الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

Département Génie Electrique

Mémoire

Présentée pour l'obtention du diplôme
de Master en Instrumentation

Etude et réalisation d'une station de mesure pour l'agriculture de précision

Présenté par

Melle. Rania Makhloufi

Melle. Rym Slimani

Encadrant par :

Dr. Samir CHADLI

Dr. Billel BENGHERBIA

Promotion 2023/2024

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à :

À MOI-MÊME, pour avoir cru en mes capacités.

À MES CHERS PARENTS, qui ont toujours été à mes côtés.

À MA SŒUR, MON FRÈRE et MES PETITS FRÈRES, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

À mon binôme, qui a partagé ce chemin avec moi.

À mes deux amis proches, pour leur soutien indéfectible.

Je vous remercie tous pour votre soutien constant, votre confiance en moi, et pour tout ce que vous avez fait pour moi tout au long de cette aventure.

RYM SLIMANI

Dédicace

Je dédie humblement ce travail à :

À MOI-MÊME, pour avoir cru en mes capacités.

À MES CHERS PARENTS, qui ont toujours été à mes côtés.

À MES FRÈRES, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours.

À MA PARTENAIRE, qui a partagé ce chemin avec moi.

À MES CHERS AMIS, qui ont été présents à chaque étape.

Je vous remercie tous pour votre soutien constant, votre confiance en moi, et pour tout ce que vous avez fait pour moi tout au long de cette aventure.

RANIA MAKHLOUFI

REMERCIEMENTS

Je voudrais remercier, mon encadreur ***Dr. Chadli Samir,*** *pour avoir accepté*
De m'encadrer, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils.

Je remercie également les membres du jury, M. et
M., pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail en acceptant de
L'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Je voudrais aussi remercier ma famille et mes amis, qui m'ont encouragé lors
De la préparation de ce mémoire.

ملخص

الزراعة الدقيقة تستخدم التكنولوجيا المتقدمة لتحسين إدارة الموارد وزيادة الإنتاجية الزراعية، مما يوفر حلولاً فعالة ومستدامة في مواجهة الطلب المتزايد على الإنتاج الغذائي. تهدف هذه الدراسة إلى تصميم محطة قياس قادرة على جمع وتحليل البيانات الهامة مثل درجة حرارة ونسبة الرطوبة إضافة الى رطوبة التربة في الوقت الفعلي. هدفنا هو تزويد المزارعين بأدوات موثوقة لإدارة ري محاصيلهم بكفاءة واقتصاد كمية الماء المستعملة. تستعرض الدراسة أساسيات الزراعة الدقيقة، وتصميم النظام التقني وتطبيقه العملي، موضحةً كيف يمكن للتكنولوجيا أن تحسن الزراعة التقليدية. يركز مشروعنا بشكل خاص على تطوير نظام فعال واقتصادي يمكن دمجه بسهولة في مختلف المزارع لتحسين كفاءتها التشغيلية.

الكلمات الدالة: الزراعة الدقيقة، تكنولوجيا متقدمة، انترنت الأشياء، محطة رصد، تقنيات حساسات.

Abstract

Precision agriculture uses advanced technology to improve resource management and increase agricultural productivity, providing efficient and sustainable solutions in response to the growing demand for food production. This study aims to design a measurement station capable of collecting and analyzing essential data such as temperature, humidity, and soil moisture in real-time. Our goal is to provide farmers with reliable tools to efficiently manage crop irrigation and economize the amount of water used. The study reviews the basics of precision agriculture, the design of the technical system, and its practical application, illustrating how technology can improve traditional farming. Our project focuses particularly on developing an efficient and economical system that can be easily integrated into various farms to enhance their operational efficiency.

Keywords: Precision agriculture, advanced technology, Internet of Things, monitoring station, sensor technologies.

Résumé

L'agriculture de précision utilise des technologies avancées pour améliorer la gestion des ressources et augmenter la productivité agricole, offrant des solutions efficaces et durables face à la demande croissante de production alimentaire. Cette étude vise à concevoir une station de mesure capable de collecter et d'analyser des données essentielles telles que la température, l'humidité et l'humidité du sol en temps réel. Notre objectif est de fournir aux agriculteurs des outils fiables pour gérer efficacement l'irrigation des cultures et économiser la quantité d'eau utilisée. L'étude passe en revue les bases de l'agriculture de précision, la conception du système technique et son application pratique, illustrant comment la technologie peut améliorer l'agriculture traditionnelle. Notre projet se concentre particulièrement sur le développement d'un système efficace et économique pouvant être facilement intégré dans diverses exploitations agricoles pour améliorer leur efficacité opérationnelle.

Mots clés : agriculture de précision, technologie avancée, internet des objets, station de surveillance, technologies de capteurs.

Table de matières

Liste des Figures 13-14

Introduction générale

CHAPITRE I Généralités sur l'agriculteur de précision

I.1Introduction 16

1.2 Définition et Principes de l'Agriculture de Précision 16-17

I.2.1 Définition de l'Agriculture de Précision 16

I.2.2 Principes de l'Agriculture de Précision 17

I.3 Historique et concepts de l'agriculture de précision 18

1.4 Technologies Et Méthodes De L'agriculture De Précision 22

I.4.1 Station Météo Dans L'agriculture De Précision 22

I.4.2 Surveillance de la santé des sols à l'aide des capteurs et sondes dans l'agriculture de précision 22

I.4.3 Le système de localisation GPS 23

I.4.3.1 GPS dans L'agriculture de précision 24

I.4.4 Les drones dans l'agriculture 24

I.4.5 Télédétection et agriculture de précision 25

I.4.6 L'utilité des S.I.G. en agriculture de précision 26

I.4.7 Logiciels 27

I.5 L'humidité du sol 28

I.5.1 Pourquoi surveiller l'humidité du sol 28

I.5.2 La texture des sols détermine sa capacité de rétention de l'eau 29

I.6 température du sol 29

I.7 Les avantage de l'agriculture de précision 31

I.8 Les limites de l'agriculture de précision dans le monde 32

1.9 Internet de l'objet 33
I.9.1 Architecture de l'internet d'objet 33
I.9.2 Les différents processus de l'internet des objets 34
I.9.3 Les éléments intervenant dans l'internet des objets 34
I.9.4 Importance de l'internet des objets dans l'agriculture 35
I.9.5 Pourquoi l'internet des objets dans l'agriculture 36
I.10 Conclusion 36

CHAPITRE II : Conception de la solution proposée

II**.1** Introduction 38
II **.2** Fonctionnement de système 38
II.2.1 Schéma synoptique 38
II .2.2 Description du system 39
II**.3** Le module Wifi ESP32 40
II**.4** ESP 8266 40
II.4.1 Contexte 41
II**.5** La différence entre ESP 32 et ESP 8266 42
II. **6.** Le capteur 43
II .6.1 Caractéristiques d'un capteur 44
II**.7** Capteur d'humidité de sol 44
II.7.1 Capteur capacitif d'humidité de sol 45
II.7.1.1 Description 45
II.7.1.1.2 Caractéristiques techniques 46
.7.1.1.3 Comment ça fonctionne 46
II .7.1.2 Capteur hygromètre humidité du sol 47
II .7.1.2.1 Description 47
II.7.1.2.2 Caractéristiques 47

II**.8** AHT10 capteur de température et d'humidité 48

II.8.1 Caractéristiques 48

II**.9** Module GSM SIM800L 49

II.9.1 Le module GSM/GPRS (SIM800L) 49

II**.10** Module de carte SD 50

II**.11** RTC (Real-Time Clock) 50

II.11.1 Caractéristiques 52

II**.12** Conclusion 53

Chapitre III : Réalisation et mise en marche

III**.1** Introduction 55

III**.2** Langage de programmation 55

III.2.1 Caractéristiques d'IDE Arduino 57

III.2.2 Fondamentaux de la programmation 57

III **.3** Protocole ESP-MESH 58

III**.4** Protocol de communication 59

III.4.1 HTTP (hyper text transport protocol) 61

III**. 5.** L'organigramme de système 61

III**.6.** Diagramme de connexion 63

III .7.Schéma électrique 65

III .8.Schéma implantation 67

III**.9.**Teste les capteurs de noud1, 2 ,3 68

III**. 10.** Conclusion 69

Conclusion générale 71

Bibliographie **73**

Table de figures :

Figure I.1. Schéma de principe du GPS différentiel temps réel

Figure I.2. Le rôle du S.I.G. en agriculture de précision

Figure I.3. Surveillance du stress hydrique plantes pour assurer leur hydratation optimale

Figure I.4. Tableau de l'eau disponible dans les sols selon la texture des sols

Figure I.5. Sol pauvre en eau et sol riche en eau

Figure I.6. Le rôle des différents processus d'IOT

Figure I.7. IoT dans l'agriculture

Figure II.1. Module wifi ESP 32

Figure II.2. Variations des modules ESP8266

Figure II.3. Différence entre ESP 8266 et ESP 32

Figure II.4. Fonctionnement du capteur

Figure II.5. Capteur capacitive v1.2

Figure II.6. Capteur hygromètre Humidité du sol

Figure II.7. AHT10

Figure II.8. Entrées AHT10

Figure II.9. sim800l

Figure II.10. SD card module figure2.11. RTC DS3231

Figure III.1. Logiciel arduino

Figure III.2. Configuration de l'IDE arduino

Figure III.3. La structure du paquet ESP-MESH correspond à sa trame de données Wi-Fi

Figure III.4. Protocol de communication

Figure III.5. L'Organigramme de système

Figure III.6. L'Organigramme de système

Figure III.7. Schéma électrique de noud 1,2,3

Figure III.8. Schéma électrique de noud 4

Figure III.9. Schéma d'implantation de noud 1,2,3

Figure III.10. PCB

Figure III.11. Schéma d'implantation de noud 4

Figure III.12.PCB

Figure III.13. Courbe de teste

Liste des abréviations :

L'ap : l'agriculture de précision.

IOT : Internet of Things.

GPS: Global Positioning System.

SIG: système d'information géographique.

DGPS: Differential Global Positioning System.

Xbee: brand of wireless communication modules that utilize the IEEE 802.15.4 protocol for low-power, low-data rate wireless communication.

Uc: Unité Centrale ou Microcontrôleur.

Introduction générale

Introduction :

L'agriculture, en tant que pilier essentiel de la survie humaine et du développement économique, est confrontée à des défis croissants à mesure que la population mondiale augmente et que les pressions environnementales s'intensifient. dans ce contexte, l'optimisation de la production agricole tout en minimisant l'impact sur l'environnement est devenue une priorité mondiale. l'intégration de technologies avancées dans les pratiques agricoles traditionnelles, connue sous le nom d'agriculture de précision, offre une solution prometteuse à ces défis.

Ce mémoire explore comment une station de mesure moderne peut transformer l'agriculture de précision en fournissant des données précises et en temps réel sur les conditions du terrain. nous nous concentrons sur la conception et la réalisation d'une station capable de collecter des informations cruciales telles que l'humidité et la température du sol, données essentielles pour une gestion agricole efficace.

L'agriculture de précision se distingue par l'utilisation de technologies modernes pour surveiller et gérer les cultures avec une grande précision. les outils tels que les systèmes GPS, les capteurs sophistiqués, et les logiciels d'analyse de données permettent aux agriculteurs d'optimiser l'utilisation des ressources, d'améliorer les rendements et de minimiser l'impact environnemental. historiquement, cette méthode a évolué grâce à l'adoption progressive de technologies de pointe, allant de la cartographie précise des champs aux systèmes automatisés de gestion des ressources.

Les stations météorologiques et les systèmes de surveillance des sols jouent un rôle crucial dans cette approche. elles fournissent des données vitales sur les conditions environnementales locales, permettant aux agriculteurs d'ajuster leurs pratiques en fonction des besoins spécifiques de leurs cultures. par exemple, la mesure précise de l'humidité et de la température du sol est essentielle pour gérer l'irrigation et la fertilisation de manière optimale, ce qui peut conduire à des économies significatives d'eau et de nutriments tout en améliorant la santé des cultures.

L'intégration de ces technologies pose cependant des défis, notamment en ce qui concerne les coûts initiaux d'implantation et la complexité de la gestion des données. cependant, l'avancée continue des technologies et la réduction des coûts rendent ces outils de plus en plus accessibles,

même dans les régions moins développées. l'internet des objets (iot), en particulier, joue un rôle clé en connectant divers dispositifs agricoles pour une gestion plus intégrée et réactive.

Notre travail se concentre sur la conception d'un système embarqué efficace pour une station de mesure en agriculture de précision. nous avons choisi d'utiliser des composants tels que les modules esp32 et sim800l pour leur fiabilité et leurs capacités de connectivité. ces composants permettent une collecte et une transmission de données en temps réel, assurant ainsi une surveillance continue des conditions agricoles.

Les capteurs jouent un rôle central dans ce système. les capteurs d'humidité du sol et de température tels que l'aht10 fournissent des données précises sur les conditions environnementales. en combinant ces capteurs avec d'autres modules comme les cartes sd pour le stockage des données et les rtc (real-time clock) pour la gestion temporelle, nous avons développé une solution complète pour surveiller et analyser les conditions agricoles.

La mise en œuvre de ce système implique également l'utilisation de protocoles de communication avancés comme le ESP-MESH, qui permet une communication efficace entre les différents composants du réseau. le développement logiciel utilisant un langage de programmation adapté permet l'intégration et la gestion fluide de tous ces éléments.

En conclusion, ce mémoire démontre comment l'utilisation intégrée de technologies de pointe peut transformer l'agriculture moderne. la station de mesure que nous avons conçue et mise en œuvre n'est pas seulement une avancée technologique, mais aussi une étape vers une gestion agricole plus intelligente, plus efficace et plus durable. en combinant la collecte de données précises et leur analyse, nous ouvrons la voie à des pratiques agricoles qui répondent aux besoins présents et futurs tout en respectant notre environnement.

Chapitre I :

Généralités sur l'agriculteur de précision

I. 1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous entreprendrons une analyse approfondie des concepts et des fondements de l'agriculture de précision. nous commencerons par clarifier la définition et les principes fondamentaux qui sous-tendent cette approche agricole moderne, suivis d'un examen de son évolution historique depuis ses origines jusqu'à nos jours. ensuite, nous discuterons des éléments clés qui constituent l'infrastructure de l'agriculture de précision, en mettant en évidence les technologies et les outils utilisés. nous mettrons en lumière les nombreux avantages offerts par l'agriculture de précision, notamment l'augmentation de la productivité et l'amélioration de la durabilité environnementale. enfin, nous aborderons les défis et les obstacles potentiels auxquels cette technologie pourrait faire face, ainsi que les solutions possibles pour surmonter ces difficultés. ce chapitre établit un cadre essentiel pour comprendre le rôle crucial de l'agriculture de précision dans l'amélioration des pratiques agricoles et la réalisation du développement durable.

I.2. Définition et Principes de l'Agriculture de Précision

I.2.1 Définition

L'agriculture assure l'essentiel des besoins alimentaires d'une population humaine en constante augmentation. par ailleurs, le nombre des exploitations agricoles diminue, et la surface travaillée par exploitant augmente.

la tendance est à l'augmentation de la productivité horaire de la main- d'œuvre. a ces besoins de productivité auxquelles répondent les technologies agricoles depuis plusieurs décennies s'ajoutent des préoccupations d'efficience qui concernent également l'environnement et la santé. on observe aussi une demande pour une alimentation de qualité. si cette qualité favorise le revenu des agriculteurs, elle pourrait contribuer à la soutenabilité de l'agriculture.

l'agriculture de précision (ap) est susceptible de contribuer à satisfaire ces différentes demandes vis-à-vis de l'agriculture. en effet, l'ap peut être vue comme une gestion spécifique des cultures qui permet d'adapter les actions agricoles à la situation locale sur le terrain afin que la bonne action soit effectuée au bon endroit et au bon moment. en particulier, si on considère les intrants agricoles, comme la fertilisation, l'eau, les pesticides, l'objectif de l'ap est d'en favoriser une utilisation parcimonieuse.

la robotique agricole peut également contribuer à l'objectif d'une agriculture durable en reconsidérant les choix de mécanisation. en effet, les besoins de productivité horaire ont conduit jusqu'ici à des équipements de grande taille et à des procédés qui favorisent le débit et la

régularité plutôt que la gestion de la variabilité. la perspective pour la robotique agricole est notamment de réduire la taille et le coût des équipements qui doivent acquérir une autonomie partielle dans leur fonctionnement pour pouvoir adresser cette variabilité. dans ce chapitre, nous allons expliquer les fondamentaux de l'agriculture de précision, puis nous situerons dans cette perspective la démarche de modélisation et de vérification à la base de nos travaux. [1]

I. 2.2 Principes de l'Agriculture de Précision

L'agriculture de précision (ap) a pour origine le développement récent de technologies dont la mise en œuvre modifie considérablement la connaissance et la gestion des systèmes de production agricole. ces technologies se caractérisent par :

-Le développement massif de systèmes automatiques de mesure, qu'ils soient fixes (station météorologique, capteurs sur la plante, etc.), embarqués sur machine, piéton, animaux ou machines (capteurs de rendement, capteurs de biomasse, capteurs de chlorophylle, etc.), ou aéroportés (drones, avions, satellites, etc.) ;

-La géolocalisation systématique de ces informations grâce à l'utilisation de systèmes de positionnement absolu (global positioning system) ;

-Le développement de systèmes permettant de stocker, de visualiser, de manipuler et d'échanger de gros volumes d'informations.

