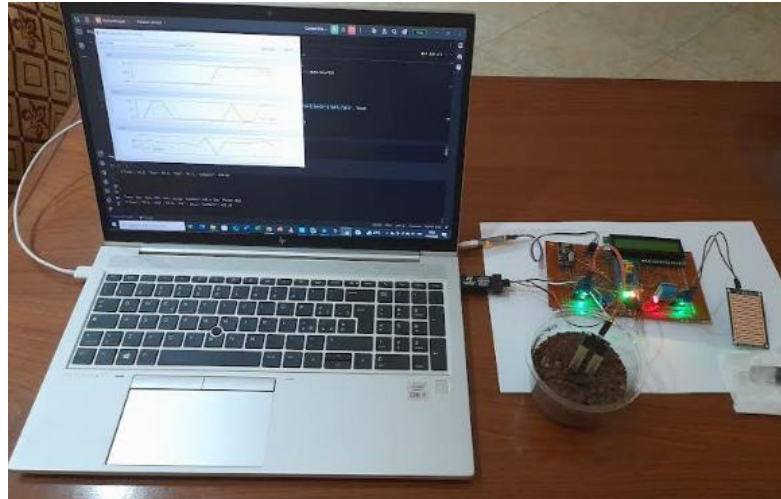


Figure 3-13. Test du système complet

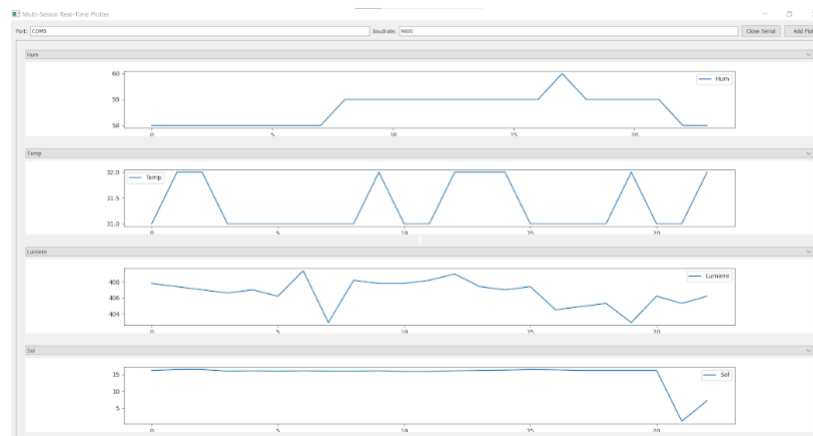


Figure 3-14. Visualisation des données de l'ensemble des capteurs

3.4 Test de fonctionnement en mode distant

Le mode distant vise à simuler le fonctionnement réel de notre système dans un déploiement distribué, où les mesures environnementales collectées dans un champ agricole sont transmises vers une station de base distante. Ce mode repose sur l'usage de deux microcontrôleurs et d'un réseau de communication sans fil via les modules nRF24L01.

3.4.1 Architecture du système en mode distant

Notre système est structuré comme suit :

- Le STM32F103C8T6, déployé en tant que nœud capteur qui va acquérir les données depuis les capteurs (DHT11, FC-28, LDR, MH-RD).
- Ces données sont ensuite transmises via un module nRF24L01, en utilisant une liaison RF 2.4 GHz, vers un second microcontrôleur distant.
- Le Raspberry Pi Pico est utilisé comme station de réception, connecté lui aussi à un module nRF24L01, et configuré pour recevoir les données et les afficher via Thonny IDE.

La figure 3-15 ci-dessous représente l'architecture globale de notre système en mode distant.

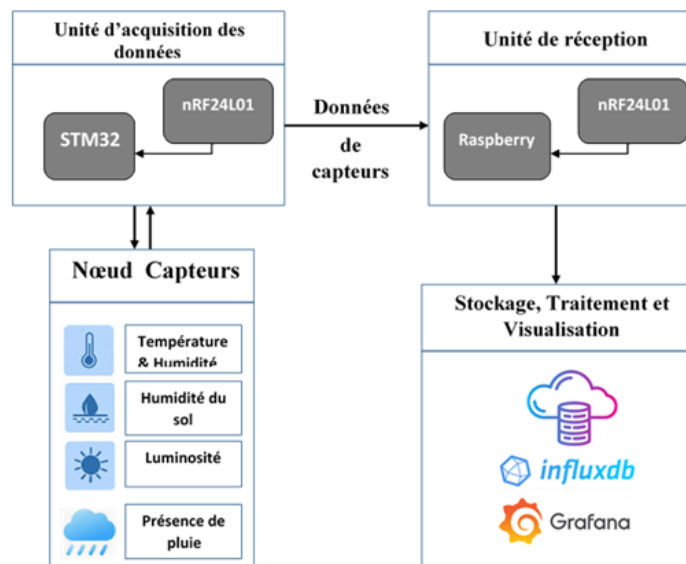


Figure 3-15. Architecture globale du système en mode distant

Pour la visualisation des données, l'outil Grafana est utilisé. Il est installé sur un PC connecté au réseau. Ce PC accède à la base de données InfluxDB hébergée sur la passerelle Raspberry Pi, afin d'afficher les mesures sous forme de graphiques (tableau 3-2).

