REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

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

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Télécommunications

Spécialité : Système de Télécommunications

Conception d'un Système d'Irrigation Intelligent Embarqué pour l'Agriculture de Précision et la Gestion Optimisée de l'Eau

---

Présentés par :

BENDAMARDJI Mahrez

Proposés et Dirigés par :

Dr. BENGHERBIA Billel

Dr.CHADLI Samir

Promotion 2025

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah, le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour terminer ce travail.

Nos remerciements vont à ***Monsieur Bengherbia billel*** *et* ***Monsieur Chadli samir****, nos encadreurs, pour leurs conseils, leurs Sincères contributions à la réalisation de notre travail, et pour la qualité exceptionnelle de leur encadrement, pour leur patience, leur rigueur et leur disponibilité durant la préparation de ce mémoire.*

Nous exprimons nos sincères remerciements aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de faire partie du jury.

Nous tenons également à remercier ***BERKANI Mohamed Rafik Aymene****,* ***TOUBAL Abd-el Hafid*** *et* ***MOHRI Abd-Slam*** *pour leur aide précieuse dans la réussite de ce projet*

Nous exprimons aussi notre profonde gratitude à tous les membres de nos familles pour leur aide tout au long de la réalisation de ce travail.

Dédicaces

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه يتحقق النجاح والإنجاز، له الحمد على ما أنعم وتفضل، وله الشكر على ما وهب وأكمل.

أتوجه بأسمى عبارات الشكر والعرفان لوالدتي الغالية، هذه المرأة العظيمة التي كانت دعواتها ومساندتها لي نوراً في طريقي، وكل كلمات الشكر تقف عاجزة أمام عطائها وحنانها الذي لا يُقدّر بثمن.

كما أتقدم بجزيل الشكر ووافر الامتنان إلى والدي العزيز، الذي كان لي سنداً كبيراً ودعماً متواصلاً في كل مراحل إعداد هذا العمل، فبتوجيهاته وحكمته وصبره، استطعت أن أواصل وأسعى لتحقيق هذا النجاح.

ولا أنسى أن أخص بالشكر والامتنان جدي الغالي، الذي كانت مساعدته الكبيرة ووقوفه الدائم إلى جانبي أثراً بالغاً في إتمام هذا المشروع.

وأتقدم أيضاً بأسمى عبارات الشكر والدعاء لأخي "سفيان"، وأحمد الله على نجاته وسلامته بعد الحادث، وأرجو له دوام الصحة والعافية.

كما أشكر أختي "هاجر" وأختي "إلهام" على مساندتهما ومحبتهم التي كانت حاضرة في كل الأوقات.

ولا يفوتني أن أعبر عن خالص شكري وامتناني لخالتي "صابرينة"و جدتي 'باية، التي كانتا لي أماً ثانية بكل ما تحمله الكلمة من معنى، بحنانهما واهتمامهما ووقوفهما إلى جانبي.

وأخيراً، أقدم جزيل شكري وامتناني لأصدقائي الأعزاء: زكي، أيمن، ياسين، أكرم، آية، ومريم، على كل لحظة صادقة، وكل كلمة دعم وتشجيع، وكل وقفة أخوّة لا تُنسى

ملخص

يقدم هذا المشروع تصميم وتنفيذ نظام ذكي للري يهدف إلى تحسين استخدام المياه في الزراعة الدقيقة. يعتمد النظام على دمج أجهزة استشعار لاسلكية، والذكاء الاصطناعي، وتعلم الآلة، والمنطق الضبابي لمراقبة الظروف البيئية في الوقت الفعلي واتخاذ قرارات الري بشكل تلقائي. يأخذ النظام بعين الاعتبار عدة عوامل مثل نوع التربة، مرحلة نمو النبات، والبيانات المناخية لتحديد الاحتياجات الفعلية للمياه. يهدف هذا المشروع إلى تحسين المردودية الزراعية مع تقليل التأثير البيئي، إضافة إلى تقديم حل مبتكر وفعال من حيث التكلفة للمزارعين. كما يتضمن هذا العمل تحليلاً فنياً واستراتيجياً وملياً لتقييم جدوى تنفيذ المشروع على نطاق واسع

الكلمات المفتاحية

الزراعة الدقيقة، الري الذكي، شبكات المستشعرات اللاسلكية، إنترنت الأشياء، الذكاء الاصطناعي، التعلم الآلي،

التعلم العميق، المنطق الضبابي، المستشعرات، المناخ، الموارد المائية

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la mise en œuvre d'un système d'irrigation intelligent destiné à optimiser l'utilisation de l'eau en agriculture de précision. En combinant des capteurs sans fil, l'intelligence artificielle, l'apprentissage automatique et la logique floue, le système est capable de surveiller en temps réel les conditions environnementales et de prendre automatiquement des décisions d'irrigation. Il tient compte de plusieurs paramètres comme le type de sol, le stade de croissance des plantes, et les données climatiques pour déterminer les besoins exacts en eau. Ce projet vise non seulement à améliorer les rendements agricoles tout en réduisant l'impact environnemental, mais aussi à offrir une solution innovante et économiquement viable pour les agriculteurs. L'étude inclut également une analyse technique, stratégique et financière pour évaluer la faisabilité du projet à grande échelle.

Mot clé : Agriculture de précision**,** Irrigation intelligente**,** RCSF**,** Internet des Objets**,** Intelligence Artificielle**,** Apprentissage Automatique**,** Apprentissage Profond**,** Logique Floue**,** ESP32**,** Capteurs**,** Climat**,** Ressources en eau

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an intelligent irrigation system aimed at optimizing water usage in precision agriculture. By integrating wireless sensors, artificial intelligence, machine learning, and fuzzy logic, the system can monitor environmental conditions in real time and make automated irrigation decisions. It considers various parameters such as soil type, plant growth stage, and weather data to determine the exact water needs. The project aims to enhance crop productivity while minimizing environmental impact and offers an innovative, cost-effective solution for farmers. The study also includes a technical, strategic, and financial analysis to assess the large-scale feasibility of the proposed system.