L'apport majeur de ces technologies est ainsi la connaissance de la variabilité spatiale et temporelle du système de production.

De nombreux auteurs ont proposé une définition formelle de l'AP (Searcy, 1994 ; Godwin et al. 2003 ; Taylor et Whelan, 2005). nous retiendrons Robert (2000), qui définit l'AP comme l'application d'une stratégie holistique de gestion agricole, qui utilise les technologies de l'information pour profiter de données de sources multiples, afin d'optimiser les décisions relevant de la gestion agronomique des cultures, du marketing, du financement, de la gestion du matériel et du personnel. En des termes similaires, McBratney et al. (2005) proposent de considérer l'AP, à l'échelle de l'exploitation, comme un type de conduite visant à augmenter le nombre de (bonnes) décisions par unité d'espace et de temps, ainsi que les bénéfices nets qui y sont associés.

En pratique, l'AP est ainsi un ensemble de méthodes basées sur l'information et visant à optimiser les performances d'une exploitation agricole sur plusieurs plans :

- Technique : maximiser les performances agronomiques de l'exploitation,

- Économique : optimiser le gain économique de l'exploitation,

- Environnemental : limiter les impacts des pratiques de l'exploitation.

Les pratiques agricoles de l'exploitation ont vocation à être optimisées selon chacun de ces plans en se basant sur la prise en compte des variabilités spatiale et temporelle que peut présenter l'outil de production. la détection de ces variabilités est assurée par les moyens issus des sciences de l'information (capteurs, au sens large du terme). cette définition de l'AP concerne toutes les productions agricoles qu'elles soient animales ou végétales.

Nous nous focaliserons sur l'application des concepts de l'AP à la production végétale que nous dénommerons « culture de précision ». Dans la suite de ce document, le terme AP sera donc utilisé exclusivement pour désigner la culture de précision.

En production végétale, la prise en compte des variabilités spatiales de l'outil de production s'est traduite par l'émergence du concept de gestion modulée des cultures (site-pecific management) (plant, 2001). cette dernière désigne la gestion d'une culture à une échelle spatiale plus fine que la parcelle, unité de gestion habituelle. remarquons qu'en ap, la gestion modulée n'est pas la seule approche permettant d'optimiser les performances d'une exploitation. l'aide au guidage des machines avec, par exemple la mise en œuvre de controlled traffic farming (Tullberg et al. 2007), constitue une autre approche possible. toutefois, l'ap est souvent associée à la gestion modulée car elle permet d'envisager des marges d'amélioration sans précédent dans l'histoire de l'agriculture mécanisée sur tous les plans précédemment évoqués :

- Techniquement : Adapter l'itinéraire cultural à une échelle intra-parcellaire peut permettre d'optimiser le rendement et/ou la qualité d'une culture sur la parcelle (Stoorvogel et Bouma, 2005),

- Économiquement : Une dose variable d'intrants peut permettre une économie sur ce poste d'achat (Bachmaier et Gandorfer, 2008),

- Environne mentalement : C'est un moyen de limiter certains risques, comme l'érosion des sols ou les phénomènes de lessivage (Bongiovanni et Lowenberg-Deboer, 2004 ; Stoorvogel et Bouma, 2005). [2]

I.3. Historique et concepts de l'agriculture de précision

L'AP est un sujet de recherche depuis de nombreuses années. plusieurs congrès internationaux sont organisés autour de cette notion. L'ECPA, "Européen Conférence on Précision Agriculture", a lieu tous les deux ans depuis 1997. La société savante ISPA ("International Society on Précision Agriculture") organise l'ICPA "International Conférence on Précision Agriculture" tous les deux ans depuis 1996. On trouve également l'"Asian Australasien conférence on précision agriculture" (depuis 2005, tous les deux ans), l'"international conférence on agricultural technologie and précision agriculture" (depuis 1997, chaque année), etc. il y a aussi des conférences dédiées à l'application des nouvelles technologies à l'agriculture, dont l'agriculture de précision, comme la conférence EFITA organisée par l'"Européen fédération for information technologie in agriculture, food and the environnent". le journal scientifique international de référence pour l'AP est le « Journal of Précision Agriculture », apparu en 1999.

Si l'AP intéresse de nombreux scientifiques de différentes communautés à l'international, il faut noter qu'il n'existe pas de définition unique de l'AP. Les définitions de l'AP peuvent être classées en 2 catégories : des définitions à orientation technologique qui mettent l'accent sur le progrès technique et les outils (développement des capteurs de rendement, des capteurs GPS Global Positionna System …) et des définitions à orientation agronomique agricole qui mettent l'accent sur la finalité de la démarche. on peut par exemple se référer à la thèse de Jérémy L'herbier intitulée "Valorisation de l'information géographique en agriculture de précision" qui présente plusieurs définitions et les compare. nous retiendrons deux définitions complémentaires :

1. La chambre des représentants des états-unis en 1997 a donné une première définition de l'AP : "un système qui vise à augmenter l'efficacité, la productivité et la rentabilité à long terme de la production agricole et de la production tout entière tout en minimisant les impacts non désirés sur la faune et l'environnement".

2. Le laboratoire d'agriculture de précision de l'université de Sydney définit la gestion des cultures spécifiques au site (SSCM, site spécifique cop management) : "Une forme d'AP où les décisions sur l'application des ressources et les pratiques agronomiques sont améliorées pour mieux correspondre aux exigences du sol et des cultures, car elles varient sur le terrain".

La première définition de l'AP est une définition générale qui englobe toutes les productions agricoles qu'elles soient animales ou végétales. Elle donne les finalités de l'agriculture de précision mais elle ne précise pas comment on atteint ces objectifs. la deuxième définition précise les moyens à employer, et notamment l'exploitation de la variabilité spatiale de la culture.

Le concept d'AP est en fait né aux USA au début des années 80 sous le nom de "spécifique farming". les travaux menés à cette époque concernent la fertilité des sols. des cartes avec des analyses tous les 100 mètres ont mis en évidence la nécessité d'une modulation des apports d'engrais suivant les zones. plus précisément, des études des taux de phosphore (P) et de potassium (K) ont montré une grande variabilité de la fertilité des parcelles. Certains affirment que la variabilité intra parcellaire est l'origine du développement de l'agriculture de précision. en Europe, l'AP est apparue pour la première fois en angleterre à la fin des années 80 pour les cultures herbacées (cultures de céréales, cultures maraîchères, cultures des espèces de la famille des légumineuses). un point d'histoire sur l'agriculture de précision est disponible dans. la pratique de l'agriculture de précision en France a débuté à la fin des années 90

Le début de l'AP a été confronté à plusieurs types de verrous : socio-économiques, technologiques et agronomiques. une description détaillée de ces verrous est disponible dans. a l'époque, les verrous socio-économiques identifiés concernaient principalement les coûts liés à l'AP, l'attitude de l'exploitant et sa résistance au changement due à son niveau de formation considéré comme souvent limité. les verrous technologiques étaient essentiellement liés à la conception des machines agricoles (problèmes d'entretien, machines mal adaptées aux petites parcelles, etc.), et aux capteurs (inexistants ou trop coûteux). les verrous agronomiques identifiés concernaient le manque de conseillers connaissant ces techniques et le manque de données détaillées, notamment sur les variations intra parcellaires de la qualité des sols.

C'est grâce au développement de nouveaux capteurs et à la réduction des coûts, notamment des coûts des informations GPS, que l'agriculture de précision s'est développée rapidement. Un récepteur GPS permet de se localiser pratiquement n'importe où en extérieur, dès lors que suffisamment de satellites sont visibles du récepteur, et n'importe quand. ce système a été utilisé au départ en agriculture pour mesurer la surface des terrains (arpentage) et pour la cartographie de rendements. en ce qui concerne les outils utilisant la technologie GPS, aujourd'hui largement

disponibles pour les agriculteurs en grandes cultures, des experts techniques comme Caroline Desbourdes les classent en 2 catégories : applications du GPS pour la précision en agriculture et applications du GPS pour l'agriculture de précision.

Dans le premier cas, le GPS est utilisé pour repérer avec précision la position d'un appareil agricole dans un champ afin d'effectuer des actions dont la localisation est certaine et précise. un premier exemple est le guidage ou l'autoguidage. l'autoguidage consiste à guider un appareil en suivant une trajectoire de référence sans intervention du chauffeur. ceci permet de diminuer, par exemple, la surface de recouvrement entre deux passages, afin d'optimiser le débit de chantier et le tassement des sols.

Dans la seconde catégorie d'applications, l'AP consiste à réaliser les bonnes actions au bon endroit, en fonction des caractéristiques du sol ou de la culture en place. c'est la modulation intra parcellaire, notion qui recouvre la gestion des cultures spécifiques au site vue plus haut. Toujours d'après Caroline Desbourdes, la modulation intra parcellaire comporte 3 étapes :

- Étape 1 : Caractériser la variabilité liée au milieu physique et au végétal.
- Étape 2 : Établir une carte de préconisation pour chaque point de la parcelle.
- Étape 3 : Réaliser la modulation dans le champ (modification de dose par exemple) de manière manuelle ou automatique.

Avec la maturité des technologies dans certains secteurs de l'agriculture et la disponibilité grandissante de données, les scientifiques académiques du domaine de l'AP ont mis en avant les questions méthodologiques, au-delà de l'évaluation du potentiel de nouvelles technologies pour répondre aux objectifs de l'AP. [3]

I.4. Technologies Et Méthodes De L'agriculture De Précision :

Il est nécessaire d'utiliser des équipements et des logiciels spéciaux de l'agriculture de précision pour collecter et analyser toutes les informations. prenant en considération que ces technologies utilisent le matériel et les logiciels spécifiques, on a besoin des spécialistes appropriées. dans ce cas-là, avec plus de travail, les agriculteurs peuvent se débrouiller eux-mêmes. les outils de l'agriculture de précision peuvent être divisés en terrestres, aériens et satellites. le premier couvre la planification de la production, la cartographie, le dépistage et le contrôle des véhicules. les deux derniers sont utilisés pour résoudre des problèmes plus globaux, par exemple, l'analyse en temps réel de l'état du rendement de n'importe quelle place. il est recommandé de mélanger les techniques de l'agriculture de précision pour obtenir des données objectives.

I.4.1 Station Météo Dans L'agriculture De Précision

Au sein d'une exploitation agricole, les stations météo connectées sont implantées dans les champs pour collecter en temps réel diverses informations météorologiques, comme la vitesse du vent, la quantité de pluie, le taux d'humidité et la température extérieure. ces stations transmettent ces informations à un ordinateur, permettant ainsi d'anticiper les risques météorologiques et les maladies telles que le mildiou ou la sectorise. finalement, grâce à une application météo agricole, les agriculteurs ont la possibilité d'accéder aux prévisions météorologiques et planifier de manière optimale les irrigations et les épandages, minimisant ainsi les pertes. dans l'ensemble, il est important d'utiliser des stations météo comme des outils d'agriculture de précision, car ils permettent de prendre des décisions éclairées en matière de gestion des cultures en se basant sur des données précises et en temps réel.

I.4.2 Surveillance De La Santé Des Sols À L'aide Des Capteurs Et Sondes Dans L'agriculture De Précision

Les dispositifs spécialisés dans la surveillance de la santé des sols sont développés pour repérer les dangers de contamination, les propagations de micro-organismes et les mutations de nuisibles. ils collectent des données cruciales telles que le niveau d'humidité, de salinité, de compaction, d'oxygène et de température du sol. ces outils de l'agriculture de précision permettent la collecte des informations nécessaires pour l'évaluation de la situation dans une zone donnée, et les envoient à des outils d'aide à la décision (OAD) qui sont disponibles sous

forme de logiciels et d'applications mobiles. dans l'agriculture de précision, ces données analysées et traitées par les OAD permettent de moduler les interventions sur des zones spécifiques. Elles fournissent également un diagnostic précis de l'état de santé des sols, facilitant ainsi l'évaluation de leur gestion et permettant l'adoption de pratiques de restauration ou de conservation. [4]

I.4.3Le système de localisation GPS :

Le système de localisation GPS (Global Positioning System) est un système géré par le département américain de la défense et constitué par un réseau de 24 satellites qui permet aux utilisateurs de récepteurs GPS de se localiser en tout point dégagé du globe. schématiquement, le principe de calcul des coordonnées repose sur la connaissance de la position des satellites et la détermination de la distance récepteur-satellites à partir de la mesure du temps de vol des signaux entre les satellites émetteurs et le récepteur. le récepteur calcule ses coordonnées par trilatération (recherche du point d'intersection de sphères centrées sur les satellites). seulement trois satellites « visibles » du récepteur permettent de calculer la longitude et la latitude ; l'altitude est obtenue avec un satellite supplémentaire.

L'utilisation du DGPS ne nécessite donc pas l'installation de plusieurs balises dans un périmètre proche du mobile et là réside son avantage essentiel par rapport aux autres systèmes de localisation connus (laser, HF...) ; s'affranchissant de toute infrastructure « propriétaire » terrestre, il tend à s'imposer aujourd'hui comme le système universel de localisation.

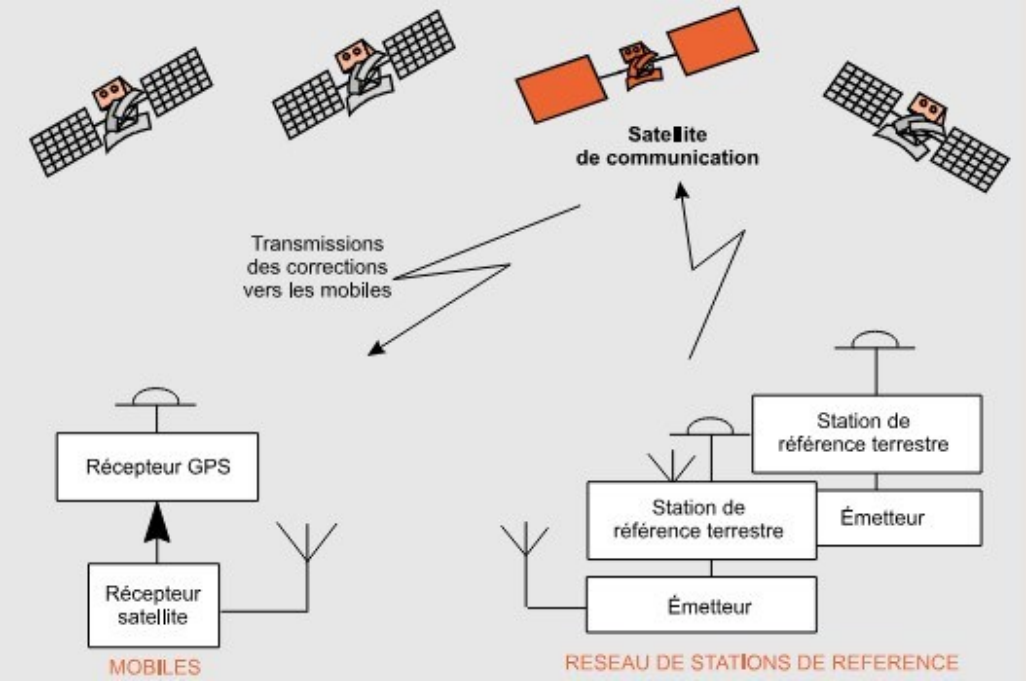


Figure I -1 : Schéma de principe du GPS différentiel temps réel

I.4.3.1 GPS Dans L'agriculture De Précision :

La réalisation des cartes (rendement, caractéristiques du sol, tâches d'adventices…) fait appel au système de localisation DGPS. l'usage de ce système dans l'agriculture de précision ne s'arrête pas à la cartographie des parcelles : il sera mis également en œuvre pour l'exécution automatique de cartes d'interventions préprogrammées, comme les cartes de fertilisation, en fournissant à chaque instant la position du matériel dans la parcelle.

La précision du système de localisation par GPS direct est normalement de 15 m, mais en réalité, du fait de la dégradation volontaire, appelée Selective Availability (SA), introduite dans les signaux des satellites par le département Américain de la défense, pour les usages civils, la précision réelle se situe entre 50 et 60 m. Cette limitation a conduit au développement du GPS différentiel (DGPS), basé sur l'utilisation de stations de références de position connue, fournissant aux récepteurs les corrections à réaliser, le DGPS permet ainsi d'obtenir une précision de positionnement en temps réel, qui, selon les configurations, se situe dans une fourchette de 1 à 5 m (Le Bars et al., 1996). [5]

I.4.4 Les drones dans l'agriculture :

Actuellement, les applications pratiques des drones s'étendent des amateurs aux industries et à d'autres domaines comme la photographie, etc. Il est prévu que le marché des drones atteigne 200 milliards de dollars d'ici 2020. Parmi les divers domaines prometteurs, l'agriculture est considérée comme l'un des domaines les plus importants où différentes variétés avec des installations riches en fonctionnalités sont nécessaires pour surmonter plusieurs défis auxquels les agriculteurs sont confrontés pour améliorer le rendement des cultures.

Voici les différentes applications et avantages de l'utilisation des drones dans l'agriculture pour les tâches agricoles quotidiennes :

1. **Analyse des exploitations agricoles** : les drones sont des instruments fiables et de haute qualité volant dans le ciel et peuvent être utilisés par les agriculteurs pour inspecter l'état de la ferme au début de toute année de culture. les drones génèrent des cartes 3D pour l'analyse du sol, ce qui est utile pour les agriculteurs lors du labour des semences. l'analyse des sols et des champs par drones fournit également des données utiles pour l'irrigation et la gestion du niveau d'azote des champs pour une meilleure croissance des cultures.