Tableau 3-2. Outils de Software utilisés

Outil	Description	Justification de choix
Thonny IDE	Programmation et exécution du script Python sur le Raspberry Pi Pico pour recevoir les données via nRF24L01	Interface simple et légère, particulièrement adaptée aux microcontrôleurs comme le Pico
InfluxDB	Stockage des mesures reçues sous forme de séries temporelles (temps, valeur, capteur)	Base de données optimisée pour les données IoT et les mesures continues en temps réel
Grafana	Création de tableaux de bord graphiques pour la visualisation des données stockées dans InfluxDB	Outil puissant, open source et interactif, permettant une visualisation claire et dynamique

3.4.2 Essai initial avec Raspberry Pi 4 (tentative échouée)

Dans une première tentative, nous avons prévu d'utiliser un Raspberry Pi 4 Model B comme station de réception (figure 3-16), afin d'accomplir les fonctions suivantes :

1. Réception des données envoyées par le module via le nRF24L01.
2. Publication des données sur un broker MQTT local.
3. Stockage des mesures dans une base de données InfluxDB

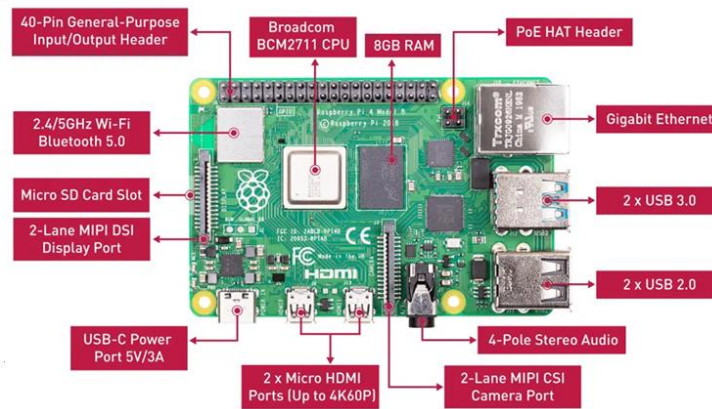


Figure 3-16. La carte Raspberry PI 4

Chapitre 3 : Réalisation, Test et Résultats

Le système d'exploitation Raspberry Pi OS a été correctement flashé sur la clé USB, et toutes les configurations réseau ont été suivies successivement (figure 3-17). Cependant, l'accès au système via les commandes réseau classiques : ping raspberrypi.local et ssh pi@raspberrypi.local n'a pas abouti. L'hôte raspberrypi.local n'a pas pu être trouvé, malgré la vérification des branchements, du câble et du réseau (figure 3-18).



Figure 3-17. Configuration successive de Raspberry pi 4

```
Invite de commandes
Microsoft Windows [version 10.0.19045.5965]
(c) Microsoft Corporation. Tous droits réservés.

C:\Users\hp elitebook>ping raspberrypi.local
La requête Ping n'a pas pu trouver l'hôte raspberrypi.local. Vérifiez le nom et essayez à nouveau.

C:\Users\hp elitebook>ssh pi@raspberrypi.local
ssh: Could not resolve hostname raspberrypi.local: H\364te inconnu.

C:\Users\hp elitebook>
```

Figure 3-18. Tentative de connexion SSH (commande introuvable)

3.4.3 Passage au Raspberry Pi Pico et réception des données

Face à l'échec de la méthode précédente, nous avons opté pour l'utilisation d'un Raspberry Pi Pico (figure 1-19), plus simple à manipuler et parfaitement adapté pour recevoir des trames via nRF24L01. Le branchement du Raspberry Pi Pico avec nRF24L01 est présenté dans le tableau 3-3 ci-dessous.

La programmation a été effectuée avec Thonny IDE, et le script en attente de réception a été chargé avec succès. Une fois le système complet branché (Voir figure 1-20), le terminal affiche : En attente de données..., Ce message indique que le Pico est correctement initialisé et prêt à recevoir les données du STM32 (Voir figure 1-21).