Key Words: Precision Agriculture**,** Smart Irrigation**,** WSN**,** Internet of Things**,** AI**,** ML**,** DL**,** Fuzzy Logic**,** ESP32**,** Sensors**,** Climate**,** Water Resources

Table des matières

Remerciements ..... **I**
Dédicace ..... **II**
ملخص..... **III**
Résumé ..... **III**
Abstract ..... **III**
Sommaire ..... **IV**
Liste des figures ..... **V**
Liste des tableaux ..... **VI**
Liste des abréviations ..... **VII**
I. Chapitre I : Généralités sur l'irrigation et la technologie RCSF 4
I.1 Introduction 4
I.2 L'agriculture de précision et son importance 4
I.3 Les systèmes d'irrigation 5
I.3.1 Irrigation classique 5
I.3.2 Irrigation intelligente 7
I.3.3 Comparaison entre irrigation classique et intelligente 19
I.4 Les réseaux de capteurs sans fil RCSF 20
I.4.1 Définition 20
I.4.2 Les Spécificités des RCSF 20
I.4.3 Caractéristiques et défis des RCSF 22
I.4.4 Système d'exploitation pour RCSF 23
I.4.5 L'utilisation des RCSF pour l'agriculture de précision 23
I.4.6 L'avantage des RCSF dans l'agriculture de précision 23
I.4.7 Conditions nécessaires des RCSF pour l'agriculture de précision 24
I.5 Conclusion 24
II. Chapitre II : l'intelligence artificielle et la méthode de logique floue 26
II.1 Introduction 26
II.2 L'Intelligence Artificielle 26
II.2.1 Définition 26
II.2.2 Domaines d'applications de l'intelligence artificielle 26
II.2.3 Spécificités d'applications de l'IA 27
II.3 Apprentissage Automatique (Machine Learning) : 28
II.3.1 Méthodes d'apprentissage automatique (machine Learning) 29
II.4 Apprentissage profond (Deep Learning) 32
II.4.1 Pourquoi l'apprentissage profond (deep learning) ? 32
II.4.2 Le réseau neuronal 33

II.4.3 Les différents types de réseau neuronal 34
II.5 Méthodes d'évaluation des réseaux IA 40
II.5.1 Erreur Quadratique Moyenne (MSE) 40
II.5.2 Erreur Absolue Moyenne (MAE) 40
II.5.3 Coefficient de Détermination (R^2) 40
II.5.4 Erreur Relative Absolue (RAE) 41
II.6 Logique floue 41
II.6.1 Définition 41
II.6.2 Système floue : 41
II.6.3 Inférences floues 43
II.6.4 Défuzzification 44
II.6.5 Fonctions d'appartenance 46
II.6.6 Opérateurs de la logique floue 47
II.6.7 Pourquoi on utilise logique floue dans notre projet 47
II.7 Conclusion 48
III. Chapitre III : Conception et analyse du système 50
III.1 Introduction 50
III.2 Présentation générale du système 50
III.2.1 Outils de conception 50
III.2.2 Descriptif du système 57
III.3 Module nœud 58
III.3.1 Logigramme du module nœud 59
III.4 Module central 61
III.4.1 Logigramme ..... **Erreur ! Signet non défini.**
III.4.2 Conception du système ANN 62
III.4.3 Détection des besoins de la plante à travers son stade et son type 65
III.4.4 Étude et analyse des caractéristiques du sol 66
III.4.5 Conception du model logique floue 68
III.5 Module de l'activations de la pompe 72
III.5.1 Logigramme 72
III.6 Analyse, évaluation et discutions des résultats 73
III.6.1 Analyse du fonctionnement du « module nœud » prédéfinit 73
III.6.2 Analyse du fonctionnement du « module central » 75
III.6.3 Détection des besoins de la plante à travers son stade et son type 80
III.6.4 Étude et analyse des caractéristiques du sol 81
III.6.5 Analyse des dernières étapes 83
III.6.6 Analyse du moule activateur de la pompe 84
III.7 Difficultés rencontrées dans ce projet 85
III.8 Comment notre système sera développé et amélioré à l'avenir 85

III.9 Conclusion 86
IV. Chapitre IV : 88
IV.1 Premier axe : présentation du projet 88
IV.1.1 L'idée de projet (solution proposée) 88
IV.1.2 Les valeurs proposées 89
IV.1.3 Équipe de travail 90
IV.1.4 Objectifs du projet : 91
IV.1.5 Calendrier de réalisation du projet : 91
IV.2 Deuxième axe : Aspects innovants 91
IV.2.1 Nature des innovations 91
IV.2.2 Domaines d'innovation : 92
IV.3 Troisième axe : Analyse stratégique du marché 92
IV.3.1 Le segment du marché 92
IV.3.2 Mesure de l'intensité de la concurrence 92
IV.3.3 La stratégie marketing 93
IV.4 Quatrième axe : Plan de production et d'organisation 93
IV.4.1 Le Processus de production 93
IV.4.2 L'Approvisionnement 95
IV.4.3 La main d'œuvre 95
IV.4.4 Les Principaux partenaires 96
IV.5 Cinquième axe : Plan financier 97
IV.5.1 Prix de revient système 97
IV.5.2 DETAIL DE LA PRODUCTION EN QUANTITE 100
IV.5.3 Business Model Canvas 110

Liste des figures

Figure I-1: Classification des systèmes d'irrigation 5
Figure I-2: Irrigation goutte à goutte 6
Figure I-3: Irrigation de surface 6
Figure I-4: Irrigation par aspersion 7
Figure I-5: Irrigation intelligente 8
Figure I-6: Types d'argiles 8
Figure I-7:Matière de sable 9
Figure I-8: Triangle de types de sol 10
Figure I-9: Représentation de drainage du sol 12
Figure I-10: Représentation les stades de développement de la pomme de terre 17
Figure I-11: Représentation RCSF 20
Figure I-12: Topologie en étoile 21
Figure I-13: Topologie en toile 21
Figure I-14: Topologie hybride 21
Figure II-1: Différents domaines de l'IA 28
Figure II-2: Structure de l'IA 29
Figure II-3: Branches d'apprentissage automatique 29
Figure II-4: Différentes méthodes de classification 30
Figure II-5: Différentes méthodes de régression 31
Figure II-6: Méthode de Clustering 31
Figure II-7: Comparaison entre ML et DL 33
Figure II-8: Anatomie d'un neurone 33
Figure II-9: Représentation réseau neuronal 33
Figure II-10: Fonction d'activation sigmoïde 35
Figure II-11: Fonction Activation du Tanh 36
Figure II-12: Fonction Activation du Relu 36
Figure II-13: Architecture des réseaux neurones artificiels 37
Figure II-14: Réseaux à une couche 37
Figure II-15: Réseaux multi couches 38
Figure II-16: Réseaux récurrents 38
Figure II-17: Processus réseau convolution 39
Figure II-18: Représentation Réseau de neurones récurrents 39