2. **Gain de temps** : les agriculteurs ayant des tonnes d'hectares de terre trouvent difficile d'atteindre chaque recoin du champ pour inspection de temps en temps. les drones accomplissent cette tâche sans problème, car les agriculteurs peuvent effectuer une surveillance aérienne régulière du champ pour connaître l'état de leurs cultures à intervalles réguliers.
3. **Rendement agricole plus élevé** : l'application précise des pesticides, de l'eau et des engrais surveillés avec précision par les drones augmentera en retour le rendement et la qualité globale peut être prise en compte.
4. **Intégration de la cartographie SIG** : la cartographie SIG a déjà prouvé sa valeur dans toute l'industrie agricole pour gérer les ressources, augmenter le rendement, gérer les coûts des intrants, améliorer la gestion des affaires, et plus encore. avec la cartographie SIG intégrée aux drones, les agriculteurs peuvent tracer les frontières des champs pour un schéma de vol précis.

Imagerie de l'état de santé des cultures : Avec les drones, l'imagerie de la santé des cultures peut être réalisée en utilisant des capteurs infrarouges, NVDI et multi spectraux, permettant aux agriculteurs de mieux suivre la santé des cultures, les taux de transpiration et les taux d'absorption de la lumière du soleil, etc. [6]

I.4.5Télédétection et agriculture de précision :

Des solutions opérationnelles parmi les moyens technologiques de mesure et d'information mis en œuvre à différentes échelles spatio-temporelles pour des applications agricoles, les satellites offrent des solutions opérationnelles. a titre d'exemple, cinq observations sur une campagne agricole donnent une bonne idée de l'historique de la plante : sa croissance, son état de santé, le moment de la récolte. les réponses faites à partir de l'interprétation des images satellitaires peuvent aider les agriculteurs à mieux gérer leurs parcelles. en afrique du sud, le SAC (Satellite Application Center), la station de réception locale propose depuis 1999 un service d'abonnement à ce type de données. et c'est un franc succès, notamment auprès des gros exploitants de canne à sucre de la côte est. dans l'exemple donné en figure 1, une image multi spectrale Xi (4 bandes) du satellite SPOT 5 a été utilisée pour analyser les variations de la biomasse de la canne à sucre (photosynthèse de la végétation). l'image de gauche est une composition colorée montrant la végétation active sous plusieurs tons de rouge. l'irrigation en pivot fait nettement apparaître des surfaces circulaires dont la plus grande mesure 120 ha.

L'image de droite est un indice de végétation créé à partir de la première image et classifiée pour mettre en évidence les variations de l'activité photosynthétique de la canne. [7]

I.4.6 L'utilité des S.I.G. en agriculture de précision :

Plusieurs caractéristiques des SIG justifient leur utilisation en agriculture de précision. le principal atout des SIG est leur rôle intégrateur de données (Ariaux, 2000). en effet, les SIG permettent de travailler avec de nombreuses données, quelque que soit leur origine (carte numérisée, imagerie satellitaire, données G.P.S. ou station spatial.), leur structure (vectorielle ou en mode raster) et leur type (quantitative ou qualitative). ils permettent donc de réunir les différentes formes des données à référence spatiale (figure 14) (Lherbier, 2005). une fois les données intégrées, les SIG offrent également de nombreuses fonctionnalités nécessaires à la gestion et à la mise à jour des bases de données constituées. enfin, il est possible, avec un minimum de manipulation, de mettre en forme les données et de les appréhender aisément sous leur forme cartographique. devant la diversité, et parfois la quantité, de données géo-référencées utilisées en agriculture de précision, c'est ce rôle intégrateur de données qui a amène les acteurs de l'agriculture de précision à s'intéresser aux SIG (Ariaux, 2000). cette caractéristique fait qu'ils sont mis à contribution dès la première étape d'identification et de caractérisation de la variabilité intra parcellaire. [8]

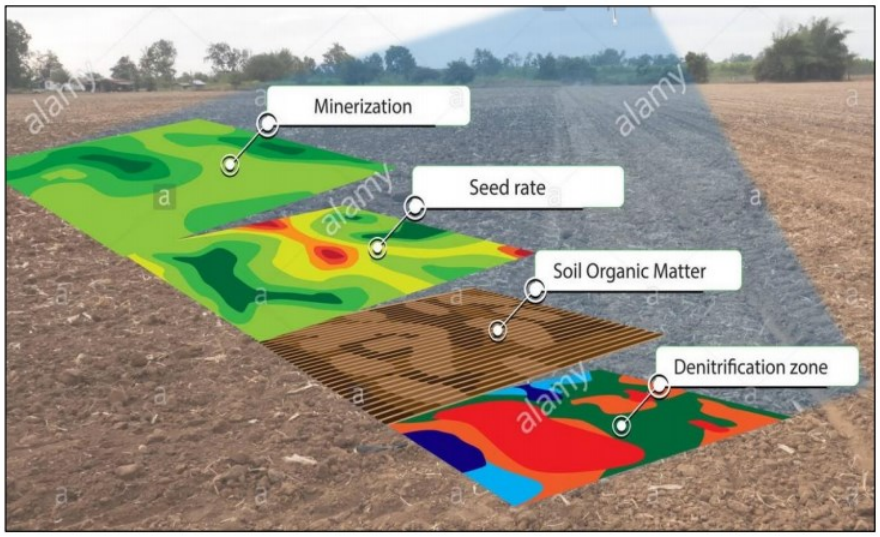


Figure I -2 : Le rôle du S.I.G. en agriculture de précision

I.4.7 Logiciels :

Les logiciels offerts pour le traitement de l 'information agronomique ont fait de grands progrès dans les cinq dernières années, particulièrement concert-nant la gestion des données de rendement, mais beaucoup reste à faire.

Compatibilité des formats des données entre logiciels :

L'échange de données d'un logiciel à l'autre est devenu possible au cours

Des dernières années. cependant, il peut s'accompagner d'une dégradation des

Données, particulièrement lors de la création de cartes

Facilité d'utilisation :

Si des progrès importants ont été accomplis dans l 'utilisation des logiciels

Offerts pour l'agriculture de précision, des améliorations sont toujours néces-Saires pour faciliter leur utilisation. L'addition continue de nouvelles fonctions

Plus élaborées les rend de plus en plus difficiles à utiliser sans procéder à des

Restructurations complètes

Performance des logiciels

Les logiciels offrent des performances très variables.

Certains n'accomplissent que des fonctions de base, comme la cartographie des rendements, Alors que d'autres peuvent créer des cartes d'épandage des engrais à partir d'un Choix de méthodes adaptées à différentes conditions. de plus, des systèmes experts sont en développement. il est important de noter que différents logiciels peuvent générer des résultats différents pour une même opération. cela peut être lié à l'utilisation de différentes méthodes, certaines pouvant être plus performantes, ou à des fonctions additionnelles, telle que le filtrage des données. en particulier, le choix des méthodes géostatistiques à une grande influence sur les résultats finaux. [9]

I.5. L'humidité du sol

C'est la quantité d'eau qu'il contient. elle dépend de la qualité du sol (structure et texture) et de sa capacité à retenir l'eau. un sol de qualité médiocre s'asséchera trop rapidement, comme par exemple un sol limoneux (on le qualifie de "sol sec") et/ou se gorgera d'eau en cas de pluie (qualifié de "sol humide").

Le taux d'humidité du sol détermine le développement des végétaux : la germination des semences, le développement du système racinaire, la croissance des tiges, la production des fleurs et des fruits... sur un sol sec ou humide, les cultures sont difficiles à conduire. en revanche, un sol drainé (ou sol frais) est capable de stocker l'eau nécessaire au développement de la végétation qu'il porte et d'évacuer celle en excès, par infiltration dans le sous-sol, pour alimenter la nappe phréatique. sa structure est ainsi préservée ainsi que son activité biologique, ce qui permet un enracinement profond des plantes. [10]

I.5.1 l'humidité du sol

l'humidité du sol permet de préserver la vie de la faune du sol, d'améliorer la germination et la croissance des végétaux. l'eau dans le sol est indispensable à la vie. le suivi de l'humidité du sol est donc déterminant en agronomie. surveiller l'humidité de sols améliore les décisions d'irrigation. apporter seulement l'eau nécessaire à la plante au bon moment procure une vigueur accrue des plants, des rendements optimaux des cultures, une meilleure qualité des récoltes, une résistance des plantes aux maladies, une plus grande valorisation de l'eau et une diminution du coût de l'irrigation. **Surveiller le stress hydrique des plantes :**

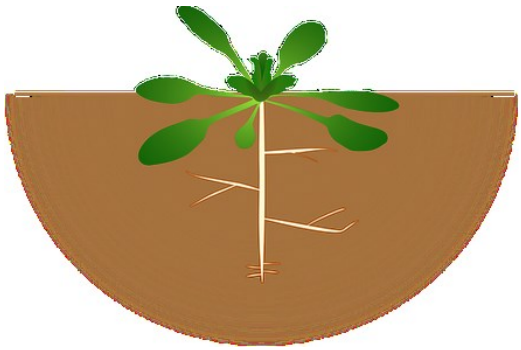


Figure I-3 : Surveillance du stress hydrique plantes pour assurer leur hydratation optimale

I.5.2 La texture des sols détermine sa capacité de rétention de l'eau :

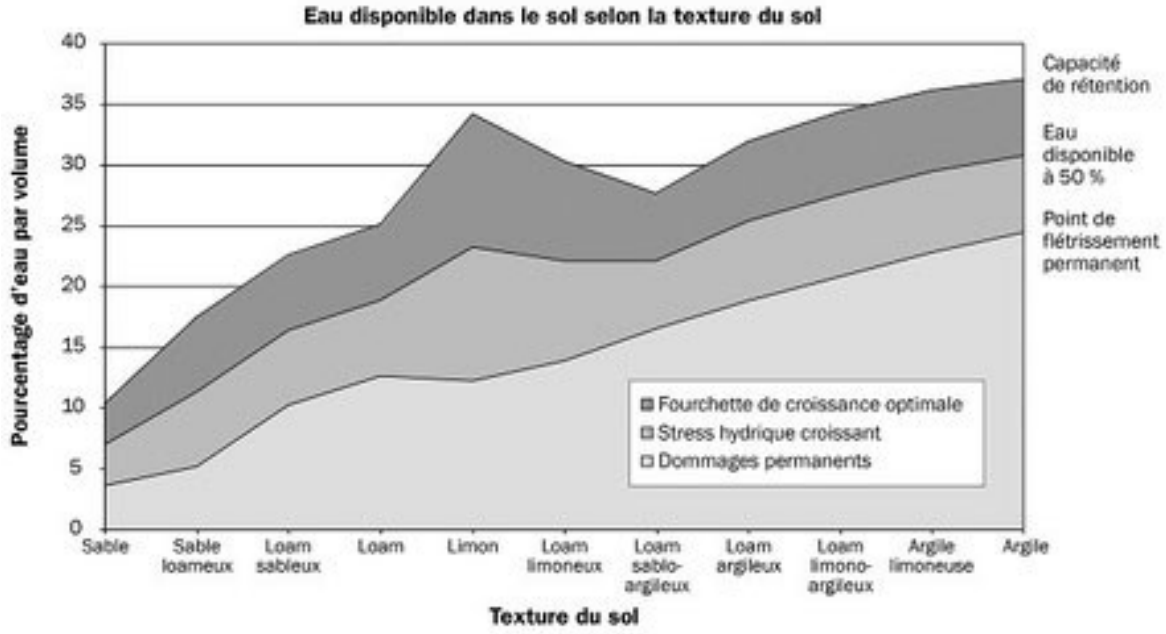


Figure I-4 : Pourcentage d'eau disponible dans les sols selon la texture

La capacité de rétention de l'eau par un sol varie selon sa texture et sa compaction. la quantité d'eau disponible pour les cultures est différente d'un sol à un autre. les sols limoneux peuvent absorber une quantité d'eau disponible plus grande mais ils ont aussi des vitesses de drainage élevées. le pilotage de l'irrigation ne sera pas identique dans un sol limoneux ou dans un sol argileux . [11]

I.6. Température du sol

La température du sol est la température qui règne à une certaine profondeur du sol, et qui varie en fonction de cette profondeur. c'est près de la surface que la température change le plus rapidement. dans les régions tempérées, la surface gèle normalement en hiver et dégèle au printemps. dans les régions plus froides, une couche de glace permanente – le permafrost – se trouve parfois sous la surface. de façon générale, plus on mesure la température en profondeur, plus les fluctuations sont faibles. comme la température du sol change plus lentement que la température de l'air à partir d'une certaine profondeur, le sol agit comme un isolant et protège ainsi les organismes du sol contre les fluctuations extrêmes de température.

La température influence les activités qui ont lieu dans le sol. en général, les micro-organismes du sol sont plus actifs lorsque les températures sont plus élevées : dans les sols tropicaux, les micro-organismes décomposent la matière organique beaucoup plus rapidement que dans les sols des régions à climat froid. l'activité des micro-organismes impacte à son tour d'autres processus se déroulant dans le sol et la structure du sol (cf. "comprendre le thème : structure du sol"). de nombreuses réactions chimiques qui ont lieu dans le sol se déroulent également plus rapidement quand la température est plus élevée.

La température du sol est aussi importante pour la flore. selon la température du sol, certains végétaux peuvent très bien pousser, ou pas du tout. les agriculteur-trice-s utilisent la température du sol pour fixer le moment optimal pour les semailles.

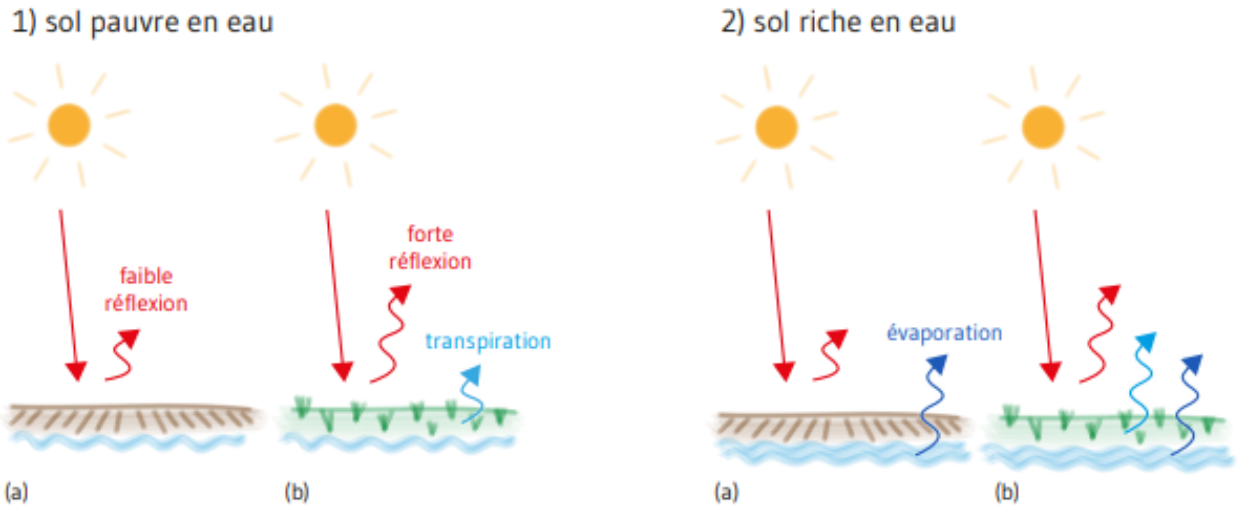


Figure I-5 : Effet de la température sur l'humidité

De même que la température de l'air, la température du sol est également influencée par son humidité et sa couverture. les sols sans couverture [situations (a)] se réchauffent fortement car peu d'énergie est réfléchie. les sols avec végétation [situations (b)] se réchauffent moins, car plus d'énergie est réfléchie et la transpiration de la végétation a un effet de refroidissement supplémentaire. s'il y a de l'eau dans le sol (situation 2), elle peut s'évaporer ce qui exerce aussi un effet refroidissant .[12]

I.7. Les avantages de l'agriculture de précision

L'intérêt croissant consacré à l'agriculture de précision vient à la suite de nombreux avantages, économiques et environnementaux, associés à cette technique. ces avantages comprennent les économies d'intrants agricoles, l'augmentation des rendements, les économies sur le coût de carburant et de main-d'œuvre, qui constituent un levier pour les exploitants pour augmenter leurs revenus. l'agriculture de précision contribue donc à :

- L'optimisation des efforts et ressources ;
- La réduction de la consommation et du gaspillage ;
- L'augmentation de la productivité des sols ;
- Assurer la suffisance et la qualité alimentaire de la population ;
- Assurer un avantage concurrentiel durable ;
- Une utilisation plus rationnelle des ressources, grâce à la réduction des déchets d'engrais et d'herbicides, des émissions et du compactage des sols, ce qui engendre des effets positifs sur l'environnement.

de plus et étant donné que plusieurs technologies sont incluses dans cette technique, existe d'autres avantages plus pertinents concernant chaque système technologique intégré ou utilisé dans l'agriculture de précision.

il est important de rappeler que la pratique de l'agriculture de précision devient de plus en plus nécessaire, en raison de l'augmentation des besoins alimentaires au niveau mondial, suite à l'accroissement exponentiel de la population auquel nous assistons ces dernières décennies : selon les prévisions, en 2050, il y aura environ neuf milliards de personnes à nourrir.