Tableau 3-3. Branchement du Raspberry Pi Pico avec nRF24L01

Pin nRF24L01	Broche Pico	Rôle
VCC	3V3	Alimentation 3.3V
GND	GND	Masse commune
CE	GP17	Contrôle d'activation RF
CSN	GP16	Sélection SPI (chip select)
SCK	GP18	Horloge SPI
MOSI	GP19	Transmission SPI
MISO	GP20	Réception SPI

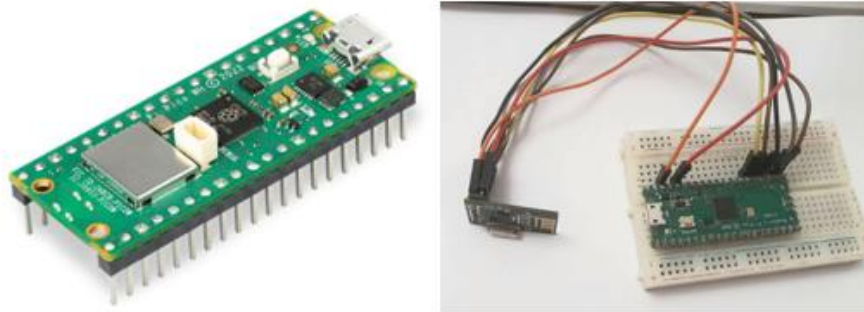


Figure 3-19. Branchement du Raspberry Pi Pico avec nRF24L01



Figure 3-20. Branchement du système complet

```
Thonny - C:\Users\hp\OneDrive\Downloads\main.py @ 27.1
File Edit View Run Tools Help
main.py [Save (Ctrl+S)] [Run (Ctrl+R)] [Project] [Run (Ctrl+R)]
8      mosi=Pin(19),
9      miso=Pin(20))
10
11 # Broches de contrôle
12 csn = Pin(16, mode=Pin.OUT)
13 ce = Pin(17, mode=Pin.OUT)
14
15 # Initialisation du module NRF24L01
16 nrf = NRF24L01(spi, csn, ce, payload_size=32)
17 nrf.open_rx_pipe(1, b"1Node") # Doit correspondre à l'adresse TX
18 nrf.start_listening()
19
20 print("🔊 En attente de données...")
21
22 while True:
23     if nrf.any():
24         buf = nrf.recv()
25         print("🔊 Reçu :", buf.decode('utf-8'))
26         utime.sleep(0.2)
27
Shell
>>> %Run -c $EDITOR_CONTENT
MPY: soft reboot
🔊 En attente de données...
```

Figure 3-21. L'interface de Thonny IDE dans l'état « en attente de données »

3.5 Perspectives d'amélioration

Bien que la réception ait été partiellement mise en œuvre, la visualisation via InfluxDB et Grafana n'a pas été finalisée. En effet, l'intégration des données dans une base de données

temporelle et leur affichage en tableaux de bord dynamiques reste à développer. Cette tâche peut constituer une piste de poursuite du travail.

Nous proposons également, à plus long terme, d'ajouter une couche d'analyse intelligente basée sur des techniques de Machine Learning et Deep Learning afin de :

- Détecter des anomalies climatiques
- Prédire les besoins en irrigation
- Optimiser les cycles de culture

3.6 Conclusion

Les tests réalisés ont permis de valider le bon fonctionnement des capteurs et la fiabilité des données mesurées, aussi bien en mode local (affichage via UART et PyCharm) qu'en mode distant (réception via Raspberry Pi Pico et nRF24L01). Bien que la visualisation finale via InfluxDB et Grafana reste à développer, les résultats obtenus confirment l'efficacité du système et ouvrent des perspectives d'amélioration futures.

Conclusion générale

La surveillance des paramètres environnementaux joue un rôle essentiel dans l'optimisation des pratiques agricoles modernes. Dans ce projet, nous avons développé un système de métrologie embarqué à faible coût, basé sur la carte STM32F103C8T6 (Blue Pill), permettant de mesurer en temps réel des grandeurs clés telles que l'humidité du sol, la température, la luminosité et la présence de pluie.

Deux scénarios ont été prévus : un fonctionnement local avec affichage des données via UART, et un fonctionnement distant avec transmission des mesures vers un Raspberry Pi via les modules nRF24L01. Cette architecture visait à démontrer la faisabilité d'une solution connectée pour la surveillance agricole.

Au cours de la réalisation, plusieurs difficultés ont été rencontrées. L'indisponibilité de certains composants électroniques a retardé l'assemblage du système, mais ce problème a pu être résolu. De plus, les capteurs analogiques ne fournissaient pas de données directement exprimées en unités physiques, ce qui a nécessité un traitement complémentaire. Enfin, la carte Raspberry Pi 4 n'a pas fonctionné comme prévu, ce qui nous a empêchés de réaliser le test distant de transmission sans fil.