Figure II-19: Représentation réseau Long Short-Terme Memory 40
Figure II-20: Définition système logique floue 41
Figure II-21: Représentation des différentes classes..... 42
Figure II-22: Méthode d'application d'inférence Min-Max 44
Figure II-23:Méthode du centre de gravité 44
Figure II-24: Méthode de la moyenne pondérée..... 45
Figure II-25: Principe d'adhésion maximale 45
Figure II-26: Différents Types de fonctions d'appartenance..... 46
Figure III-1: Descriptif carte lolin s3..... 50
Figure III-2: Descriptif carte WROOM-32..... 51
Figure III-3: Descriptif capteur AHT10 51
Figure III-4: Capteur capacitif d'humidité de sol 1.2 V 51
Figure III-5: Module RTC ds1302..... 52
Figure III-6: Module SD adaptateur 52
Figure III-7: Capteur BMP280 52
Figure III-8: Capteur FC-37..... 53
Figure III-9: Anémomètre..... 53
Figure III-10: Pompe à eau 53
Figure III-11: Relai 54
Figure III-12: Batterie lithium et support 54
Figure III-13: Logos des différentes bibliothèques..... 56
Figure III-14: Différents types de communication du protocole ESP-NOW 57
Figure III-15: Représentation de système d'irrigation intelligente..... 57
Figure III-16 : réalisation initiale du module nœud ……...58
Figure III-17: Logigramme du module nœud..... 59
Figure III-18: Logigramme module central..... 61
Figure III-19 : Réalisation initiale du module central 62
Figure III-20: Système de récolte base de données 63
Figure III-21: Représentation du model optimal 64
Figure III-22: Prélèvement échantillons du sol..... 66
Figure III-23: Récipient échantillon de base..... 67
Figure III-24: Récipient échantillon complété..... 67
Figure III-25: Composition de la couche de sable..... 67
Figure III-26: Analyse des différentes couches 68

Figure III-27: Traçage des intervalles d'entrées 70
Figure III-28: Traçage des intervalles de sortie 71
Figure III-29: Logigramme activation de la pompe 72
Figure III-30: Vérification de la récolte des données 73
Figure III-31: Vérification de la sélection des paramètres définis 74
Figure III-32: Vérification de la prise au compte des années bissextile 74
Figure III-33: Calcul des paramètres 74
Figure III-34: Validation de l'envoi des données 75
Figure III-35: Validation du compliment des données 75
Figure III-36: Constations de démarrage de la récolte des données 76
Figure III-37: Visualisation de la création du fichier 76
Figure III-38: Délivrance d'enchantions de la base de données 76
Figure III-39: Matrice de corrélation 77
Figure III-40: Base de données optimale après modification 77
Figure III-41: Graphe des résultats de comparaison 78
Figure III-42: Graphes simulation essais des différents modelés 78
Figure III-43: Représentations des résultats obtenus du modèle optimal 79
Figure III-44: Validation du modèle d'essai 80
Figure III-45: Vérification d'estimation du modèle principal 80
Figure III-46: Validation des informations du stade de la plante 80
Figure III-47: Calcul opérant des besoins de la plante 81
Figure III-48: Détection du type de sol 82
Figure III-49: Validation de processus définit 83
Figure III-50: Définition la situation en période de pluviométrie 84
Figure III-51: Définition la situation en période sèche 84
Figure III-52 : Réalisation initiale du module activateur de la pompe 84
Figure IV-1: Représentation du processus de production 94

Liste des tableaux

Tableau I-1: Types de sol 10
Tableau I-2: Capacités de champ des types de sol 11
Tableau I-3: Point de flétrissement permanent des types de sol 11
Tableau I-4: Densité sèche des types de sol 11
Tableau I-5: Timing de croissance des cultures 16
Tableau I-6: Coefficients des cultures 17
Tableau I-7: Différenciation des 2 types d'irrigations 19
Tableau III-1: Définition des codes couleur 60
Tableau III-2:Définition des intervalles 69
Tableau III-3: Condition des besoins en eau 70
Tableau III-4: Représentation des codes couleur 72
Tableau III-5: Représentation des codes couleur 73
Tableau III-6: Comparaison des résultats des différentes technologies 77
Tableau III-7: Calcul des pourcentages des couches de sol 81
Tableau IV-1: Prix de revient module nœud 97
Tableau IV-2: Prix de revient module central 98
Tableau IV-3: Prix de revient module activateur de la pompe 99
Tableau IV-4: Prix de revient pour une superficie de 2500 m2(25 ares) 99
Tableau IV-5: Volume global d'heures de production 100
Tableau IV-6: Heures nécessaires pour la fabrication d'un système 100
Tableau IV-7: Nombre de systèmes fabriqués chaque année 101
Tableau IV-8: Détail frais de Structure annuels en DA 101
Tableau IV-9: Calcul Taux horaire en DA 101
Tableau IV-10: Valeurs matières premières consommées en DA 102
Tableau IV-11: Valeurs production stockée en DA 102
Tableau IV-12: Détail des quantités et montants de chiffre d'affaires 103
Tableau IV-13: Détail investissement 104
Tableau IV-14: Financement bancaire (estimation) 105
Tableau IV-15: Détail des charges prévisionnelles 106
Tableau IV-16: Tableau des comptes de résultats prévisionnel 107
Tableau IV-17: Bilan prévisionnel actif 108
Tableau IV-18: Bilan prévisionnel passif 109

Liste des abréviations

GPS: Global Positioning System

IOT: Internet of things

IA : Artificial Intelligence.

RCFS : réseaux de Capteurs Sans Fil

SDCR: Soil Dielectric Constant Reader

DL: Deep Learning

ML: Machine Learning.

ANN: Artificial Neural Network.