Il est donc primordial d'accroître la production alimentaire sans toutefois que cela entraîne une plus grande utilisation des ressources essentielles telles que l'eau et les engrais. Il est également fondamental d'atteindre ces résultats sans compromettre la qualité physique et chimique des sols : ce n'est qu'ainsi qu'il sera possible de mettre en œuvre un modèle de production alimentaire durable.

Le point le plus important consiste sur le fait que l'agriculture de précision constitue un moyen de répondre aux nouveaux enjeux de l'agriculture à savoir, le développement durable, en réduisant l'impact sur l'environnement tout en étant profitable économiquement (Bongiovanni & Lowenber-Deboer, 2004 ; Jullien & Huet, 2005). en effet et selon l'Organisation des Nations unies pour l'agriculture et l'alimentation (FAO, 1990), "Pour un développement durable, il faut

aménager et conserver les ressources naturelles et orienter les changements techniques et institutionnels de manière à satisfaire les besoins des générations actuelles et futures". En matière de développement durable, les propositions d'action les plus courantes se focalisent surtout sur (CGP, 1993) :

- La limitation des rejets de déchets dans le milieu naturel au niveau de la capacité de charge écologique et,

- L'exploitation des ressources renouvelables selon un régime qui assure la reproduction des ressources ;

L'agriculture occupe donc une place importante dans la problématique du développement durable, en raison de son effet sensible sur les ressources naturelles. De ce fait, l'agriculture de précision joue un rôle notable dans la mise en valeur des territoires et répond à l'un des besoins humains les plus fondamentaux, sans pour autant détruire les ressources. Elle est économiquement viable et améliore la qualité de vie des exploitants, ainsi que la société dans son ensemble. [13]

I.8. Limites de l'agriculture de précision dans le monde

Outre des avantages significatifs existe de nombreux enjeux de l'agriculture de précision. il faut citer les principaux :

Ce concept ne garantit pas une augmentation des revenus car l'agriculture reste dépendante de la météo. Par conséquent, il est nécessaire d'analyser attentivement la viabilité économique de l'agriculture de précision.

La plupart des technologies fournissent des données sur les sols et les plantes, mais n'offrent pas de solutions de gestion développées. Les producteurs doivent déterminer de manière indépendante le développement futur de l'entreprise en analysant les informations reçues.

Avec l'introduction de la technologie informatique dans l'agro-industrie, le cyber sécurité dans l'agriculture de précision devient plus réel : les attaquants peuvent voler des données et même des ressources. en outre, chaque utilisateur de ces systèmes doit protéger ces données.

Les équipements connectés sont majoritairement développés pour la gestion de fermes de taille moyenne à très grande, où les cultures sont souvent génétiquement homogènes, favorisant ainsi les invasions de parasites ou de pathogènes.

Les capteurs de l'agriculture de précision et les sondes sont principalement conçus pour être utilisés sur des machines lourdes qui peuvent rendre les sols plus vulnérables et altérer les parcelles, ce qui peut nuire à l'intégrité des écosystèmes.

Stratégiquement, les avantages de ce concept dépassent largement tous les inconvénients de l'agriculture de précision possibles. donc, ce système est efficace et prometteur .[14]

I.9. Internet de l'objet

L'internet des choses, abrégé généralement IoT à cause de sa formulation Anglaise (Internet of Things), est un néologisme utilisé pour la première fois en 1999 par Kevin Ashton,

Co-fondateur et directeur de l'Auto-ID Center qui Référence tous ces appareils (en dehors des ordinateurs et des smartphones) connectés à internet. qu'il s'agisse de voitures, de bracelets de fitness, de Réfrigérateurs, de systèmes électriques ou d'autres choses encore, tous sont connectés à internet et nous permettent d'échanger des données grâce aux capteurs.

en bref, l'internet des objets est l'évolution naturelle de l'utilisation des réseaux : elle a pour objectif de rendre le monde réel plus intelligent grâce à la connexion des objets, ces derniers obtiennent des informations qu'elles transmettent par réseau. n'importe quel objet autonome qui peut être connecté à internet et qui peut être utilisé à distance peut être considéré comme un membre de la famille de l'internet des objets. n'importe quel objet physique disposant d'une adresse IP2 et permettant de communiquer grâce à un réseau est donc l'un des objets de l'internet des objets.

I.9.1 Architecture de l'internet d'objet

Dès la fin des années 1990, le développement de l'internet Protocol Version 6 (IPV6) a permis d'envisager l'internet des objets (ou internet of things) l'enjeu était déjà de disposer d'une quantité d'adresses IP suffisante pour connecter des objets de consommations à internet

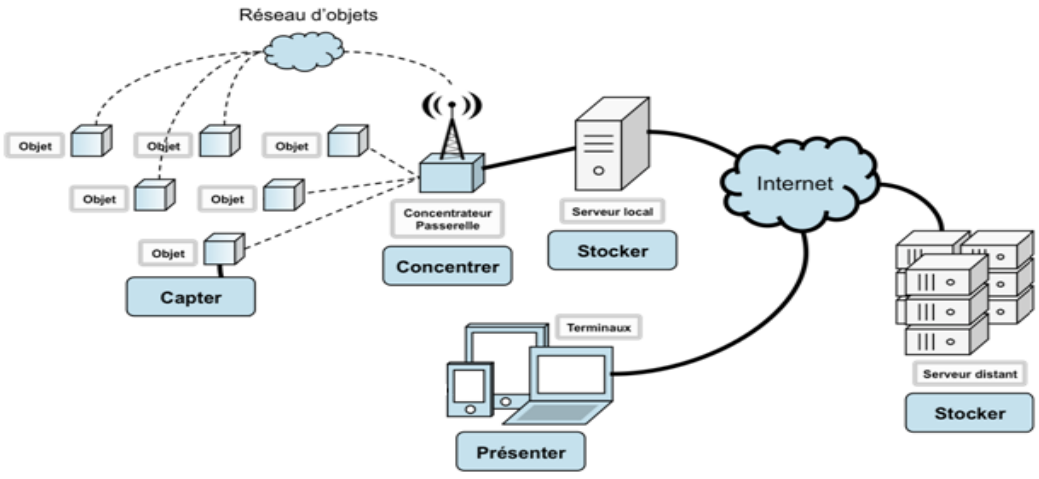


Figure I-6 : Le rôle des différents processus d'IOT

I.9.2 Les différents processus de l'internet des objets

- **Capter** : désigne l'action de transformer une grandeur physique analogique en un signal numérique.
- **Concentrer** : permet d'interfacer un réseau spécialisé d'objet à un réseau IP standard (e.g. Wifi) ou des dispositifs grand public.
- **Stocker** : qualifie le fait d'agréger des données brutes, produites en temps réel, méta taguées, arrivant de façon non prédictible.
- **Présenter** : indique la capacité de restituer les informations de façon compréhensible par l'homme, tout en lui offrant un moyen d'agir et/ou d'interagir.

I .9.3 Les éléments intervenant dans l'internet des objets

Le système complet d'un objet connecté intègre quatre éléments distincts :

9.3.1 Les capteurs

Tout d'abord, les capteurs récoltent les données de leur environnement. cela peut être une simple lecture de niveau de bruit comme une lecture complète[8] d'un flux photo ou vidéo. on utilise des capteurs, car ils peuvent souvent être regroupés et ça fait beaucoup plus que juste sentir son environnement. par exemple, votre téléphone est un appareil qui possède plusieurs capteurs : caméra, accéléromètre, GPS, etc…), mais votre téléphone n'est pas juste un capteur. dans tous les cas, qu'il s'agisse d'un capteur autonome ou un appareil, la première étape est toujours la même : quelque chose capte les informations de son environnement.

9.3.2 Connectivité

Ensuite, l'information est envoyée dans l'internet, mais elle a besoin d'un moyen d'y parvenir. les capteurs/appareils peuvent être connectés à l'internet au travers d'une variété de méthodes incluant : réseau cellulaire, satellites, WIFI, Bluetooth, les réseaux LPWAN (Low-Power Wide-Area Network) ou une connectivité directe à internet via internet.

Chaque option possède son lot de contrainte que ce soit en consommation d'énergie ou en bande passante. choisir la meilleure connectivité dépend des fonctionnalités et de l'application de l'objet connecté. au final, toutes les options offrent le même résultat : envoyer les informations dans l'internet.

9.3.3 Outils de traitement de l'information

Une fois l'information dans l'internet, des logiciels réalisent un traitement Sur ces dernières.

Le traitement peut être très simple, comme vérifier si la température Détectée est comprise dans une fourchette acceptable définie précédemment. il se peut que le traitement soit également très complexe, comme identifier un objet particulier au travers d'une vidéo lue par un ordinateur.

9.3.4 Interface utilisateur

L'information est tout d'abord rendue utile et lisible pour l'utilisateur final. elle peut prendre vie sous forme d'alerte à l'utilisateur (email, sms, notification,Etc…). un SMS est envoyé à l'utilisateur lorsqu'un intrus est détecté dans la Maison, par exemple.

Aussi, les utilisateurs disposent souvent d'une interface qui leur permet de vérifier de manière proactive dans le système. par exemple, notre utilisateur va pouvoir voir un flux vidéo de l'intérieur de sa maison sur une application mobile ou une page web.

En fonction du champ d'application de l'objet connecté, le flux d'information n'est pas toujours un envoi à sens unique. l'utilisateur peut aussi être en mesure de déclencher une action sur le système. par exemple, l'utilisateur peut ajuster la température de la chambre froide lorsqu'il décèle une vague de chaleur grâce aux capteurs, directement depuis son téléphone.

d'autres actions sont déclenchées automatiquement. ainsi, l'utilisateur peut sur certains systèmes créer des scripts qui se déclencheront grâce à des règles prédéfinies. ainsi, au lieu de vous alerter directement, le système de l'objet connecté pourra alerter directement les autorités compétentes.[15]

I.9.4 Importance de l'Internet des Objets dans l'agriculture :

L'Internet des objets (IdO) transforme l'industrie agricole et permet aux agriculteurs de faire face aux énormes défis auxquels ils sont confrontés. Alors, on parle d'agriculture intelligente (en anglais, smart agriculture ou smart farming). ainsi, de nouvelles applications IdO innovantes répondent aux problèmes de l'agriculture en augmentant la qualité, la quantité, la durabilité et la rentabilité de la production agricole. parmi les nombreux avantages que l'IdO apporte, sa capacité à innover dans le paysage des méthodes agricoles actuelles est absolument révolutionnaire. Les capteurs IdO capables de fournir aux agriculteurs des

Informations sur les rendements des cultures, les précipitations, les infestations de ravageurs et la nutrition des sols sont inestimables pour la production et offrent des données précises qui peuvent être utilisées pour améliorer les techniques agricoles au fil du temps.



Figure I-7 : IoT dans l'agriculture

I.9.5 Pourquoi l'Internet des Objets dans l'agriculture ?

Pour les agriculteurs et les producteurs, l'internet des objets a ouvert des moyens extrêmement productifs de cultiver le sol et de gérer du bétail grâce à l'utilisation de capteurs bon marché et faciles à installer et à une abondance de données pertinentes qu'ils offrent. fortes de cette accumulation prolifique de l'internet des objets dans l'agriculture, les applications d'agriculture intelligente gagnent du terrain avec la promesse d'offrir une visibilité 24h/24 et 7j/7 sur la santé des sols et des cultures, les machines utilisées, les conditions de stockage, le comportement des animaux et le niveau de consommation d'énergie. [16]

I.10. Conclusion

l'agriculture de précision représente une avancée significative vers une agriculture plus efficiente et durable. en exploitant les technologies modernes, les agriculteurs peuvent mieux comprendre et gérer la variabilité de leurs champs, maximisant ainsi les rendements tout en minimisant les impacts négatifs sur l'environnement. dans les chapitres suivants, nous explorerons la mise en œuvre pratique de ces technologies à travers la réalisation d'une station de l'agriculture de précision.

Chapitre II

Conception
de la solution proposée

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons détailler la conception du système embarqué utilisé pour réaliser une station de mesure agricole. ce projet vise à développer une solution innovante permettant de surveiller et d'optimiser les conditions agricoles en temps réel grâce à l'intégration de technologies avancées.

L'agriculture de précision repose sur la collecte et l'analyse de données précises pour améliorer la gestion des cultures, réduire les intrants et augmenter les rendements. pour atteindre ces objectifs, un système embarqué efficace et fiable est indispensable. ce chapitre se concentrera sur les différentes étapes de la conception de ce système, en mettant en lumière les choix technologiques, les composants matériels, ainsi que les méthodes d'intégration et de validation.

II .2. Fonctionnement de système

II .2.1 Schéma synoptique :

La figure suivante présente le schéma synoptique de la solution proposée :

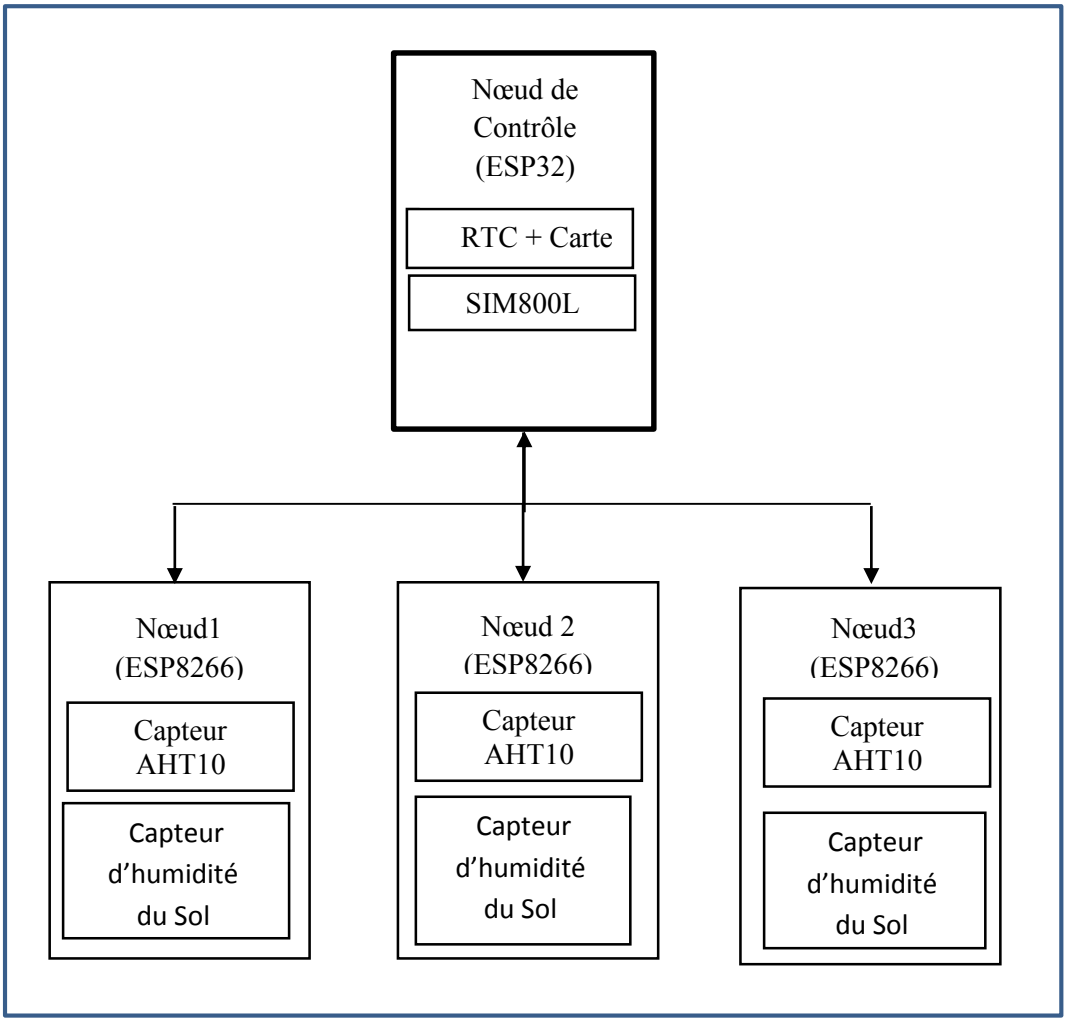


Figure II-1 : Schéma synoptique

Nœud de Capteur 1, 2 et 3 :

Composants : ESP8266, capteur capacitif d'humidité de sol V1.2, capteur AHT10 (température et humidité), panneau solaire, batterie.

Fonction : mesurer l'humidité du sol et les conditions atmosphériques, envoyer les données au nœud de contrôle via le réseau mesh.

Nœud de Contrôle :

Composants : ESP32, module SIM800L (pour communication GSM/GPRS), module de carte SD (pour stockage des données), RTC (Real-Time Clock), panneau solaire, batterie.

Fonction : Collecter les données des nœuds de capteurs, stocker les données sur la carte SD, envoyer les données à un serveur ou un appareil distant via GSM/GPRS.

Connexions et Flux de Données

- **Réseau Mesh:** Connecte les nœuds de capteurs au nœud de contrôle.
- **ESP8266 (Nœud de Capteur) :** Connecté au capteur capacitif d'humidité de sol et au capteur AHT10. Envoie périodiquement les données via le réseau mesh à l'ESP32.
- **ESP32 (Nœud de Contrôle) :** Reçoit les données des ESP8266, stocke les données sur la carte SD et les envoie via le module SIM800L.

Alimentation :

Panneau Solaire

- **Panneau Solaire :** Pour alimenter des modules plus gourmands comme l'ESP32.

Régulateur de Charge

- **Module de Chargeur TP4056 :** Pour charger les batteries Lio à partir du panneau solaire.

Batterie

- **Batterie :** Pour une plus grande capacité d'alimentation.