Malgré ces obstacles, ce travail nous a permis de consolider nos compétences en électronique embarquée, en acquisition de données et en programmation. Pour aller plus loin, l'intégration de nouveaux capteurs, la mise en place d'une interface web, ou l'usage de solutions de visualisation comme Grafana pourraient renforcer l'intérêt de ce système dans un cadre réel d'exploitation agricole.

Annexe A

Schéma électrique de la carte conçue

A.1 Le schéma électrique du module conçu

Cette annexe présente le schéma électrique global réalisé avec le logiciel EasyEDA, représentant les connexions entre le microcontrôleur, les capteurs, les modules de communication, l'afficheur et le bloc d'alimentation.

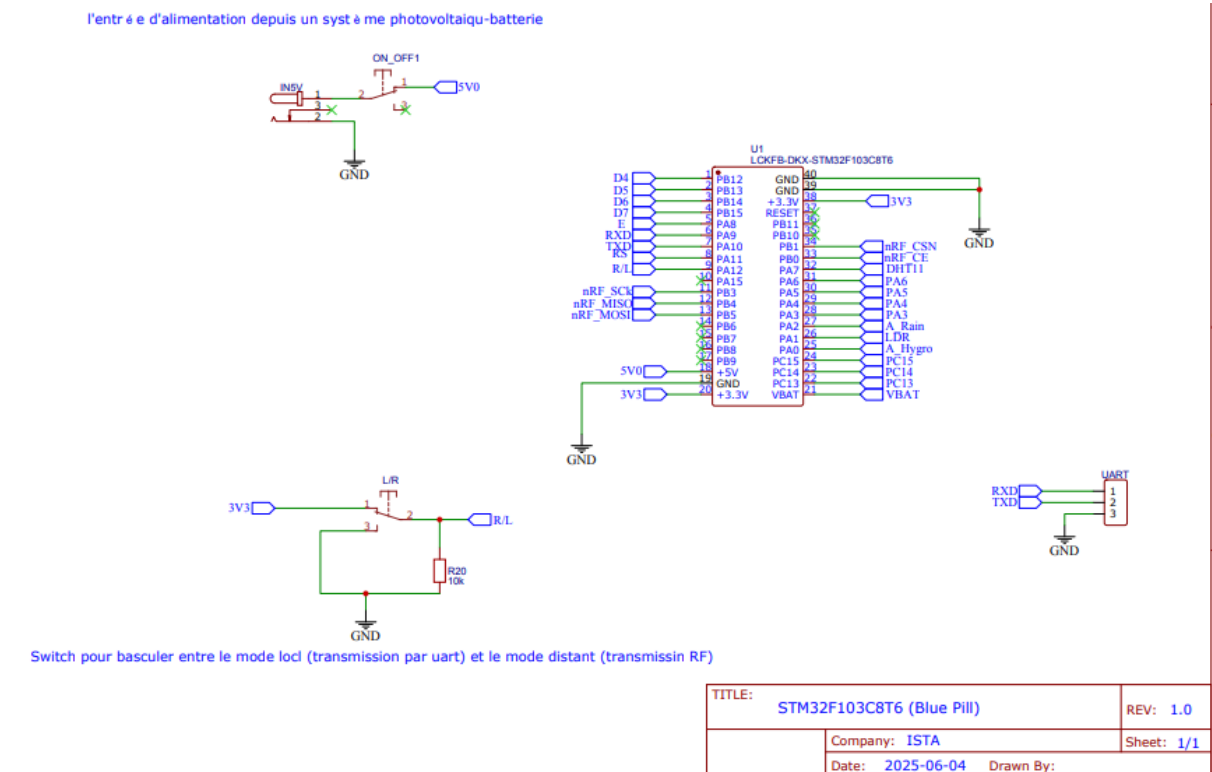


Figure A- 1. Schéma électrique du système de métrologie embarquée

A.1.1 Schéma électrique des capteurs météorologiques

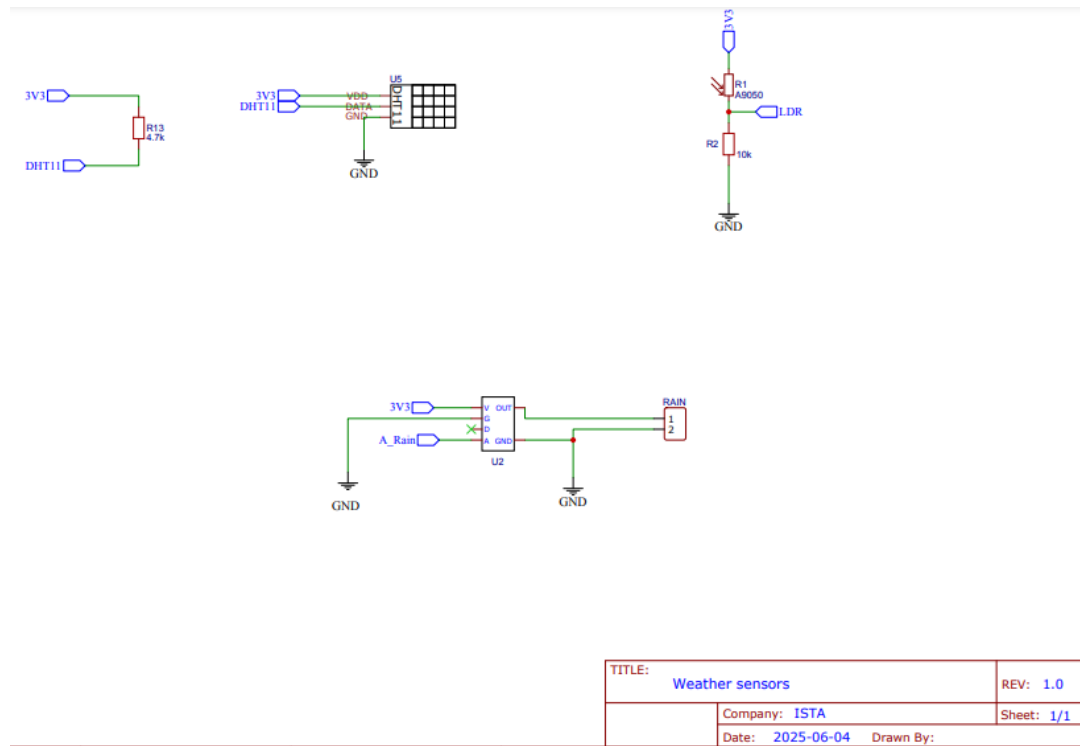


Figure A- 2. Schéma électrique des capteurs DHT11, MH-RD et LDR

A.1.2 Schéma électrique des capteurs agricoles

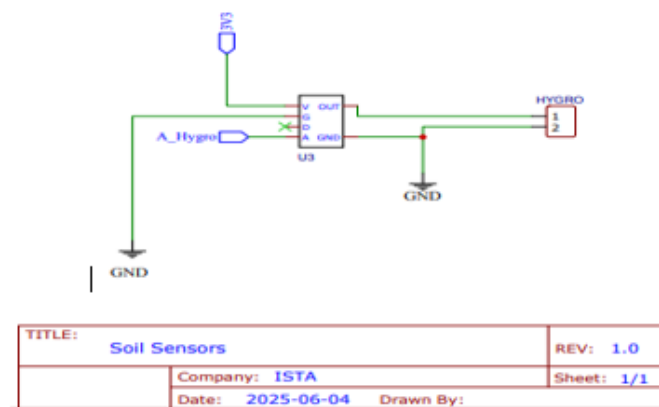


Figure A- 3. Schéma électrique du capteur FC-28.

A.1.3 Schéma électrique du module nRF24L01

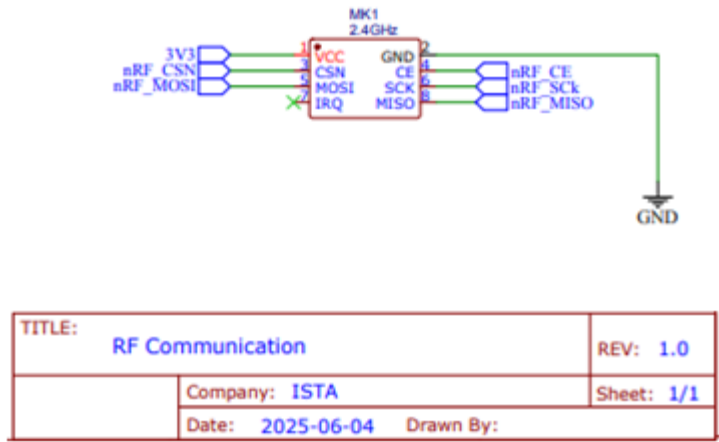


Figure A- 4. A. Schéma électrique du nRF24L01.