NLP : Natural Language Processing

CNN : Convolutional Neural Network

RNN : Réseau de Neurones Récurrents

LSTM: Long Short-Term Memory

MSE: Mean Squared Error

MAE: Mean Absolute Error

RAE: Relative Absolute Error

RSME : Racine de l'Erreur Quadratique Moyenne

COG: Center of Gravity

WSN: Wireless Sensor Networks

WIFI: Wireless Fidelity

ESP: Espressif Systems Platform

SD: Secure Digital

P2P: Peer-to-Peer

TMAX : Température maximale

TMIN : Température minimale

RH: Relative Humidity

API: Application Programming Interface

CSV: comma-separated values

DNN: Deep Neural Network

FC: Field Capacity

PWP: Permanent Wilting Point

BET : bureaux d'étude technique

PLA : Polylactic Acid

PCB : Printed Circuit Board

3D : Trois dimensions

SAV : service après-vente

IDE : Integrated Development Environment

ETC : Evapotranspiration de la culture

ET0 : Evapotranspiration de référence

KC : Coefficient cultural

RN : Rayonnement net (Net Radiation)

RNS : Rayonnement net solaire

RSO : Clear-sky solar radiation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, l'agriculture a connue de profondes mutations face aux défis croissants liés à l'augmentation de la population mondiale, à la raréfaction des ressources naturelles, au changement climatique et à la nécessité d'une production alimentaire durable. Ces enjeux ont accéléré le développement de nouvelles approches agricoles plus intelligentes, plus efficaces et respectueuses de l'environnement. Parmi elles, l'agriculture de précision s'impose comme une solution incontournable.

Basée sur l'intégration des technologies avancées telles que les réseaux de capteurs sans fil RCSF, les systèmes intelligents d'irrigation et l'usage de l'intelligence artificielle IA, l'agriculture de précision permet de répondre de manière ciblée aux besoins des cultures. Grâce à ces innovations, les agriculteurs peuvent désormais optimiser l'usage de l'eau, des intrants et les taches quotidiennes, tout en améliorant les rendements et en réduisant l'impact environnemental.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'étude s'inscrit dans la conception et la mise en œuvre d'un système d'irrigation intelligent combinant plusieurs domaines clés : l'acquisition de données environnementales à l'aide de capteurs, le traitement intelligent des données via des modèles d'apprentissage automatique et de logique floue, ainsi que la prise de décision automatisée pour activer ou non l'irrigation. Le système vise à identifier avec précision les besoins en eau des plantes en tenant compte de leurs caractéristiques biologiques, du type de sol dans lequel elles évoluent , ainsi que des conditions climatiques locales.

Au-delà de la partie technique, cette étude aborde aussi les dimensions stratégiques et économiques en analysant la faisabilité du projet, ses perspectives d'innovation et son positionnement sur le marché.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre présente les bases théoriques de l'agriculture de précision, en mettant en lumière les différents types d'irrigation, de l'irrigation classique à l'irrigation intelligente, et en comparant leurs avantages et inconvénients. Il explore également le rôle essentiel des réseaux de capteurs sans fil dans la collecte d'informations en temps réel pour un suivi précis des paramètres agro-environnementaux.

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques d'intelligence artificielle et de modélisation intelligente. Il introduit les concepts fondamentaux de l'intelligence artificielle,

de l'apprentissage automatique et de l'apprentissage profond, en expliquant leur utilité dans le traitement et l'interprétation des données agricoles. Ce chapitre aborde également la logique floue, un outil indispensable pour modéliser l'incertitude et la variabilité des conditions naturelles dans la prise de décision.

Le troisième chapitre traite de la conception et de la réalisation du système d'irrigation intelligent. Il détaille l'architecture du système, les modules matériels et logiciels développés, les algorithmes utilisés, et le fonctionnement global. Ce chapitre intègre également une phase d'analyse des résultats obtenus, de validation des performances du système, ainsi qu'une discussion sur les points forts, les limites et les améliorations possibles.

Enfin, le quatrième chapitre aborde les dimensions entrepreneuriales du projet. Il présente l'idée globale du système comme solution innovante, explore ses axes d'innovation technologique, décrit le processus de production, évalue les coûts de réalisation et propose une stratégie de mise sur le marché. Ce chapitre se veut une ouverture vers une future industrialisation du système, en tenant compte des facteurs économiques, organisationnels et concurrentiels.

Ainsi, ce mémoire vise à démontrer la faisabilité technique et économique d'une solution intelligente et autonome pour l'irrigation agricole, au service d'une agriculture plus durable, connectée et performante.

Chapitre I:
Généralités sur l'irrigation et la technologie RCSF.

I.1 Introduction

L'eau est un élément de base nécessaire pour la croissance et le développement de la culture agricole. Avec les défis actuels du changement climatique et une demande alimentaire croissante à l'échelle mondiale, l'utilisation responsable et efficace de l'eau est une nécessité absolue. L'irrigation, une technique agricole ancienne, fournit la quantité d'eau nécessaire à la plante pour faciliter un rendement accru et la sécurité alimentaire. Cependant, chaque méthode d'irrigation a ses avantages et inconvénients en fonction de très nombreux facteurs tels que le sol, le climat et les besoins des cultures et valeurs nutritives préférées. Le choix raisonnable d'un système d'irrigation approprié aux conditions locales est essentiel pour une agriculture durable, productive et écologique. Ce chapitre aidera à comprendre quels systèmes d'irrigation pouvant assurer une efficacité en fonction de la nature et spécificités de la terre, ainsi que les solutions à envisager pour une utilisation rationnelle de l'eau dans l'agriculture.