II .3. Le module de développement Wifi ESP32 :

Afin de développer davantage l'IdO et d'élargir le champ de ses applications, des solutions puissantes, peu coûteuses et peu gourmandes en énergie sont nécessaires pour les appareils IdO. une autre exigence pour un appareil IdO est d'avoir un petit facteur de forme ; plus-la taille et le poids de l'appareil sont petits, plus le domaine d'application n'est large. chaque unité basée sur l'IdO comprend un microcontrôleur (µC) et un module de commutation sans Fil (généralement Wifi), ou une combinaison des deux en un. une grande variété de modules et de µC sont déjà sur le marché et sont largement utilisés pour la conception et le développement de dispositifs IoT. il s'agit des cartes Xbee, WhizFi, certaines cartes Arduino, etc. cependant, la plupart des appareils actuellement offerts sont soit assez chers ,Soit volumineux en termes de poids et de taille. de plus, très peu de modules sont des Appareils open source et n'ont aucune restriction dans l'utilisation. un nouvel appareil Appelé ESP32 a été lancé sur le marché par Espressif System en septembre 2016 pour Remplacer l'ancien µC ESP8266. L'ESP32 est un puissant microcontrôleur avec Wi-Fi et Bluetooth intégrés, conçu pour être une solution parfaite pour les appareils iot. [17]



Figure II-2 : Module wifi ESP 32

II .4.ESP 8266 :

Les projets et initiatives des grands géants, tels que Planetary Skin de Cisco, le système nerveux central de la terre (CeNSE) de HP et la poussière intelligente, peupleront le monde de milliards de capteurs connectés à Internet. Pour accomplir cette tâche, nous devons résoudre les défis de base rencontrés par ces initiatives et projets IoT et WSN. L'ESP8266 est un module Wi-Fi à série System on Chip à faible coût et haute performance, faisant partie de la « Smart Connectivity Platform » d'espressif System, qui vise à fournir aux concepteurs de plates-formes

mobiles la possibilité d'innover des systèmes avec des capacités Wi-Fi intégrées au coût le plus bas avec la plus grande fonctionnalité .[17]

Le module a différentes variantes ; ESP8266-xx (01-13). chaque module est simplement un développement par rapport au précédent en termes de capacités matérielles, avec l'ESP8266-01 étant le moins cher et celui avec le moins de fonctionnalités, et l'ESP8266-13 étant le plus cher avec le maximum de fonctionnalités. Les différentes caractéristiques incluent le nombre de broches GPIO, la présence de blindage, l'antenne, le type de boîtier (à trou traversant ou montage en surface), la mémoire et la gestion des signaux analogiques externes. Nous parlerons plus en général avec des références principalement à l'ESP8266-01 et à l'ESP8266-12.

La carte la plus basique, l'ESP8266-01, comprend 2 broches GPIO, une communication UART, un CPU 32 bits basse consommation et une antenne PCB. d'autres modules disposent également de capacités d'entrée ADC, SPI, I2C et plus de broches GPIO.

Malgré les avantages du module, il existe encore peu de données publiées sur Internet car il est encore relativement nouveau. Le module a gagné en popularité vers la fin de l'année civile 2014

II .4.1 Contexte

En raison de son faible prix mais de ses nombreuses capacités matérielles, l'ESP8266 a attiré l'attention de nombreux développeurs, en particulier dans la communauté open source. Actuellement, il existe de nombreux fabricants qui produisent des modules ESP8266 prêts à l'emploi. Au fil du temps, chaque fabricant a conçu et lancé de nombreuses versions de modules, chacune offrant des fonctionnalités et des configurations supplémentaires différentes. certains modules disposent d'une mémoire flash plus grande, tandis que d'autres ont un plus grand nombre de broches d'E/S exposées. certains sont équipés d'une antenne externe, tandis que d'autres ne le sont pas. La figure 1 montre certains des modules ESP8266 disponibles sur le marché. [18]



Figure II-3 : Variations des modules ESP8266

II .5.La différence entre ESP 32 et ESP 8266 :

- ESP32 et ESP8266 sont des modules Wi-Fi bon marché parfaitement adaptés aux projets réalisés dans le domaine de l'internet des objets (IdO).
- Les deux puces ont un processeur 32 bits. L'ESP32 est un processeur double cœur 160MHz à 240MHz alors que l'ESP8266 est un processeur simple cœur qui fonctionne à 80MHz.
- L'ESP32 est le successeur de l'ESP8266. il ajoute un noyau CPU supplémentaire, un Wi-Fi plus rapide, plus de GPIOs, et supporte Bluetooth 4.2 et Bluetooth basse Énergie. de plus, l'ESP32 est livré avec des broches sensibles au toucher qui Peuvent être utilisées pour réveiller l'ESP32, un capteur à effet Hall intégré et un capteur de température intégré

Tableau2.3 : Différence entre ESP 8266 et ESP 32

Spécifications	ESP8266	ESP32
MCU	Xtensa Single-Core 32-bit L106	Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 600 DMIPS
802.11 b/g/n Wifi	Oui, HT20	Oui, HT40
Bluetooth	Non	Bluetooth 4.2 et en dessous
Typicalfrequency	80 MHz	160 MHz
SRAM	160 k Bytes	512 k Bytes
Flash	SPI flash jusqu'à 16MBytes	SPI flash jusqu'à 16MBytes
GPIO	17	36
Hardware / Software PWM	Aucun / 8 Channel	1 / 16 Channels
SPI /12C/12S /UART	2/1/2/2	4/2/2/2
ADC	10-bit	12-bit
CAN	aucun	1
Interface Ethernet MAC	aucun	1
Capteur tactile	aucun	Oui
Capteur de température	aucun	Oui
Température de fonctionnement	40°C - 125°C	40°C - 125°C

II .6.Le capteur :

Un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique observée en une grandeur utilisable exemple : une tension électrique...etc.

Le capteur se distingue de l'instrument de mesure par le fait qu'il ne s'agit que d'une simple interface entre un processus physique et une information manipulable.

Par opposition, l'instrument de mesure est un appareil autonome se suffisant à lui-même, disposant d'un affichage ou d'un système de stockage des données.

Le capteur, lui, en est dépourvu. les capteurs sont les éléments de base des systèmes d'acquisition de données.

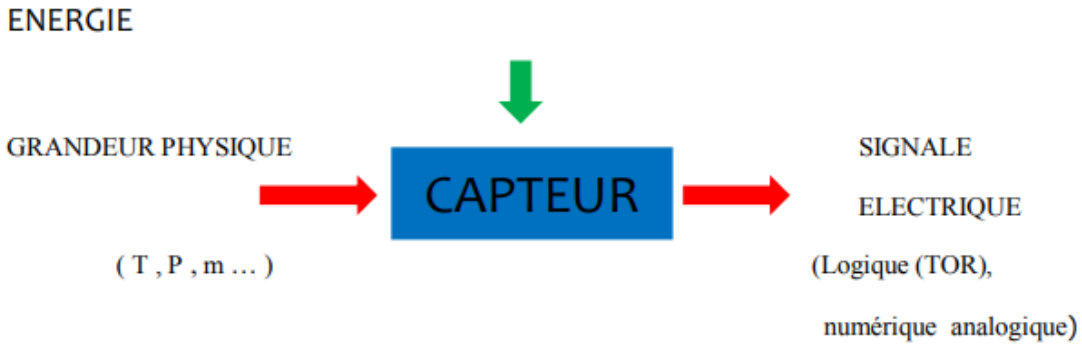


Figure II.4 : Fonctionnement du capteur

II .6.1 Caractéristiques d'un capteur :

Etendue de mesure : Valeurs extrêmes pouvant être mesurée par le capteur.

Résolution : Plus petite variation de grandeur mesurable par le capteur.

Sensibilité : Variation du signal de sortie par rapport à la variation du signal d'entrée.

Précision : Aptitude du capteur à donner une mesure proche de la valeur vraie.

Rapidité : Temps de réaction du capteur.

La rapidité est liée à la bande passante.

Linéarité : représente l'écart de sensibilité sur l'étendue de mesure

Parmi les capteurs utilisés dans le domaine d'électronique, on utilise . [19]

II .7.Capteur d'humidité de sol7.1 Les type des capteurs d'humidité de sol

Il existe plusieurs types de capteurs d'humidité de sol, notamment :

1. Capteur d'humidité de sol résistif : ce type de capteur mesure la résistance électrique dans le sol. lorsque le sol est sec, la résistance est élevée, et lorsque le sol est humide, la résistance est faible.

2. Capteur d'humidité de sol capacitif : ce type de capteur mesure la capacité électrique entre deux électrodes immergées dans le sol. la capacité varie en fonction de la quantité d'eau dans le sol. Plus le sol est humide, plus la capacité est élevée.

II.7.1Capteurcapacitifd'humiditédesolV1.2

Capteur capacitif d'humidité de sol v1.2 est un capteur analogique qui utilise la détection capacitif pour mesurer l'humidité du sol. il est composé de deux plaques conductrices et d'un diélectrique entre celles-ci. lorsque l'humidité du sol augmente, la tension de sortie diminue et vice versa. ce module est doté d'un régulateur de tension, permettant un fonctionnement entre 3,3 et 5,5v.
le module est résistant à la corrosion, avec des parties métalliques non exposées à l'eau, ce qui garantit une longue durée de vie .[20]



Figure II-5 : capteur capacitive v1.2

II .7.1.1.1Description :

Capteur capacitif d'humidité de sol V1.2 est un capteur analogique qui utilise la détection capacitif pour mesurer l'humidité du sol. sa tension de sortie diminue lorsque l'humidité du sol augmente, et augmente lorsque l'humidité diminue.

Le capteur se compose de deux plaques conductrices et d'un diélectrique entre elles, qui mesure la capacité électrique du sol, principalement influencée par l'eau.

Il est compatible avec des microcontrôleurs tels que l'Arduino ou le Raspberry, grâce à un régulateur de tension permettant un fonctionnement entre 3,3 et 5,5 V.

Ce capteur est très utile pour les jardiniers et les agriculteurs pour une bonne gestion de l'irrigation, et peut être utilisé dans le domaine de l'agriculture intelligente et le jardinage des plantes.

De plus, ce capteur est fait d'un matériau résistant à la corrosion et les parties métalliques sont protégées de l'eau, ce qui garantit une longue durée de vie

II. 7.1.1.2Caractéristiques techniques :

- Plage de mesure : 0-100% d'humidité du sol
- Tension de fonctionnement : 3,3 V à 5 V
- Courant de fonctionnement : moins de 20 mA
- Interface de sortie : Analogique
- Dimensions : 60 x 20 x 5 mm
- Résolution : 0,1% d'humidité du sol
- Précision : ± 5% d'humidité du sol
- Temps de réponse : < 5 secondes
- Longueur de la sonde : 60 mm
- Matériaux : acier inoxydable, PCB, résine époxy
- Poids : 10 g
- Plage de température de fonctionnement : -40°C à 80°C
- Protection : IP67 (résistant à l'eau et à la poussière)
- Compatibilité : Arduino, Raspberry Pi, microcontrôleurs et autres systèmes de contrôle.

II .7.1.1.3Comment ça fonctionne ?

Le capteur capacitif d'humidité de sol V1.2 fonctionne en mesurant la capacité électrique du sol. la sonde en acier inoxydable est insérée dans le sol, et les particules d'eau dans le sol permettent de conduire l'électricité à travers la sonde.

La capacité électrique du sol est alors mesurée par le capteur, et cela permet de déterminer l'humidité du sol.

II .7.1.2 Capteur hygromètre Humidité du sol :

Ce module de capteur d'humidité du sol permet de détecter des changements d'humidité. Avec réglage de seuil, et double sortie, numérique et sortie analogique.

II .7.1.2.1Description :

Ce capteur d'humidité permet de connaître la concentration d'eau dont le sol à partir des changements de conductivité électrique de la terre, il possède un potentiomètre qui permet le déclenchement d'une alarme pour l'activation d'un système d'arrosage par exemple **.**[21]

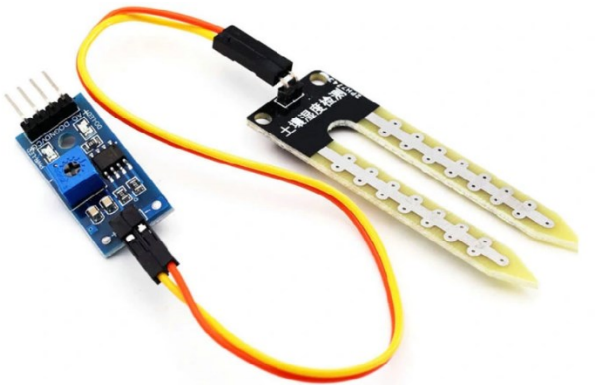


Figure II-6 : Capteur hygromètre Humidité du sol

II .7.1.2.2Caractéristiques :

- Plage de tension (V) 3.3 ~ 5
- Dimensions (cm) 5.0 x 2.6 x 1.7
- Couleur : Bleu [22]
- Le choix le capteur capacitif V1.2

  La majorité des capteurs d'humidité du sol bon marché sont de type résistif, où il y a deux broches et le capteur mesure la teneur en eau du sol en fonction de la conductivité entre elles. Ils fonctionnent bien au début, mais avec le temps, ils commencent à rouille.

II .8. AHT10 Capteur de Température et d'Humidité

L'AHT10 est un capteur numérique de température et d'humidité de précision, renommé pour Son exactitude et sa fiabilité exceptionnelles. Avec une plage de mesure de température de -40°C à 85°C et une précision de ±0.3°C, couplé à une plage de mesure d'humidité de 0% à 100% avec une précision de ±2%, le AHT10 excelle à fournir des données environnementales cruciales pour de nombreuses applications, y compris la surveillance météorologique, les systèmes CVC, l'automatisation domestique et les dispositifs IoT. Son design compact, sa faible consommation d'énergie et son interface I2C le rendent facilement intégrable dans divers projets, tandis que sa stabilité assure une constance à long terme dans les mesures, idéal pour une surveillance continue et un enregistrement des données. Que ce soit pour une station météorologique, un système domotique intelligent ou une automatisation industrielle, le capteur AHT10 est un composant précieux, fournissant des informations environnementales précises pour améliorer l'efficacité et les performances des projets. [23]

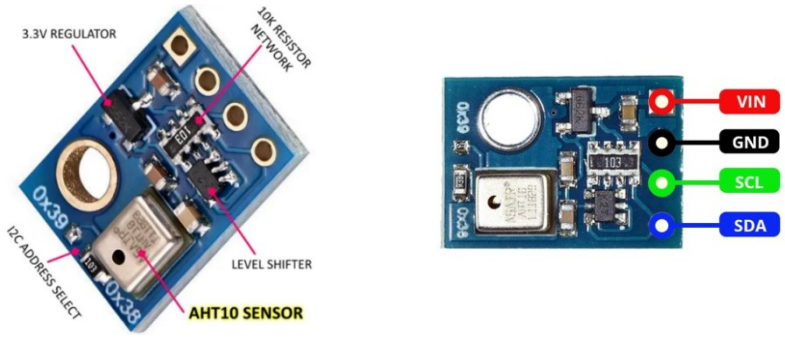


Figure II-7 :AHT10

II .8.1 Caractéristiques

Type d'interface : I2C (0x38)

Tension de fonctionnement : 3,3V – 5V

Plage de mesure : Température : -40°C à 85°C

Humidité : 0% à 100% ±2%HR

Précision de la température : ±0,3°C 4

Résolution de la température : 0,01 °C

Résolution de l'humidité : 0,024%

Précision de l'humidité : 2%

Entièrement calibré Excellente stabilité à long terme Réponse rapide et forte capacité anti-interférence [24].

II .9. Module GSM SIM800L :

Le module GSM SIM800L est l'un des plus petits modules GSM du monde avec une taille de 2.2 cm x 1.8 cm. c'est un module puissant qui démarre automatiquement et recherche automatiquement le réseau .ce module nécessite une alimentation entre 3,4V et 4,4V. L'alimentation 5V de l'Arduino ne lui convient donc pas. pour contrer ce problème d'alimentation, on ajoute une diode 1N4007 entre le 5V de l'Arduino et le pin VCC du SIM800L. Le SIM800L nécessite un pic de courant d'environ 2A.

La carte mini-GSM / GPRS est basée sur le module SIM 800L, Prend en charge le réseau quadri bande GSM / GPRS, Disponible pour la transmission à distance GPRS



Figure II-8 :sim800l

II .9.1 Le module GSM/GPRS (SIM800L) :

- Utilisé pour la communication de données entre le serveur et le client. Il s'agit d'un module GSM qui peut accéder au GPRS pour envoyer des données sur internet via un système Machine-to-Machine (M2M). Les commandes AT utilisées avec le SIM800L sont similaires à celles des autres modules GSM. grâce à ses petites dimensions, le module SIM800L est particulièrement adapté aux dispositifs portables.

Le SIM800L est un module Quadri-bande fonctionnant sur les fréquences 850/900/1800/1900 MHz. Ses dimensions compactes (15,8 x 17,8 x 2,4 mm) et son poids léger (1,35 g) le rendent idéal pour des applications nécessitant un faible encombrement. De plus, il a une faible consommation d'énergie avec une plage de tension d'alimentation de 3,4 à 4,4 V.[25]

II.10.Module de carte SD :

La carte SD fonctionne sous 3,3V, mais si vous souhaitez les utiliser avec microcontrôleur pour le stockage de données, vous devrez utiliser un module de carte SD. Le module de carte SD que nous avons utilisé est destiné aux cartes micro SD et utilise des FET pour le décalage de niveau, ainsi qu'un régulateur 3,3V qui convertit le 5V de microcontrôleur en 3,3V pour la carte micro SD. Le module de carte SD Arduino comporte un connecteur pour les cartes SD à l'arrière et j'ai testé des cartes mémoire jusqu'à 128 Go qui fonctionnent parfaitement.