A.1.4 Schéma électrique du afficheur LCD

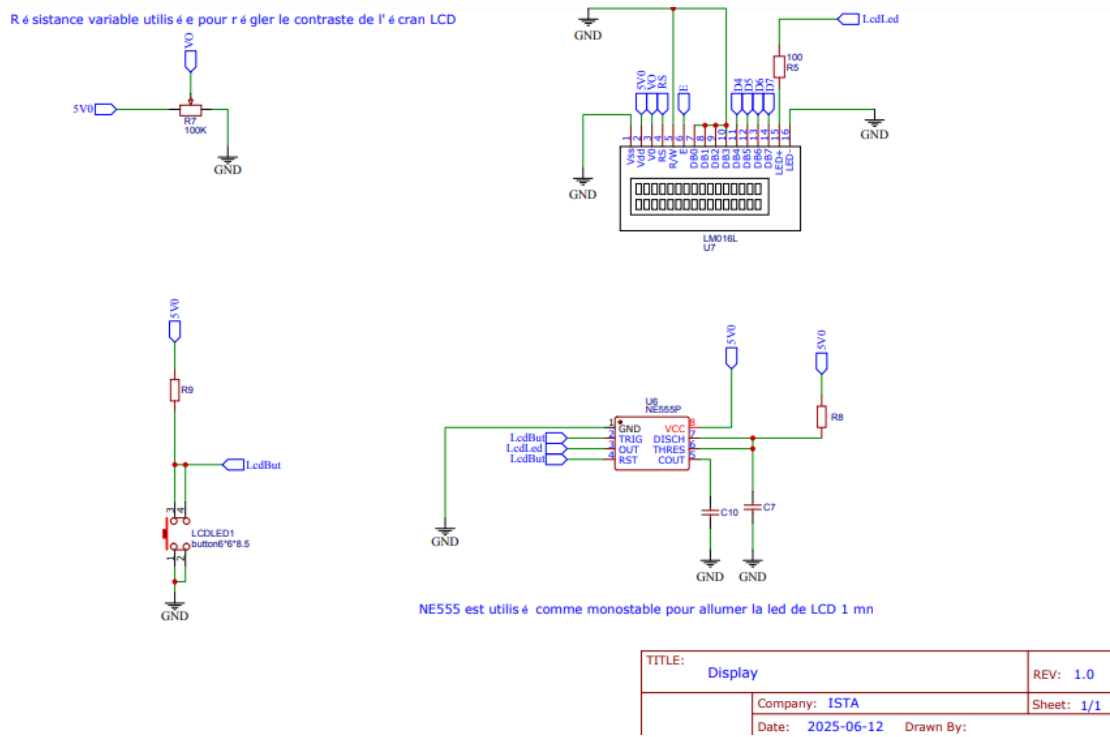


Figure A- 5. Schéma électrique du LCD et cicuit NE555

Annexe B

Vues 3D du prototype conçu

B.1 Vues 3D de la carte prototype développée

Les figures suivantes montrent deux vues 3D générées par EasyEDA de la carte électronique développée.



Figure B- 1. Vue 3D isométrique de la carte

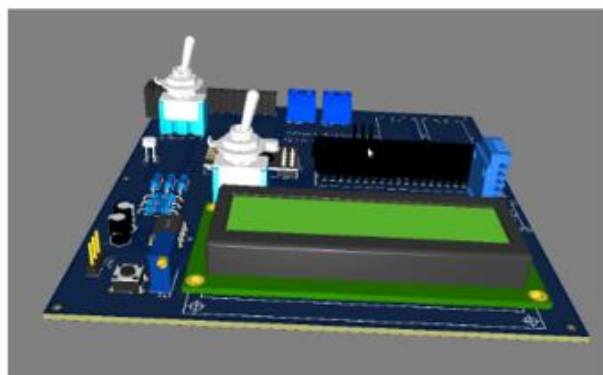


Figure B- 2. Vue 3D latérale de la carte

Annexe C

Circuit imprimé développé

Cette annexe montre les couches Top et Bottom du circuit imprimé généré à partir du schéma électrique.

C.1 Top layer du circuit imprimé

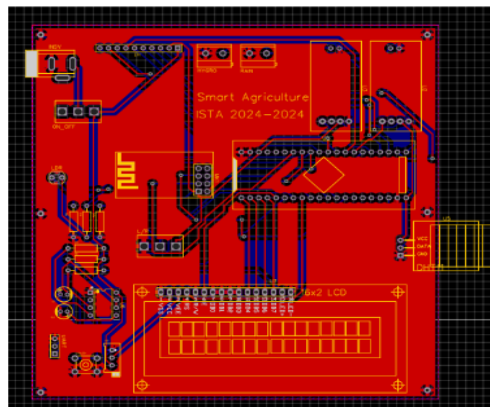


Figure C- 1. Circuit imprimé (top layer)

C.2 Bottom layer du circuit imprimé

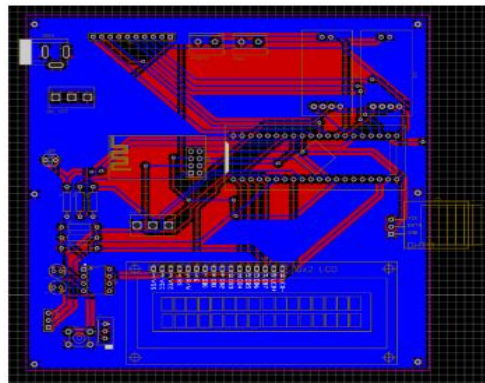


Figure C- 2. Circuit imprimé (bottom layer)

Bibliographie

Références introduction générale :

[1] FAO. (2019). Digital technologies in agriculture and rural areas – Briefing paper. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

<https://www.fao.org/3/ca4887en/ca4887en.pdf>

[2] IPCC. (2022). Climate Change 2022 : Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report.