I.2 L'agriculture de précision et son importance

L'agriculture de précision est une approche moderne dans la gestion des terres agricoles en utilisant des technologies et l'analyse de données. Bien entendu, cette méthode a été initiée avec le guidage du GPS pour les équipements agricoles. Néanmoins, elle s'est développée avec divers outils terrestres, aériens et satellitaires. En fin de compte, l'objectif étant, la collecte des données sur le sol et les cultures pour aider les agriculteurs à décider ce qui convient à chaque zone de champ. En effet, l'agriculture de précision combine des données de manière facilement accessible avec des cartes détaillées, des photos par avion ou satellites. Pour une performance optimale sur la base d'une attention particulière des terrains. De ce fait, l'agriculture de précision est destinée à augmenter le niveau de productivité des cultures, des bénéfices plus élevés dus à des coûts plus faibles de production, cela tout en préservant un environnement écologique. [1], [2]

La précision en agriculture est cruciale pour relever les défis de la sécurité alimentaire et de la durabilité mondiale. Alors que la population augmente, la production alimentaire devrait également augmenter, tout en protégeant les ressources naturelles. L'analyse des données sur place aide a identifié des maladies et la prolifération nuisible des ravageurs permettant une intervention rapide et ciblée pour préserver et garantir la production. Cela nous permet une optimisation de l'eau et des engrais en conséquence. Actuellement d'énormes quantités d'eau sont utilisées et nécessaires pour une production

moindre. Tous les éléments précités ne sont réalisables qu'avec l'apport de la technologie,[2]

I.3 Les systèmes d'irrigation

I.3.1 Irrigation classique

Le terme Irrigation classique est utilisé pour indiquer toutes les méthodes anciennes et conventionnelles appliquées par les agriculteurs pour approvisionner en eau leurs cultures, par opposition à celles automatisées ou touchées par des technologies de pointe. Les exploitants ne disposant de systèmes de distribution d'eau a haute pression et recourant à l'irrigation classique doivent surveiller et contrôler manuellement les quantités exactes d'eau à apporter aux cultures.[3]

I.3.1.1 Type d'irrigation classique

L'agriculture classique comprend une grande diversité de méthodes d'irrigation adaptées aux besoins des cultures, aux conditions climatiques et à la nature des sols. Le schéma ci-dessus présente une classification des systèmes d'irrigation classique en trois grandes catégories :

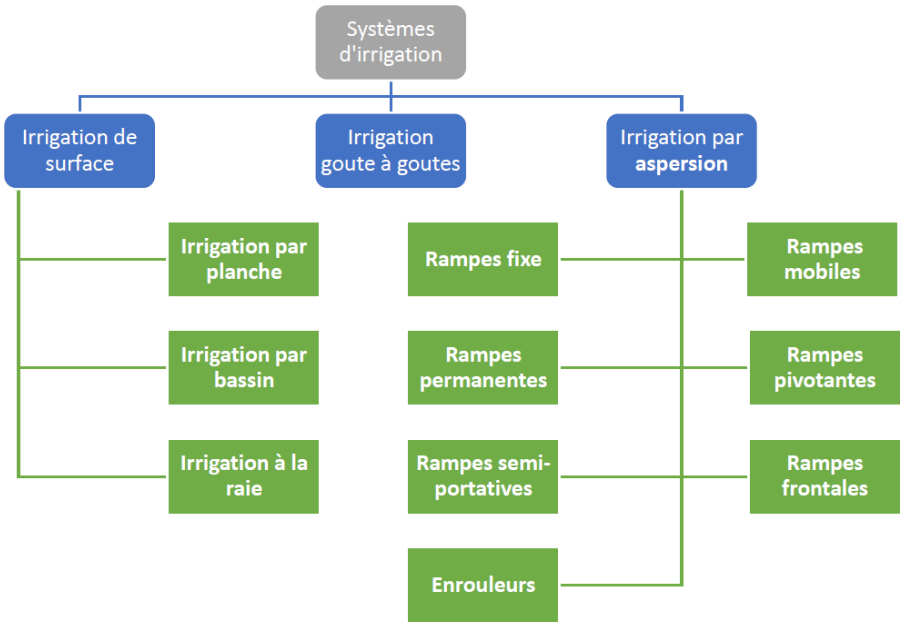


Figure I-1: Classification des systèmes d'irrigation.

I.3.1.1.1 Irrigation goutte à goutte

Ce système d'arrosage est également appelé micro-irrigation ou irrigation locale. Elle consiste à apporter de petites quantités d'eau a travers un système de tuyaux équipé de goutteurs, réduisant les évaporations tout en restreignant la croissance des mauvaises herbes, permettant l'infiltration profonde directement au niveau des racines des plante. Ce système est très économique en eau, adapté a de nombreux types de cultures, y compris les légumes et les arbres. Cette méthode d'irrigation généralement automatisée, utilise des équipements

légers et fixes, ce qui permet une synchronisation de l'arrosage au moindre coût[4], [5], [6]. cette technique est représentée dans la figure suivante :



Figure I-2: Irrigation goutte à goutte.

I.3.1.1.2 Irrigation de surface

L'irrigation de surface consiste à acheminer l'eau provenant d'un point haut du terrain vers l'endroit des cultures. Cette amenée d'eau par ruissellement permet la submersion des panneaux de cultures à irriguer ainsi que l'écoulement de l'eau entre les rangées.
Lorsque la source d'approvisionnement en eau est en-dessous du point de plantation, il est indispensable d'utiliser des pompes.

Cette méthode d'irrigation est généralement sans tracas, cependant, elle est associée à de lourdes pertes liées à l'important volume d'eau utilisé, à l'évaporation et à l'absorption du sol. Encore une fois, cette méthode n'est efficace que si le sol est perméable.[4], [5]

La technique de l'irrigation de surface est représentée dans la figure suivante :

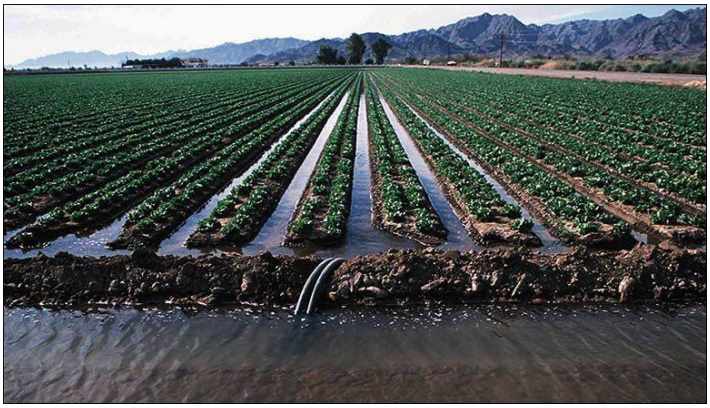


Figure I-3: Irrigation de surface.