Avec six broches, VCC et GND pour l'alimentation et les quatre autres broches pour la communication SPI. les quatre autres broches sont les suivantes : MISO (Master In Slave Out), MOSI (Master Out Slave In), SCK (Clock System), et CS (Chip Select). Ce module de carte SD utilise des FET pour le décalage de niveau et dispose également d'un régulateur de tension qui convertit le 5V en 3,3V. La communication entre l'Arduino et le module de carte SD s'effectue en utilisant le protocole SPI. [31]

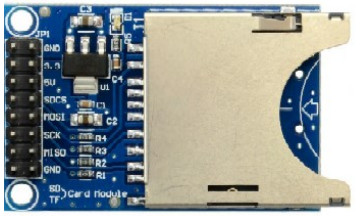


Figure II-9 : SD Card Module

II .11. RTC (Real-Time Clock)

Une horloge en temps réel (RTC) est une horloge alimentée par batterie qui mesure le temps même lorsqu'il n'y a pas d'alimentation externe ou lorsque le microcontrôleur est reprogrammé en utilisant Arduino. Une horloge en temps réel basée sur Arduino est une horloge numérique qui affiche l'heure réelle en utilisant un RTC DS3231 qui fonctionne avec le protocole I2C. Ce projet vise à afficher l'heure réelle en utilisant le microcontrôleur Arduino ainsi que le circuit intégré RTC DS3231, fournissant l'heure en heures, minutes et secondes, et affichant la date au format "JJ/MM/AA", ainsi que la température en degrés celsius. ce terme est utilisé pour éviter la confusion avec les horloges matérielles ordinaires qui ne sont que des signaux gouvernant

l'électronique numérique et ne comptent pas le temps en unités humaines. RTC ne doit pas être confondu avec l'informatique en temps réel, qui partage son acronyme à trois lettres mais ne se rapporte pas directement à l'heure de la journée. Dans ce circuit, nous avons utilisé un module LCD 16×2 pour afficher l'heure au format (heures, minutes, secondes, dates, mois et années). les horloges en temps réel sont couramment utilisées dans nos ordinateurs, maisons, bureaux et appareils électroniques pour les maintenir à jour avec l'heure réelle. Ce n'est pas seulement une horloge en temps réel, mais aussi un circuit de mesure de la température et de l'humidité. La température et l'humidité sont des préoccupations majeures en raison du réchauffement climatique. Dans ce circuit, le système de mesure des données météorologiques est conçu pour étudier les intensités de température et d'humidité. Les valeurs mesurées sont également affichées sur l'écran LCD.

Un Real Time Clock (RTC), ou horloge en temps réel, est essentiellement comme une montre ; il fonctionne sur batterie et garde l'heure pour vous même en cas de panne de courant. En utilisant un RTC, vous pouvez suivre des échéanciers longs, même si vous reprogrammez votre microcontrôleur ou que l'alimentation est coupée. Le RTC est un dispositif largement utilisé qui fournit une heure et une date précises pour de nombreuses applications. De nombreux systèmes comme les PC IBM sont équipés d'une puce RTC sur la carte mère. La puce RTC utilise une batterie interne qui maintient l'heure et la date même lorsque l'alimentation est coupée.

Le DS3231 est une horloge en temps réel (RTC) I2C extrêmement précise et économique avec un cristal intégré. Le dispositif intègre une entrée de batterie et assure une tenue de l'heure précise même en cas d'interruption de l'alimentation principale du dispositif. L'intégration du résonateur à cristal améliore la précision à long terme du dispositif tout en réduisant le nombre de pièces dans la ligne de production. Le RTC maintient les informations de secondes, minutes, heures, jour, date, mois et année. La date à la fin du mois est ajustée automatiquement pour les mois de moins de 31 jours, y compris les corrections pour les années bissextiles. L'horloge fonctionne soit au format 24 heures, soit au format 12 heures avec un indicateur AM/PM.



Figure II-10 :RTC DS3231

II .11.1 CARACTÉRISTIQUES :

• RTC hautement précis gère entièrement toutes les fonctions de chronométrage

• L'horloge en temps réel compte les secondes, minutes, heures, date du mois, mois, jour de la semaine et année, avec compensation des années bissextiles valide jusqu'en 2100.

• Précision +2 ppm de 0°C à +40°C.

• Précision ±3,5 ppm de -40°C à +85°C.

• Capteur de température numérique : précision de ±3°C.

• Registre pour ajustement de vieillissement.

• Sortie RST / Entrée de déblocage de réinitialisation par bouton-poussoir.

• Deux alarmes programmables.

• Signal de sortie de forme d'onde carrée programmable.

• Interface série simple se connecte à la plupart des microcontrôleurs rapidement (interface I2C à 400 kHz).

• Entrée de sauvegarde de batterie pour une tenue en continu du chronométrage.

• Fonctionnement à faible consommation prolonge l'autonomie de la sauvegarde de batterie.

• Fonctionnement à 3,3V.

• Plages de température de fonctionnement : Commercial (0°C à +70°C) et Industriel (-40°C à +85°C) .[32]

II .12.Conclusion

En résumé, le système embarqué détaillé dans le chapitre 2 présente une solution sophistiquée pour la surveillance environnementale en temps réel. En utilisant un réseau de nœuds équipés de différents capteurs et de capacités de communication sans fil, il permet la collecte et la transmission de données vitales concernant les conditions du sol et de l'air. Le hub central, Nœud 3, agit comme un point pivot pour l'agrégation, le stockage et la transmission des données, garantissant un fonctionnement fluide et l'intégrité des données. La polyvalence et la SCA labilité de ce système en font un outil inestimable dans plusieurs industries, y compris l'agriculture, la météorologie et la recherche environnementale. Sa capacité à fournir des informations précises et en temps opportun permet aux décideurs de prendre des décisions éclairées, contribuant ainsi à l'amélioration de l'efficacité et des pratiques de durabilité.

Chapitre III :

Réalisation et mise en marche

III .1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons explorer la réalisation et la mise en marche de notre système d'agriculture de précision. Ce système est conçu pour améliorer la gestion des ressources agricoles en surveillant en temps réel les conditions environnementales et en collectant des données cruciales sur le terrain.

Notre approche repose sur l'utilisation de plusieurs nœuds interconnectés, chacun doté de capteurs et de modules de communication spécifiques. Ces nœuds travaillent ensemble pour recueillir et transmettre des données telles que l'humidité du sol, la température et l'humidité de l'air. Les données sont ensuite centralisées et stockées, permettant une analyse approfondie qui informe les décisions de gestion agricole. Pour assurer une communication efficace et fiable entre les différents nœuds, nous avons implémenté un protocole qui permet aux nœuds de capteurs de former un réseau maillé robuste, facilitant ainsi le transfert des données vers le nœud de contrôle même dans des environnements où les connexions directes sont difficiles.

Le développement logiciel a été essentiel pour orchestrer le fonctionnement de tout le système. chaque nœud a été programmé pour collecter des données, gérer l'alimentation et communiquer efficacement avec les autres nœuds. Le nœud de contrôle central a été conçu pour stocker et transmettre ces données, assurant ainsi une analyse continue et en temps réel des conditions agricoles .en conclusion, ce chapitre détaillera comment nous avons assemblé le composant matériel et développé les logiciels pour créer un système intégré et opérationnel. Nous aborderons les défis techniques rencontrés et les solutions innovantes que nous avons mises en place pour garantir la fiabilité et l'efficacité de notre système d'agriculture de précision.

III .2.Langage de programmation :

Présentation du Logiciel L'IDE Arduino :
Le logiciel Arduino est un environnement de développement (IDE) open source et gratuit (Windows, Linux, ou Mac), téléchargeable sur le site officiel Arduino.
Les contributeurs de l'IDE Arduino ont intégré
Le compilateur ESP-IDF à leur IDE ainsi,
La plupart des cartes de développement ESP
Deviennent compatibles avec l'IDE Arduino pour
Programmer ce microcontrôleur en langage C++.

Cet environnement de développement dispose d'un grand nombre de bibliothèques et d'une communauté active, il couvre également la configuration de tous les registres et donc moins compliqué que ESP-IDF. Pour démarrer l'utilisation de l'IDE Arduino avec les cartes ESP32 nous sommes référés à la source fournie .[26]

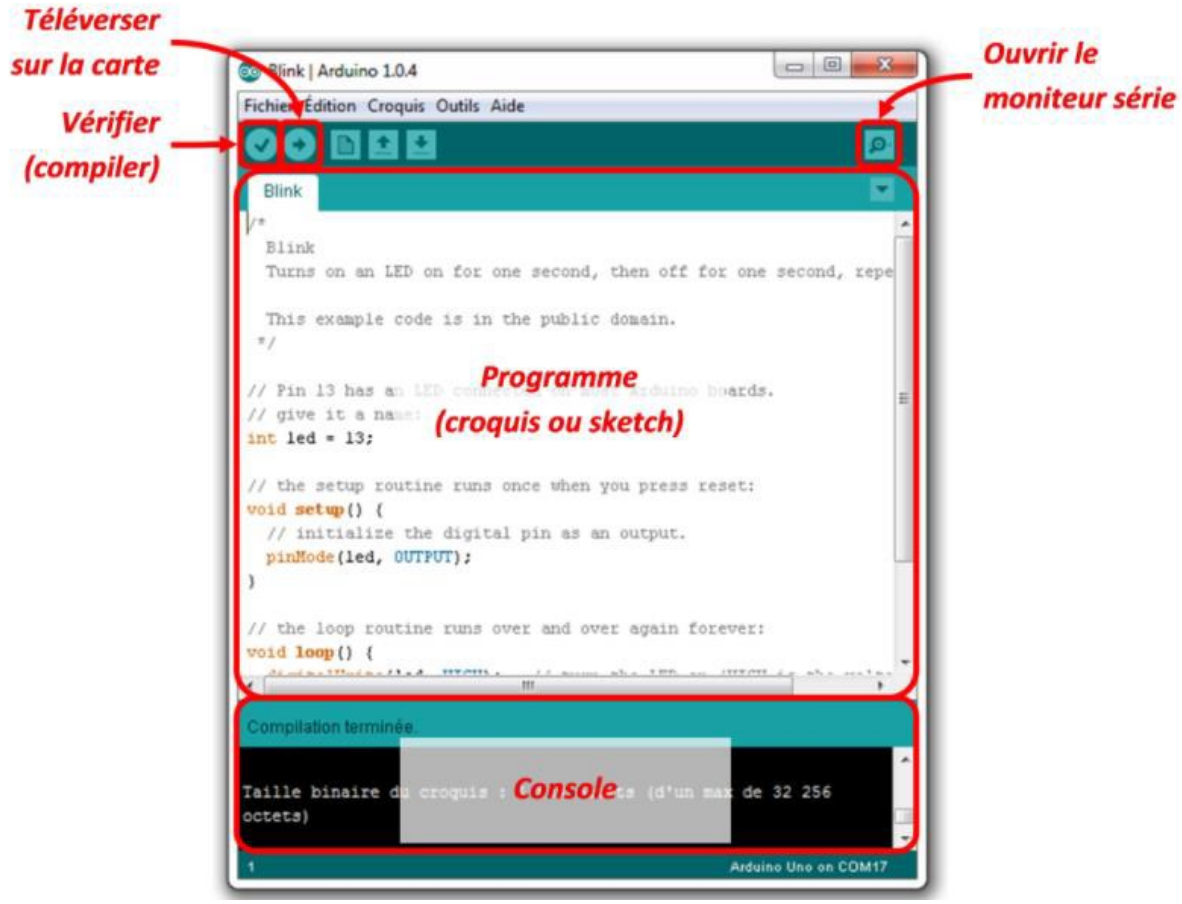


Figure III-1 : Logiciel Arduino

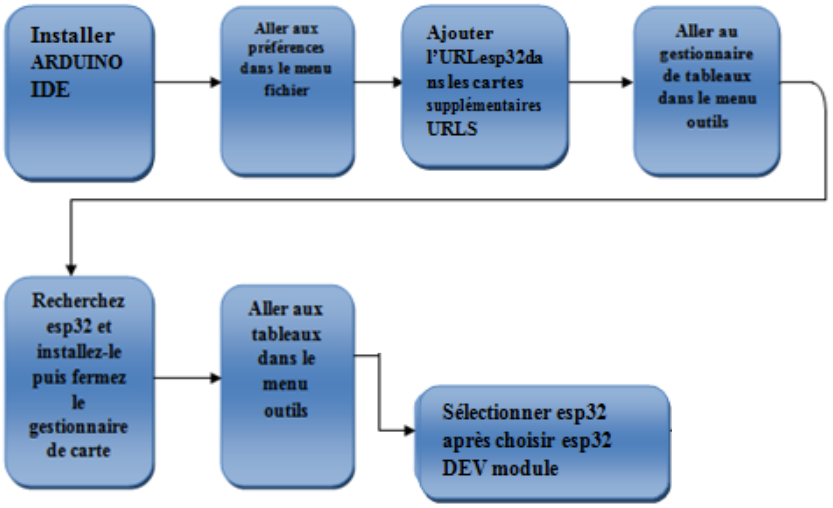


Figure III-2 : Configuration de l'IDE Arduino

III .2.1 Caractéristiques d'IDE Arduino :

- Le fichier de projet ou les sketches pour un projet sont enregistrés avec extension de fichier. ino.

- Des fonctionnalités telles que couper / copier / coller sont prises en charge dans cet IDE.

- Il existe également une fonction pour rechercher un mot particulier et le remplacer par un

Autre en appuyant sur les touches Ctrl + F du clavier.

- La partie la plus basique ou le squelette de tout code Arduino contiendra deux fonctions.

III .2.2 FONDAMENTAUX DE LA PROGRAMMATION :

Nous allons maintenant discuter des techniques de programmation des sketches Arduino dans

L'IDE Arduino. chaque sketch comportera toujours deux parties principales, à savoir :

- void setup ( )

- void loop ( )

Void setup ( ) :

Il s'agit de la première routine qui commence lorsque lArduino commence à fonctionner.

Cette fonction est exécutée une seule fois pendant toute la durée du programme. la fonction setup contient l'initialisation de chaque broche que nous prévoyons d'utiliser dans notre projet pour l'entrée ou la sortie. voici un exemple de la manière dont elle doit être écrite :

Ici, la broche est le numéro de la broche à définir. INPUT / OUTPUT correspondent au mode

Dans lequel la broche doit être utilisée.

Elle contient également l'initialisation du Moniteur Série. Un moniteur série est utilisé pour

Connaître les données qui sont envoyées en série à tout périphérique.

Void loop ( ) :

cette fonction est la suivante dans l'ordre d'importance dans le sketch. elle comprend la partie du code qui doit être exécutée de manière continue contrairement à la partie du code

Écrite dans la fonction setup.

Un exemple d'une fonction void loop est le suivant :

Ici, digitalWrite est une fonction qui écrit une valeur haute (HIGH) ou basse (LOW) sur une Broche numérique. Si la broche a été configurée en tant que sortie avec pin Mode (), sa tension Sera réglée sur la valeur correspondante : 5V (ou 3,3V sur les cartes 3,3V) pour HIGH, 0V (Masse) pour LOW.

De même, s'il y a besoin de retard dans le sketch, il existe une autre fonction qui crée un Retard dans l'exécution du code.

Cela crée un retard dans l'exécution du programme pour la période de temps spécifiée (en Millisecondes). En utilisant les deux fonctions ci-dessus, créons un sketch pour faire clignoter Une LED. [27]

III .3. Protocole ESP-MESH :

Basé sur un protocole Wi-Fi, un nouveau protocole réseau, « ESP-MESH », a été proposé par Espressif Systems (Shanghai, Chine) CO. En utilisant le protocole ESP-MESH, un grand nombre d'appareils compatibles Wi-Fi (par exemple, ESP-32, ESP-8266, etc.) pourraient être interconnectés sous un seul réseau local sans fil (WLAN) sur un large réseau physique.