<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

[3] Basso, B., & Antle, J. (2020). Digital agriculture to design sustainable agricultural systems. Nature Sustainability, 3(4), 254–256.

<https://doi.org/10.1038/s41893-020-0510-0>

Références chapitre I :

[1] <https://www.ibm.com/fr-fr/topics/smart-farming>

[2] <https://eos.com/fr/blog/technologies-agricoles/>

[3] From Industry 4.0 to Agriculture 4.0: Current Status, Enabling Technologies, and Research Challenges. Ye Liu, Xiaoyuan Ma, Lei Shu, Gerhard Petrus Hancke, and Adnan M. Abu-Mahfouz.

[4] AGRICULTURE 4.0 Start Robotique agricole et matériel automatisé au service d'une production agricole durable.

[5] Smart Agriculture: A Comprehensive Overview

[6] Des perspectives prometteuses pour développer l'agriculture de précision à l'aide de l'IA. Algérie Presse Service.

<https://www.aps.dz/economie/176448>

[7] Révolution Agricole en Algérie : Innovations et Croissance du Secteur à Boumerdes.

[8] L'agriculture de précision : Surveillance satellitaire et gestion durable des cultures pour optimiser les rendements

<https://farmonaut.com/precision-farming/lagriculture-de-precision-surveillance-satellitaire-et-gestion-durable-des-cultures-pour-optimiser-les-rendements/>

[9] <https://www.wiseguyreports.com/fr/reports/vertical-farming-vegetables-and-fruits-market>

[10] Internet of Things in agriculture, recent advances and future challenges. Antonis Tzounis, Nikolaos Katsoulas, Thomas Bartzanas, Constantinos Kittas. September 2017.

[11] <https://ieeexplore.ieee.org/document/9240971/>.

[12] <https://smarttek.solutions/blog/vertical-farming/>.

[13] https://www.perspectives-agricoles.com/sites/default/files/imported_files/322_5752035599427744351.pdf

[14] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589721724000266#:~:text=Multi spectral%20imagery%20can%20be%20used,yield%20estimation%20by%20plant%20countin g>

[15] https://www.researchgate.net/publication/374168920_Smart_Farming_Automation_and_Robotics_in_Agriculture

[16] Elsayed Said Mohameda et al., "Smart farming for improving agricultural management". The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.08.007>

[17] <http://photos.prnewswire.com/prnh/20160823/400529>

[18] <https://sollio.ag/fr/innovation/les-robots-desherbeurs-une-innovation-agricole-pleine-de-promesses>

[19] Nandal, V., & Dahiya, S. A comprehensive review of energy efficient wireless communication and routing protocols in smart agriculture. International Journal of Sensor Networks, 99–115. 2023

- [20] A. Razaque, M. Al-Rakhmi, and A. Al-Salman, "Zigbee Wireless Sensor Networks: Performance Study in an Indoor Environment," *Int. J. of Distributed Sensor Networks*, vol. 18, no. 5, pp. 1–12, 2022.
- [21] A. Tuncer and M. Yildirim, "Power Consumption Analysis of a Wi-Fi-based IoT Device," *Electricajournal*, 2019.
- [22] R. Kumar and S. Singh, "A Study of the Z-Wave Protocol: Implementing Your Own Smart Home Gateway," *ResearchGate*, 2018.
- [23] K. Mikhaylov, N. Plevritakis, and J. Tervonen, "Performance Evaluation of Bluetooth Low Energy: A Systematic Review," *Sensors*, vol. 13, no. 9, pp. 11759–11787, 2013.
- [24] V. Chawla and D. S. Ha, "An overview of passive RFID," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 9, pp. 11–17, 2007.
- [25] Rohde & Schwarz, "Near Field Communication (NFC) Technology and Measurements," *White Paper*, 2013.
- [26] P. Levchenko, D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "Performance Comparison of NB-Fi, Sigfox, and LoRaWAN," *Sensors*, vol. 22, no. 24, p. 9633, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22249633>
- [27] E. Borcoci, "Wide Area Wireless Networks – From 3G to 6G: Evolution, Integration and Challenges," in *Proc. of the 19th Int. Conf. on Systems (ICN 2024)*, 2024.
https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=icn_2024_1_10_10010
- [28] <https://www.mdpi.com/2624-831X/4/3/14>
- [29] <https://agriot.app/>
- [30] agricoles Kandel et al., *Crop yield prediction using machine learning: A systematic literature review*, 2020
- [31] *Deep learning and computer vision in plant disease detection*, 2024
- [32] *Smart farming using artificial intelligence, machine learning, deep learning*, 2024
- [33] *Decision support systems for agriculture 4.0: Survey and challenges*, 2024

Annexes

[34] Predictive Analytics for High-Tech Agriculture. Lakshmi Haritha Medida, Alex Khang, G.L.N.V.S. Kumar.