I.3.1.1.3 Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est alors une technique qui distribue une grande quantité d'eau en fines gouttes (imitation de pluie), acheminée à travers des tubes et des arroseurs,

l'eau est envoyée sous pression aux cultures. Elle est idéale pour les terrains variés, y compris les régions difficiles à servir avec d'autres méthodes d'irrigation, par exemple les zones en pente ou des sols irréguliers. D'un autre côté, l'aspersion n'est pas efficace dans des conditions venteuses ou dans le cas d'un arrosage vulgaire utilisé dans des zones hautement salinées sur des cultures hydres.[6]

La technique de l'irrigation par aspersion est représentée dans la figure suivante :



Figure I-4: Irrigation par aspersion.

I.3.1.2 Inconvénients de l'irrigation classique

L'irrigation traditionnelle présente plusieurs problèmes. Elle cause un gaspillage important d'eau, ce qui est très problématique surtout dans les zones arides et semi-arides. L'eau n'est pas toujours bien répartie, ce qui donne une irrigation irrégulière des plantes. Cela peut réduire la productivité agricole et, avec le temps, abîmer les sols.

I.3.2 Irrigation intelligente

I.3.2.1 Définition d'irrigation intelligente

L'irrigation intelligente est un nouveau concept mondial dans le domaine de l'irrigation. Cela signifie l'application exacte et précise de l'eau pour répondre aux besoins spécifiques et particuliers de chaque plante. Communément, la définition acceptée de l'irrigation intelligente mise en œuvre est la gestion saine des ressources en eau, ce qui implique l'application de la bonne quantité d'eau au bon moment, au bon endroit et au bon usage aidant ainsi à gérer la variabilité du domaine de l'eau. Par conséquent, augmenter l'efficacité de la productivité des cultures et la réduction des coûts, tout en préservant l'écologie.[4] La figure suivante représente l'irrigation intelligente :



Figure I-5: Irrigation intelligente.

I.3.2.2 Facteurs contribuants à la qualité d'arrosage intelligent

I.3.2.2.1 Nature du sol

Le sol se compose de trois éléments principaux :

- **Argile**

Les argiles sont des minéraux naturels très abondants et occupent 42% du volume de l'écorce terrestre. Les argiles ont une faible granulométrie mesurée généralement moins de 2 ou 4 microns et on peut les définir à partir de deux points : la taille des particules et la minéralogie. Les géologues et les pédologues pensent aux argiles comme des minéraux de petite taille ; cependant, lorsque vous mélangez des argiles avec de l'eau, les céramistes les définissent comme des matières premières plastiques. En architecture, le terme sol argileux se réfère normal sur un terrain contenant un pourcentage considérable de minéraux argileux qui ont un impact substantiel sur le comportement du sol, principalement la sensibilité à l'eau. Par conséquent, les sols nouvellement définis par le diamètre des particules, qui est moins de 20 microns, sont classés en fonction de la granulométrie des particules. Un sol argileux doit présenter une structure phyllosilicate pour être considéré comme tel.[7] L'argile existe sous plusieurs formes, qui sont représentées dans la figure I-6.



Figure I-6: Types d'argiles.

- **Limon**

Le limon se compose de minéraux corporels d'un diamètre compris entre 20 et 50 microns, le terme désignant soit la fraction silteuse, soit un mélange d'argile, de silt et de sable : Les sols limoneux peuvent également poser problème pour l'agriculture, mais ils sont généralement moins sujets à l'érosion dans la mesure où sous l'effet de la pluie, ils ont tendance à devenir plus ou moins compacts et à former une croûte imperméable qui présente l'inconvénient de détruire leurs propriétés de sol colloïdal et de restreindre leurs mouvements diffusifs. Les limons sont plus fins que les sables sans toutefois être négligeables, car leurs propriétés d'activité chimique et de rétention d'eau en agrosystème rural ont une importance non négligeable.[8]

- **Sable**

Fragments minéraux les plus résistants à l'altération, le minéral dominant étant le quartz. Ces fragments peuvent se diviser aussi en fonction de leur diamètre en deux catégories ;

- **Sables grossiers** : leur diamètre entre 0.2 et 2 millimètres**.**
- **Sables fins** : leur diamètre entre 0,05 et 0,2 millimètres**.**

Ils se mobilisent au niveau physique de la rigidité de système, d'où le terme squelette. Ils possèdent par ailleurs dans le domaine hydrique des propriétés de rétention capillaire qui ayant un rôle particulier dans les sols. La texture n'a qu'une importance secondaire pour la macroporosité, mais dans le cas certaines situations des sols riches en sable grossiers, ils peuvent avoir un rôle en augmentant la macroporosité, particulièrement si la texture est continue [8]. La matière du sable se présente sous forme de grains, comme illustré dans la figure I-7.



Figure I-7: Matières de sable.

Quand on mélange les trois composants du sol (sable, limon et argile) avec des pourcentages spécifiques, on obtient différents types de sols. Chaque type de sol est défini par la proportion de ces trois éléments. Voici les principaux types de sols :

Tableau I-1: Types de sol.

Type de sol	
Argile	Limon très fin
Argile sablonneuse	Limon
Argile limoneuse	Limon sablonneux
Limon argileux	Limon argilo-sableux
Limon argileux fin	Sable limoneux
Limon fin argileux	Sable
Limon fin	

Les types de sol sont organisés dans un triangle des textures pour faciliter leur analyse, comme illustré dans la figure I-8.

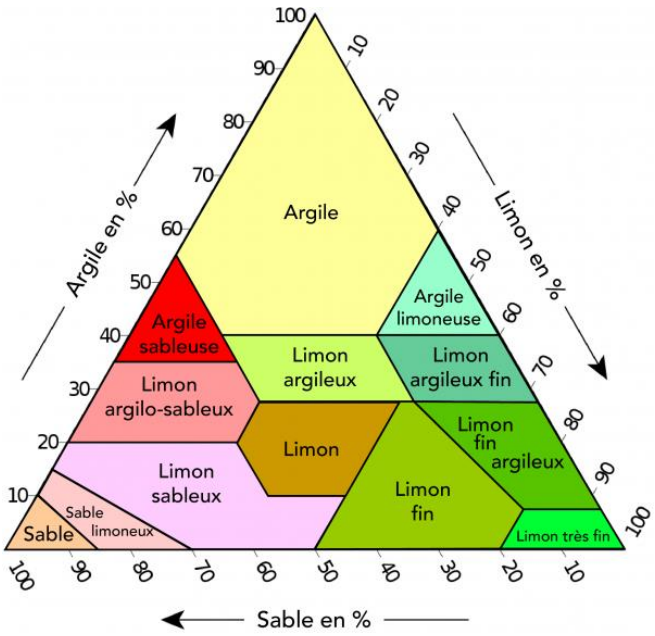


Figure I-8: Triangle de types de sol.