Zone. La principale caractéristique de ce protocole est sa propriété d'auto-guérison et d'auto-organisation (le réseau pourrait être construit et entretenu de manière indépendante). L'ESP-MESH surmonte les limites des réseaux Wi-Fi à infrastructure obsolète de telle sorte que dans ESP-MESH, les nœuds sont libres de se connecter à leurs nœuds proches. Chaque nœud est généralement responsable de la communication avec les transmissions de chacun. Il en résulte que le réseau ESP-MESH couvre une zone d'exposition considérablement meilleure sans nécessiter qu'il soit à portée du nœud central. En outre, ESP-MESH semble être moins sujet à la congestion car il n'est pas nécessaire qu'un nœud connecte le nœud central unique. Le réseau ESP-MESH est un réseau multi-sauts, ce qui signifie que chaque nœud peut transmettre des paquets à un autre via un ou plusieurs sauts sans fil du réseau. Ainsi, chaque nœud du réseau sert de relais en plus de transmettre ses paquets. Un réseau de nœuds ESP-MESH peut être composé de trois types : le nœud récepteur, le nœud intermédiaire et le nœud final. Le nœud

récepteur s'interface directement avec un routeur Wi-Fi conventionnel et relaie les paquets entre les nœuds du réseau et le réseau IP externe. Un seul nœud récepteur est présent dans un réseau ESP-MESH. Un nœud intermédiaire communique, obtient des paquets de données et transmet les paquets de données dirigés depuis ses connexions en amont et en aval. Un nœud final pourrait uniquement transmettre ou recevoir ses paquets. Cependant, il ne peut pas transmettre les paquets de données d'autres nœuds. La sélection du nœud récepteur/racine, la formation de couches et la limitation de la profondeur de l'arborescence sont les trois étapes du processus de création de réseau ESP-MESH. L'ESP-MESH est un réseau d'autoréparation car il perçoit et corrige les déceptions dans le routage réseau. Représente l'agencement d'un paquet ESP-MESH et sa liaison avec une trame de données Wi-Fi. L'en-tête contient les adresses MAC (Media Access Control) pour les nœuds émetteur et récepteur. Les données réelles sont disponibles dans la charge utile du paquet MESH. La charge utile d'un paquet ESP-MESH comprend les données d'application définies et peut contenir soit des données codées (MQTT, JSON et HTTP), soit des données binaires brutes .[33]

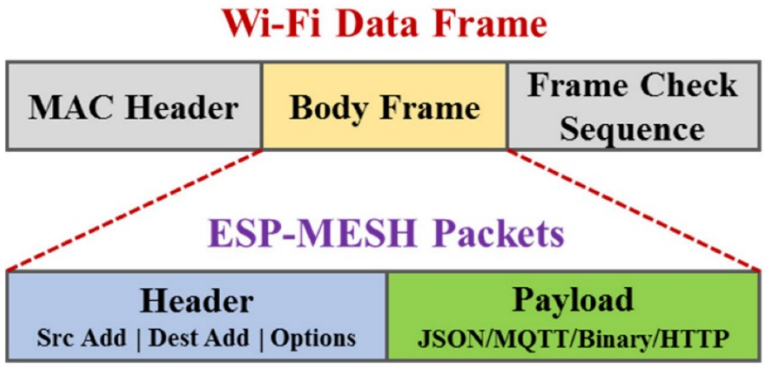


Figure III-3 : La structure du paquet ESP-MESH correspond à sa trame de données Wi-Fi

III .4. Protocol de communication

Cette section présente une analyse comparative des quatre protocoles de messagerie largement acceptés et émergents pour l'IoT systèmes MQTT, CoAP, AMQP et HTTP basés sur plusieurs critères pour présenter leurs caractéristiques de manière comparative. C'une étude comparative complète est présentée dans le tableau

TABLEAU III-4 : Analyse comparative des protocoles de messagerie pour les systèmes IoT : MQTT, CoAP, AMQP et http

Criteria	MQTT	CoAP	AMQP	HTTP
1. Year	1999	2010	2003	1997

2. Architecture	Client/Broker	Client/Server or Client/Broker	Client/Broker or Client/Server	Client/Server
3. Abstraction	Publish/Subscribe	Request/Response or Publish/Subscribe	Publish/Subscribe or Request/Response	Request/Response
4. Header Size	2 Byte	4 Byte	8 Byte	Undefined
5. Message Size	Small and Undefined (up to 256 MB maximum size	Small and Undefined (normally small to fit in single IP datagram)	Negotiable and Undefined	Large and Undefined (depends on the web server or the programming technology)
6. Semantics/ Methods	Connect, Disconnect, Publish, Subscribe, Unsubscribe, Close	Get, Post, Put, Delete	Consume, Deliver, Publish, Get, Select, Ack, Delete, Nack, Recover, Reject, Open, Close	Get, Post, Head, Put, Patch, Options, Connect, Delete
7. Cache and Proxy Support	Partial	Yes	Yes	Yes
8. Quality of Service (QoS)/ Reliability	QoS 0 - At most once (Fire-and-Forget), QoS 1 - At least once, QoS 2 - Exactly once	Confirmable Message (similar to At most once) or Non-confirmable Message (similar to At least once)	Settle Format (similar to At most once) or Unsettle Format (similar to At least once)	Limited (via Transport Protocol - TCP)
9. Standards	OASIS, Eclipse Foundations	IETF, Eclipse Foundation	OASIS, ISO/IEC	IETF and W3C
10. Transport Protocol	TCP (MQTT-SN can use UDP	UDP, SCTP	TCP, SCTP	TCP
11. Security	TLS/SSL	DTLS, IPSec	TLS/SSL, IPSec, SASL	TLS/SSL
12. Default Port	1883/ 8883 (TLS/SSL)	5683 (UDP Port)/ 5684 (DLTS)	5671 (TLS/SSL), 5672	80/ 443 (TLS/SSL)
13. Encoding Format	Binary	Binary	Binary	Text
14. Licensing Model	Open Source	Open Source	Open Source	free
15. Organisational Support	IBM, Facebook, Eurotech, Cisco, Red Hat, Software AG, Tibco, ITSO, M2Mi, Amazon Web Services (AWS), InduSoft, Fiorano	Large Web Community Support, Cisco, Contiki, Erika, IoTivity	Microsoft , JP Morgan, Bank of America, Barclays, Goldman Sachs, Credit Suisse	Global Web Protocol Standard

III .4.1 HTTP (Hyper Text Transport Protocol) :

HTTP est principalement un protocole de messagerie web, qui a été initialement développé par Tim Berners-Lee. Plus tard, il a été développé conjointement par l'IETF et le W3C et publié pour la première fois en tant que protocole standard en 1997. HTTP prend en charge l'architecture web RESTful de type demande/réponse. Analogue à CoAP, HTTP utilise l'Identifiant de Ressource Universel (URI) au lieu des sujets. Le serveur envoie des données via l'URI et le client reçoit des données via un URI particulier. HTTP est un protocole basé sur du texte et il ne définit pas la taille des en-têtes et des charges utiles des messages, cela dépend plutôt du serveur web ou de la technologie de programmation. HTTP utilise TCP comme protocole de transport par défaut et TLS/SSL pour la sécurité. Ainsi, la communication entre le client et le serveur est orientée connexion. Il ne définit pas explicitement la qualité de service (QoS) et nécessite un support supplémentaire pour cela. HTTP est une norme de messagerie web mondialement acceptée offrant plusieurs fonctionnalités telles que les connexions persistantes, le pipelining des requêtes et le codage de transfert par tranches [34].

III .5. L'Organigramme de système :

Noud 1.2.3 :

Ce diagramme de flux décrit le processus d'un système d'agriculture de précision utilisant l'ESP8266 et des capteurs

-Le processus commence

-Initialisation du microcontrôleur ESP8266 et des capteurs nécessaires

-Lecture des données du capteur d'humidité du sol et du capteur AHT10, qui mesure la température et l'humidité

- Vérification de la stabilité des lectures de température et d'humidité
  Si "Non" : Si les lectures ne sont pas stables, le système revient à la lecture des capteurs
  Si "Oui" : Si les lectures sont stables, le système passe à l'étape suivante

-Envoi des données collectées à un nœud de contrôle en utilisant un réseau maillé

-Le processus se répète, assurant une surveillance et une collecte de données en temps réel

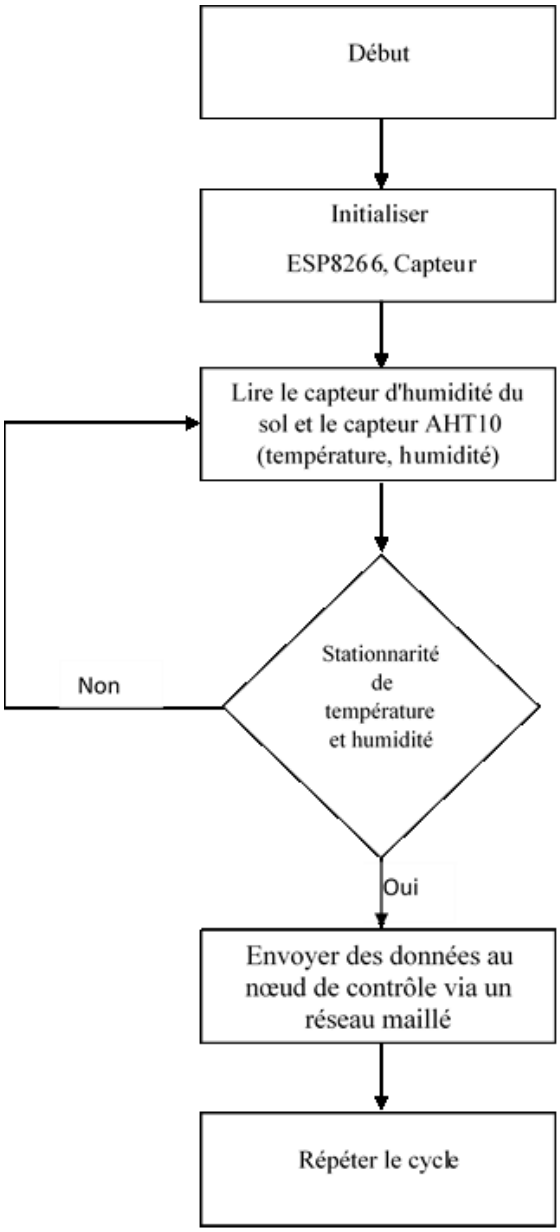


Figure III -5 : L'Organigramme de système

Noud 4 :

- Le processus commence

- Initialisation du microcontrôleur ESP32et sim800l et module sd

- Collecter les données des noud de capteur et stocker sur carte sd

- Vérifier l'heur : **Si "Non"** le système revient à Collecter les données des noud de capteur

Si "Oui" le système passe à l'étape suivante,

- Envoyer les données a une distante via GSM/GPRS

- Le processus se répète, assurant une surveillance et une collecte de données en temps réel

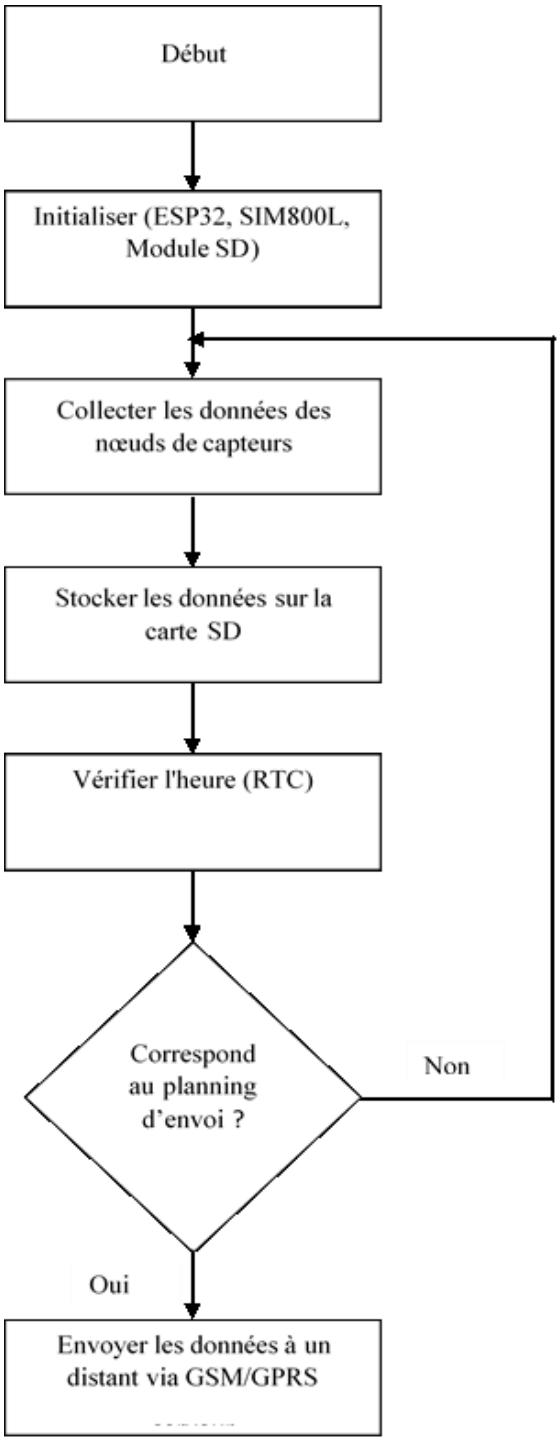


Figure III -6 : L'Organigramme de système

III .6.Diagramme de Communication :

- **Nœuds de Capteur (1, 2, 3)** :
- ESP8266
- Capteur capacitif d'humidité de sol V1.2

- Capteur AHT10 (température et humidité)
- Panneau solaire
- Batterie
- Convertisseur DC-DC Mini-Boost
- **Nœud de Contrôle** :
- ESP32
- WeMos D1 Mini
- Module SIM800L (pour communication GSM/GPRS)
- Module de carte SD (pour stockage des données)
- RTC (Real-Time Clock)
- Panneau solaire
- Batterie
- Afficheur OLED 0.91 pouce

Liens

- **Réseau Mesh** : Connecte les nœuds de capteurs au nœud de contrôle, permettant le transfert des données entre eux.
- **ESP8266 (Nœud de Capteur)** : Connecté au capteur capacitif d'humidité de sol et au capteur AHT10. Envoie périodiquement les données via le réseau mesh à l'ESP32.
- **ESP32 (Nœud de Contrôle)** : Reçoit les données des ESP8266, les stocke sur la carte SD, et les envoie via le module SIM800L.
- **WeMos D1 Mini** : Peut gérer les connexions Wi-Fi, augmentant ainsi la flexibilité et la fiabilité du système.
- **Afficheur OLED** : Affiche les données principales

Messages

- **Nœuds de Capteur** : Envoient des données relatives à l'humidité, la température, et l'humidité du sol au nœud de contrôle via le réseau mesh.
- **Nœud de Contrôle** : Reçoit les données, les stocke sur la carte SD, et les envoie à un serveur ou appareil distant via GSM/GPRS.

III .7.Schéma électrique :

Pour le noud 1, 2, 3 :

Microcontrôleur Wemos D1 (U1) : Le cœur du système, utilisé pour la gestion et le traitement des données des capteurs.

Capteur d'Humidité du Sol (Soil_Moisture_Sensor) :

- Utilisé pour mesurer l'humidité du sol.
- Alimenté en 3.3V et relié à une broche du Wemos D1 pour la lecture des données.

Capteur de Température et d'Humidité (Temp_and_Humidity_Sensor) :

- Utilisé pour mesurer la température et l'humidité de l'air.
- Alimenté en 3.3V et 5V, et relié à une broche du Wemos D1 pour la lecture des données.

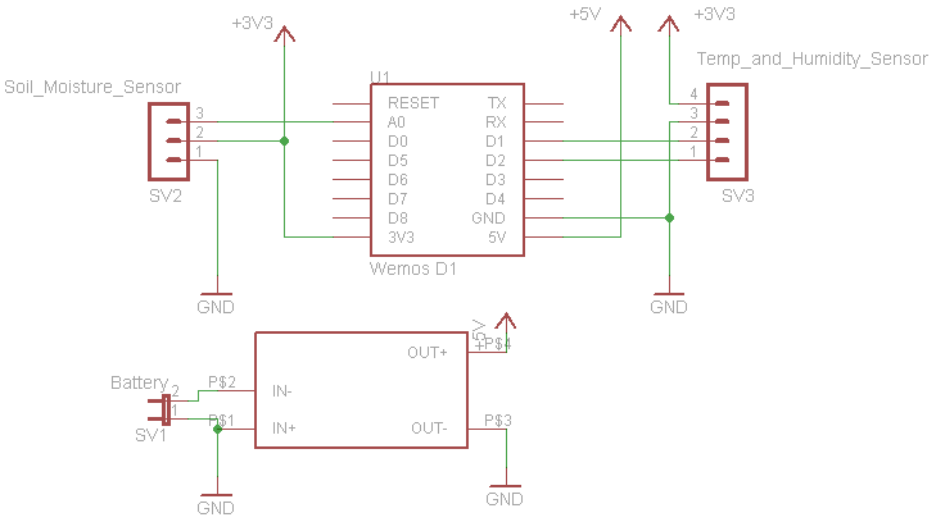


Figure III -7 : schéma électrique de noud 1, 2,3

Pour le noud 4 :

Microcontrôleur ESP32 (U1) : Le cœur du système, utilisé pour gérer et traiter les données.

Lecteur de Carte SD (U4) : Pour stocker les données localement.

Module RTC DS1307 : Pour garder la trace de l'heure réelle.

Écran OLED : Pour afficher les informations.

Module SIM800L (U6) : Pour la communication GSM.

Gestion de l'Alimentation :

- Utilisation de tensions de 5V et 3.3V.
- Diode de protection (D1) et condensateurs de découplage (C6, C7).

LED et Résistances :

- LED pour indication visuelle.
- Résistances pour limiter le courant.