[35] Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. Big Data in Smart Farming, 2017

[36] Sharma, A., & Singh, R. Role of Big Data in Agriculture, 2024

[37] Akhter, S., Honda, K., Aida, K., & Ines, A. V. M. An Integrated Crop Model, Cloud and Big Data Analytic, 2024

[38] Han, D., & Rodriguez, M. Big Data Analytics, Data Science, ML&AI for Connected, Data-driven Precision Agriculture and Smart Farming Systems: Challenges and Future Directions. 2023

[39] <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308521X16303754>

[40] <https://www.monarchtractor.com/fr/blog/smart-farming-technologies>

[41] Zion Ramdinthara, Perumal Shanthi Bala."Issues and Challenges in Smart Farming for Sustainable Agriculture". Modern Techniques for Agricultural Disease Management and Crop Yield, 2020.

[42] Alakananda Mitra et al.Everything You wanted to Know about Smart Agriculture, January 2022.

[43] <https://iagre.org/agriculture>

Références chapitre II :

[1] <https://fr.sdec-france.com/station-meteo-autonome-comment-optimiser-sa-production-agricole/>

[2] <https://www.meteo-shopping.com/en/transmitter-and-repeater/138-station-de-mesure-agriculture-sans-sonde.html>

[3] <https://polleniz.fr/nos-missions/agrometeorologie-demeter/>

[4] <https://www.onsetcomp.com/hobonet-sensor-network-remote-monitoring-system>

- [5] <https://www.zoko-link.com/Product-knowledge/crop-meteorological-detection-system.html>
- [6] https://elearning-facsci.univ-annaba.dz/pluginfile.php/39190/mod_resource/content/1/chap%2001.pdf
- [7] <https://visuresolutions.com/fr/guide-de-tra%C3%A7abilit%C3%A9-de-la-gestion-des-exigences/exigences-fonctionnelles-vs-non-fonctionnelles/>
- [8] STM32 Blue Pill Development Board STM32F103C8T6 - Supreme Light Technology
- [9] Les fiches techniques officielles des composants ATmega328P (Microchip) et STM32F103C8T6 (STMicroelectronics), ainsi que de la documentation Arduino.
- [10] <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>
- [11] Cortex-M3 Technical Reference Manual
<https://developer.arm.com/documentation/ddi0337>
- [12] STMicroelectronics, Datasheet STM32F103C8T6
<https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f103c8.pdf>
- [13] ARM Cortex-M Series Overview (Résumé officiel)
<https://www.arm.com/architectures/cortex-m>
- [14] <https://www.blikai.com/blog/nrf24l01-module-pinout-features-principle>
- [15] <https://www.makerguides.com/wireless-communication-with-arduino-and-nrf24l01/>
- [16] <https://ar.aliexpress.com/item/1005007088046946.html?gatewayAdapt=glo2ara>
- [17] Nordic Semiconductor. nRF24L01+ Product Specification v1.0. Nordic Semiconductor ASA, 2008. <https://www.nordicsemi.com/products/nrf24l01>
- [18] Silicon Labs. AN0046: UART Communication Protocols. Silicon Labs, 2016.
<https://www.silabs.com>
- [19] NXP Semiconductors. SPI Block Guide. NXP, 2012. <https://www.nxp.com>
- [20] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ne555.pdf>

Annexes

- [21] exas Instruments. (2017). TPS61022: High-Efficiency, High Output Current Boost Converter.
- [22] Shenzhen NanJing Technology. (2018). TP4056 Lithium Battery Charger Module Datasheet. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1421079/TOPPOWER/TP4056/1>
- [23] Voltaic Systems. (2021). Solar Panels for IoT and Embedded Systems. <https://www.voltaicsystems.com/solar-panels/>
- [24] STMicroelectronics. (2021). STM32F103x8/B Reference Manual (RM0008), Section 19: Real-Time Clock (RTC). https://www.st.com/resource/en/reference_manual/CD00171190.pdf
- [25] STMicroelectronics, AN2867: Oscillator design guide for STM32 MCUs, 2017.
- [26] STMicroelectronics, AN2626: STM32F10xxx Low-power modes, Application Note, 2021. https://www.st.com/resource/en/application_note/CD00220364.pdf