I.3.2.2.1.1 Capacité au champ

La capacité au champ est la quantité d'eau maximale que le sol peut retenir après l'élimination de l'eau gravitationnelle qui s'écoule généralement 24 à 48 heures après la pluie ou l'irrigation. C'est l'eau dont les plantes peuvent disposer immédiatement et joue un rôle vital dans le contrôle de l'irrigation.[9] Après des études approfondies sur la capacité au champ, il a été possible de déterminer que chaque type de sol possède une capacité spécifique, comme indiqué dans le tableau I-2.

Tableau I-2: Capacités au champ des types de sol[10].

Type de sol	Capacité au champ	Type de sol	Capacité au champ
Sable	0.08	Loam argilo-sableux	0.27
Sable limoneux	0.15	Loam argilo-limoneux	0.36
Limon sableux	0.21	Loam argileux	0.34
Limoneux fins	0.32	Argile sableuse	0.31
Sable limoneux	0.28	Argile limoneuse	0.37
Loam	0.29	Argile	0.36

I.3.2.2.1.2 Le point de flétrissement permanent

Le point de flétrissement permanent est l'humidité du sol la plus basse à laquelle les plantes ne peuvent plus aspirer l'eau. Ce dernier est retenu si fortement que les racines ne peuvent plus aspirer l'eau du sol pour permettre un développement normal des plantes. [11] Après des études détaillées sur le PWP, on a pu conclure que chaque type de sol a son propre point de flétrissement, comme le montre le tableau I-3.

Tableau I-3: Point de flétrissement permanent des types de sol[10].

Type de sol	Point de flétrissement permanent (cm^3/cm^3)	Type de sol	Point de flétrissement permanent (cm^3/cm^3)
Sable	0.02	Loam	0.10
Sable limoneux	0.04	Loam argilo-sableux	0.10
Loam sableux	0.08	Loam argilo-limoneux	0.13
Loam limoneux	0.13	Loam argileux	0.15
Sable argileux	0.10	Argile limoneuse	0.16
Argile sableuse	0.18	Argile	0.28

I.3.2.2.1.3 Densité du sol

La densité du sol est le rapport entre la masse sèche du sol et son volume global avec les pores. Elle indique des indices d'empaquetage de sol, affiche le mouvement de l'eau, de l'air, ainsi que la taille de développement des racines. Un sol a densité élevée réduit de la disponibilité de l'eau et l'infiltration des racines uniformément.[9]

Tableau I-4: Densité sèche des types de sol [12].

Type de sol	Densité sèche (g/cm^3)	Type de sol	Densité sèche (g/cm^3)
Sable	1.52	Loam limoneux	1.28
Loam sableux	1.44	Loam argileux	1.28
Loam	1.36	Argile	1.20

Toute l'eau présente dans le sol n'est pas directement disponible pour les cultures, ce qui nécessite une bonne compréhension de sa répartition et de son accessibilité. Cette notion est primordiale pour optimiser les apports hydriques, éviter le gaspillage et améliorer la productivité agricole. Comme l'illustre la figure ci-dessous, seule une partie de l'humidité du sol peut réellement être utilisée par la plante.

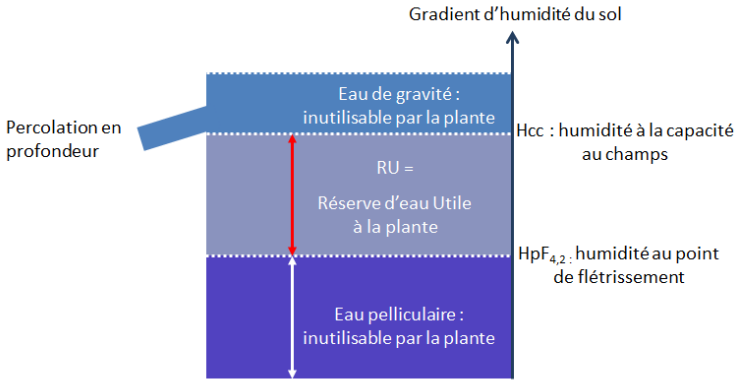


Figure I-9: Représentation de drainage du sol.

Remarque

Les trois paramètres de sol nous aident à estimer la quantité d'eau présente à une profondeur donnée au niveau des racines. Cette information est essentielle pour évaluer notre système logique floue.

$$Q_e = (F_c - P_{wp}) \times \rho \times D \qquad \textbf{Eq I-1}$$

I.3.2.2.2 Besoin de la plante

Pour une plante, le besoin en eau est généralement défini comme la quantité reçue par unité de temps ayant des propriétés de croissance et de travail optimales. Le taux d'évapotranspiration, les conditions climatiques et le stade de croissance de la culture sont des indicateurs de l'humidité du sol indiquant une irrigation correctement choisie et aide à maintenir un bilan hydrique optimal.[13]

I.3.2.2.3 L'évapotranspiration de référence (ET_0)

L'évapotranspiration de référence est la quantité d'eau perdue par évaporation du sol et la transpiration d'une culture standard gazon bien irrigué sous différentes conditions climatiques. Les conditions climatiques affectant l'ET_0 sont : température, humidité, vent, rayonnement solaire et ainsi de suite. L'évapotranspiration de référence est utilisée comme base pour calculer les besoins en irrigation.[13], [14]

I.3.2.2.3.1 Équation de Penman-Monteith

Comme nous le savons, il existe de nombreuses équations pour calculer l'évapotranspiration de référence (ET_0). Cependant, parmi toutes ces formules, nous avons choisi d'utiliser l'équation de Penman, car elle est reconnue pour fournir des résultats plus précis et fiables. Cette méthode intègre plusieurs paramètres climatiques importants, ce qui nous permet d'obtenir une estimation plus juste de l'ET_0.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} + u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \qquad \textbf{Eq I-2}$$

- **ET_0** : évapotranspiration de référence en millimètres par jour (mm/jour).
- **Δ** : pente de la courbe de pression de vapeur saturante (kPa/°C).
- **R_n** : rayonnement net à la surface de la culture (MJ/m² par jour).
- **G** : flux de chaleur dans le sol (MJ/m² par jour).
- **γ** : constante psychrométrique (kPa/°C).
- **T** : température moyenne de l'air en degrés Celsius (°C).
- **u_2** : vitesse du vent mesurée à 2 mètres de hauteur (m/s).
- **e_s** : pression de vapeur saturante à la température T (kPa).
- **e_a** : pression de vapeur réelle (kPa).