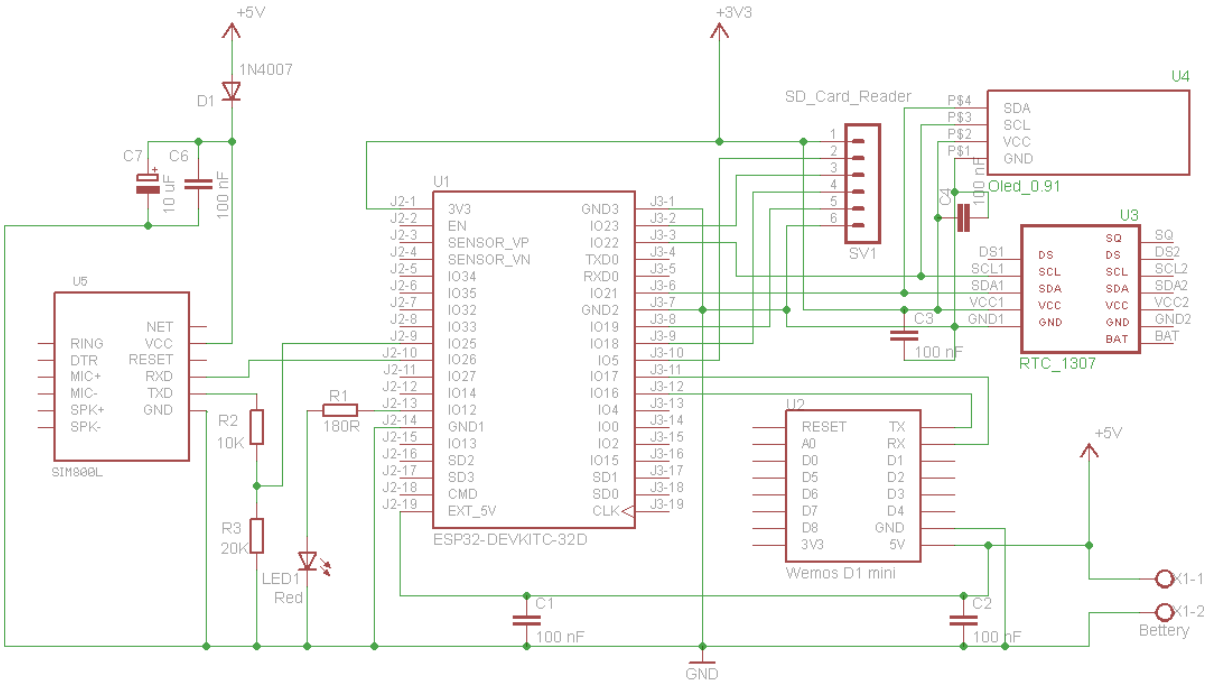


Figure III -8 : schéma électrique de noude4

III .8.Schéma Implantation :

Pour le noud 1, 2 ,3

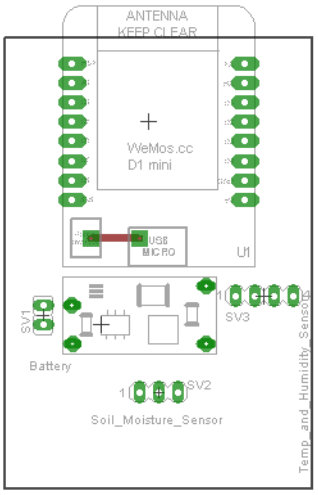


Figure III -9 : schéma de Implantation noud 1, 2,3

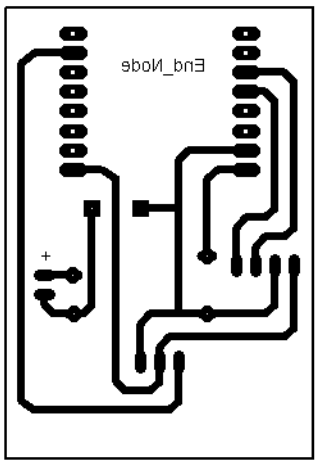


Figure III -10 : pcb

Pour le noud 4 **:**

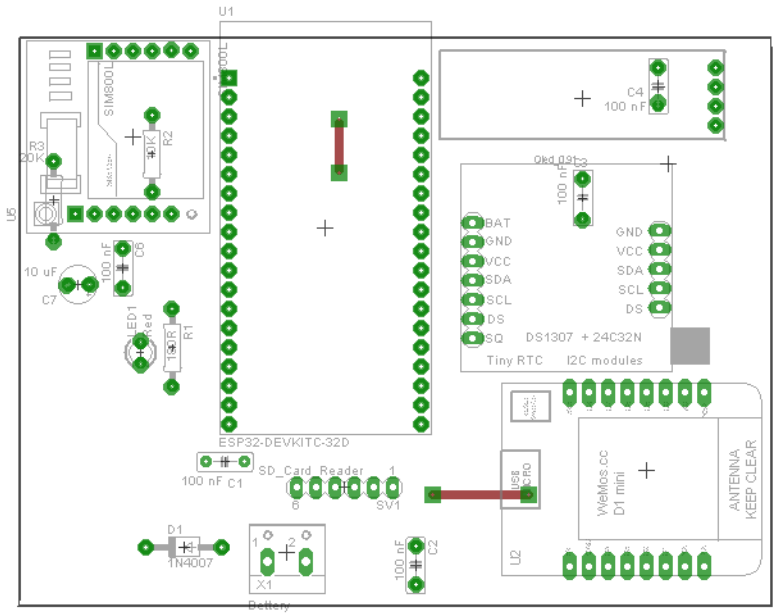


Figure III -11 : schéma d'Implantation noud 4

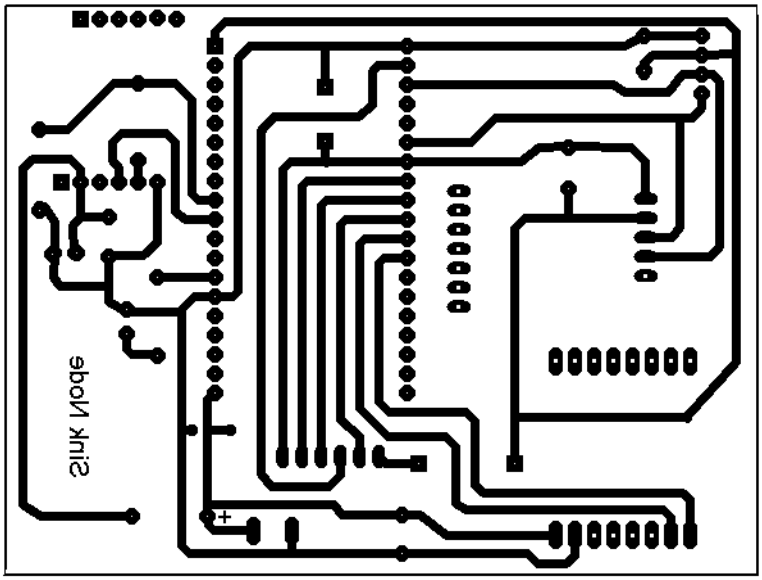


Figure III -12 :pcb

III .9.Teste les capteurs de noud1, 2 ,3 :

Dans le cadre de notre projet de surveillance environnementale, nous allons procéder à la mesure des performances des capteurs installés sur les nœuds 1, 2 et 3. Ces capteurs, essentiels pour la collecte de données précises, sont soumis à une série de tests pour évaluer leur efficacité et leur précision. Les mesures effectuées permettront de déterminer la fiabilité des capteurs dans des conditions variées et d'identifier les éventuelles déviations par rapport aux valeurs attendues. Ce rapport présente les méthodologies utilisées pour tester les capteurs, les résultats des mesures obtenues, ainsi que les analyses et recommandations pour optimiser le fonctionnement des capteurs sur ces nœuds spécifiques.

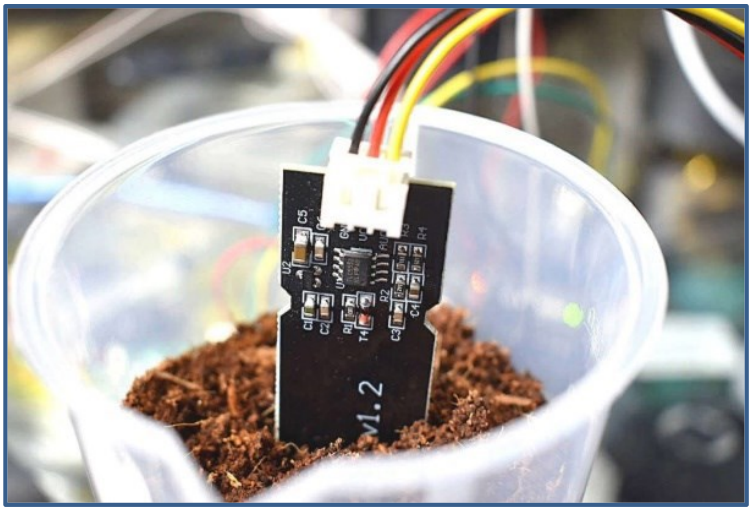


Figure III-13 : test de capteur

III .10. Conclusion

Dans ce projet, nous avons élaboré et mis en place un système d'agriculture de précision innovant, visant à optimiser la gestion des ressources agricoles grâce à une surveillance en temps réel des conditions environnementales et à la collecte de données essentielles sur le terrain.

Nous avons utilisé des nœuds de capteurs interconnectés, chacun équipé de capteurs d'humidité et de température, et de modules de communication basés sur les technologies ESP8266 et ESP32. Les données collectées par ces nœuds sont transmises au nœud de contrôle central qui utilise le protocole ESP-MESH pour garantir une communication fiable et efficace, même dans des environnements où les connexions directes sont limitées.

Conclusion générale

Conclusion générale

Face aux défis croissants auxquels l'agriculture mondiale est confrontée, tels que l'augmentation de la demande alimentaire et les effets du changement climatique, l'agriculture de précision se présente comme une solution innovante pour améliorer l'efficacité et la durabilité des pratiques agricoles. Ce mémoire a exploré comment l'intégration de technologies avancées à travers la conception et la réalisation d'une station de mesure sophistiquée peut transformer la gestion des exploitations agricoles.

Dans la première partie de ce travail, nous avons exposé les fondements théoriques de l'agriculture de précision. En utilisant des outils tels que les systèmes de positionnement GPS, les capteurs sophistiqués et l'analyse géo spatiale, les agriculteurs peuvent désormais surveiller et analyser avec une précision inédite les conditions du sol et du climat. Ces données jouent un rôle crucial dans la prise de décisions éclairées qui augmentent la qualité de la production tout en réduisant l'utilisation des ressources.

En développant et en mettant en œuvre une station météorologique avancée, capable de collecter des données précises sur la réglementation climatique, nous avons démontré comment ces informations peuvent être utilisées pour optimiser l'irrigation et la gestion des sols. Les capteurs de sol, en particulier, fournissent des données essentielles sur l'humidité et la température du sol, permettant une gestion précise de l'irrigation et de la fertilisation, évitant ainsi les excès ou les carences dans l'utilisation des ressources.

La conception du système embarqué a mis en avant des solutions technologiques innovantes, comme l'intégration de modules tels que l'ESP32 et le SIM800L. Ces composants ont été sélectionnés pour leurs capacités à assurer une connectivité sans fil fiable et la transmission des données via les réseaux cellulaires, garantissant ainsi une couverture étendue et une grande fiabilité dans divers environnements agricoles.

L'utilisation de protocoles de communication avancés tels que l'ESP-MESH a permis d'améliorer la communication entre les différents nœuds du réseau, offrant une infrastructure flexible et évolutive pour la collecte et la gestion des données agricoles. Le choix du langage de programmation et son utilisation pour intégrer et contrôler les différents composants ont également été essentiels pour le bon fonctionnement de l'ensemble du système.

Malgré les avantages évidents, l'agriculture de précision doit faire face à des défis, notamment les coûts initiaux de mise en œuvre et la complexité de la gestion des données, en particulier

dans les régions en développement. Cependant, l'avancée continue de la technologie, la baisse des coûts des composants électroniques et l'adoption croissante de l'Internet des objets (IoT) contribuent à surmonter ces obstacles, rendant ces technologies de plus en plus accessibles à un plus grand nombre d'agriculteurs.

En conclusion, ce projet démontre comment l'intégration de technologies de pointe dans l'agriculture de précision peut transformer radicalement la gestion des exploitations agricoles. La station de mesure avancée développée ici n'est pas simplement un ajout technologique, mais représente une avancée vers une gestion plus intelligente et plus durable de l'agriculture. Cette station permet de surveiller et de contrôler avec précision les conditions environnementales, ce qui améliore l'efficacité des opérations agricoles et réduit les impacts environnementaux. Avec l'évolution continue dans ce domaine, nous pouvons envisager un avenir où l'agriculture de précision répondra aux besoins alimentaires mondiaux tout en préservant les ressources naturelles pour les générations futures.

Ainsi, l'agriculture de précision, soutenue par les technologies modernes, se révèle être la clé de l'innovation et de la durabilité dans l'agriculture contemporaine. Elle permet de réaliser une production plus élevée avec moins de ressources, tout en ayant un impact positif sur l'environnement.

Bibliographie

[1] Saddem, R. (2019). Model-checking pour l'agriculture de précision (Doctoral dissertation, Université Montpellier).

[2]. Tisseyre, B. (2012). Peut-on appliquer le concept d'agriculture de précision à la viticulture. CNECA. Montpellier

[3] Saddem, R. (2019). Model-checking pour l'agriculture de précision (Doctoral dissertation, Université Montpellier)

[4] Kogut, P. (2023, 8 mai). Agriculture de précision : Avantages, outils et application. EOS Data Analytics. https://eos.com/fr/blog/agriculture-de-precision/

[5] Kogut, P. (2023, 8 mai). Agriculture de précision : Avantages, outils et application. EOS Data Analytics. https://eos.com/fr/blog/agriculture-de-precision/

[6] Kogut, P. (2023, 8 mai). Agriculture de précision : Avantages, outils et application. EOS Data Analytics. https://eos.com/fr/blog/agriculture-de-precision/

[7] Kogut, P. (2023, 8 mai). Agriculture de précision : Avantages, outils et application. EOS Data Analytics. https://eos.com/fr/blog/agriculture-de-precision/

[8] Bendjama, O., & Derouaz, R. Y. (2020). Apports de la télédétection et des systèmes d'information géographique dans l'agriculture de précision (Mémoire de master, Université des Frères Mentouri Constantine 1)

[9] Zwaenepoel, P. (2000). Agriculture de précision (29-30 mai 2000, 432 pages). Dijon : Educagri Editions.

[10] Humidité du sol. (n.d.). Retrieved from https://www.gerbeaud.com/jardin/fiches/humidite-du-sol,2260.html

[11] Mesure d'humidité du sol. (n.d.). Retrieved from https://www.capteurs-et-mesures-agralis.com/mesure-humidite-sol/

[12] GLOBE Suisse. (s.d.). Comprendre le thème : température du sol. Récupéré sur https://globe-swiss.ch/files/Downloads/2087/Download/Comprendre%20le%20theme%20temperature%20du%20sol_Sec%20I.pdf(8juin 2024).

[13]. Hariti, Yasmine & Belkacem, El. (2021). L'agriculture de précision et son rôle dans le développement durable en Algérie : cas de Dar Al Filaha Algeria

[14] EOS DATA ANALYTICS. << Les Limites De L'agriculture De Précision En France Et Dans Le Monde>>, [en ligne], 05.2023, [https://eos.com/fr/blog/agriculture-de-precision/#ref-anchor-1], (4 juin 2024).

[15] Malika, H., & Nabila, T. (2019). Internet des objets dans le domaine de l'agriculture de demain (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).

[16] Cissé, A. (2023). Conception et Implémentation d'un Système de Gestion Agricole Intelligente basé sur l'Internet des objets

[17] Mehta, M. (2015). ESP8266: A Breakthrough in wireless sensor networks and internet of things. International Journal of Electronics and Communication Engineering & Technology, 6(8), 7-11.

[17]Roufaida, B., & Samir, I. (2019). Mémoire de fin d'étude

[18] Arjadi, R. H., Candra, H., Prananto, H. D., & Wijanarko, T. A. W. (2018, October). Rssi comparison of esp8266 modules. In 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS) (pp. 150-153). IEEE

[19] Boukhalfa, D. (2021/2022). La chambre de malade intelligente [Thesis, Université Mohamed Khider de Biskra].

[22] Draif, K. (2024, April 29). Comment utiliser Capteur d'humidité de sol avec Arduino. Moussasoft. https://www.moussasoft.com/capteur-capacitif-dhumidite-de-sol-v1-2-arduino/

[23] ElectroSchematics.com, "Temperature Sensor," retrieved from ElectroSchematics.

[24] components101, components101.(n.d) aht10 digital temperature and humidity measurement module

[25] Sugiyanti, I. (2019). Design of ATM crime monitoring system based on MQTT protocol using SIM800L and Arduino Mega 2560.

[26] D. (. L. c. d. m. i. [. U. M. K. d. B. Boukhalfa.

[27] l. LOUIS, working principle of arduino and using it, International journal of control automation communication systemq(IJCACS),1(2),21-29, 2016.

[28] a. w. KHAN, An efficient wireless sensor network based on the ESP-MESH protocol for indoor and outdoor air quality, monitoring ,sustainability ,14(24),16630, 2022.

[29] C. A. e. H. TABLEAU : Analyse comparative des protocoles de messagerie pour les systèmes IoT : MQTT.

[31] Kuria, K. P., Robinson, O. O., & Gabriel, M. M. (2020). Monitoring temperature and humidity using Arduino Nano and Module-DHT11 sensor with real time DS3231 data logger and LCD display.

[32] Khan, A. U., Khan, M. E., Hasan, M., Zakri, W., Alhazmi, W., & Islam, T. (2022). An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring. *Sustainability*, *14*(24), 16630.

[33]Khan, A. U., Khan, M. E., Hasan, M., Zakri, W., Alhazmi, W., & Islam, T. (2022). An Efficient Wireless Sensor Network Based on the ESP-MESH Protocol for Indoor and Outdoor Air Quality Monitoring. *Sustainability*, *14*(24), 16630.

[34] Naik, N. (2017, October). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. In *2017 IEEE international systems engineering symposium (ISSE)* (pp. 1-7). IEEE.