- **Pente de la courbe de pression de vapeur saturante (Δ)**

Mesure la variation de la pression de vapeur saturante en fonction de la température.

$$\Delta = \frac{4098\, e_s}{(T_{mean} + 273.3)^2} \qquad \textbf{Eq I-3}$$

- **Pression de vapeur saturante (es)**

Pression maximale de vapeur d'eau dans l'air à saturation à une température donnée.

$$e_s = \frac{e_{s(min)} + e_{s(max)}}{2} \qquad \textbf{Eq I-4}$$

Avec :

$$e_{s(min)} = 0.6108\ e^{\frac{(17.27T_{min})}{(T_{min}+273.3)}} \qquad \textbf{Eq I-5}$$

Et :

$$e_{s(max)} = 0.6108\ e^{\frac{(17.27T_{max})}{(T_{max}+273.3)}} \qquad \textbf{Eq I-6}$$

- **Pression de vapeur réelle (ea)**

Pression actuelle de vapeur d'eau dans l'air, calculée à partir de l'humidité relative (RH) .

$$e_a = \frac{RH_{mean}}{100} e_s \qquad \textbf{Eq I-7}$$

- **Flux de chaleur dans le sol (G)**

Dans l'équation de Penman-Monteith, Flux de chaleur dans le sol est souvent considéré comme nul (G ≈ 0) pour les calculs journaliers, car la chaleur absorbée par le sol le jour est généralement restituée la nuit, rendant son effet net négligeable**.**

- **Le rayonnement net à la surface de la culture (Rn)**

Le rayonnement net Rn correspond à la quantité d'énergie solaire réellement absorbée par la surface de la culture.

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \qquad \textbf{Eq I-8}$$

Avec :

- R_{ns} : Rayonnement solaire net.
- R_{nl}: Rayonnement net longwave.

- **Rayonnement solaire net (Rns)**

C'est la portion du rayonnement solaire global qui est effectivement absorbée par la surface de la culture après réflexion.

$$R_{ns} = (1 - \alpha) \times R_s \qquad \textbf{Eq I-9}$$

α : albédo de la surface (réflexion), typiquement 0,23 **.**

R_s: rayonnement solaire global mesuré ou estimé (MJ/m² par jour).

- **Le rayonnement net longwave**

Correspond à l'énergie infrarouge émise par la surface terrestre vers l'atmosphère.

$$R_{nl} = \sigma \frac{T_{max,k} + T_{min,k}}{2} \left(0.34 - 0.14\sqrt{ea}\right)\left(1.35\frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \qquad \textbf{Eq I-10}$$

- σ : constante de Stefan-Boltzmann (4.903 X 10 puissance -9).
- $T_{max,k}, T_{min,k}$: températures maximale et minimale en Kelvin (°C + 273.16).
- R_{so}:rayonnement solaire clair.

- **Rayonnement solaire clair (Rso)**

C'est la quantité théorique maximale de rayonnement solaire reçue à la surface sans aucune obstruction atmosphérique (ciel parfaitement clair).

$$R_{so} = (0{,}75 + 2 \times 10 - 5 \times z) \times R_a \qquad \textbf{Eq I-11}$$

- z : altitude du site (dans notre cas 960 mètres).

- R_a: rayonnement solaire extraterrestre (MJ/m² par jour).

- Rayonnement solaire extraterrestre quotidien(Ra)

C'est-à-dire la quantité d'énergie solaire reçue au sommet de l'atmosphère terrestre.

$$R_a = \frac{24 * 60}{\pi} G_{sc} \times d_r \times (\omega_s \, sin\phi \, sin\delta + cos\phi \, cos\delta \, sin \, \omega_s) \qquad \textbf{Eq I-12}$$

- G_{sc}: Constante solaire = 0,0820 MJ/m² par min.
- d_r: Correction de la distance Terre-Soleil (facteur sans unité).
- ω_s: angle horaire au coucher du soleil (radians).
- ϕ: latitude du lieu (dans notre cas 37.27N radians).
- δ: déclinaison solaire (radians).

- **Distance relative Terre-Soleil (dr)**

Facteur corrigé tenant compte de la variation annuelle de la distance entre la Terre et le Soleil.

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \qquad \textbf{Eq I-13}$$

- **Latitude du lieu exprimée en radians (∅)**

$$\emptyset = A\frac{\pi}{180} \qquad \textbf{Eq I-14}$$

A : alttitude

Avec : l'attitude l'endroit qui se trouve notre projet c'est 37.27N.

- **La déclinaison solaire (δ)**

C'est-à-dire l'angle d'inclinaison du soleil par rapport au plan équatorial terrestre, exprimé en radians. Cet angle varie tout au long de l'année en fonction du jour J.

$$\delta = 0.409 \times sin\,(\frac{2\pi J}{365} - 1.39) \qquad \textbf{Eq I-15}$$

- **Angle horaire au coucher du soleil (ωs)**

Il représente l'angle maximal que le soleil parcourt dans le ciel avant de se coucher.

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \times \tan(\delta)) \qquad \textbf{Eq I-16}$$

I.3.2.2.4 Coefficient Cultural (Kc)

Le coefficient cultural est utilisé pour estimer les besoins en eau de la culture en fonction de son type, des conditions météorologiques et des stades de croissance. Les utilisateurs peuvent appliquer des Kc pour affiner les facteurs de gestion de l'eau des plantes. La valeur de Kc change tout au long du processus de développement des cultures. Le coefficient culturel Kc est déterminé par les gains et les pertes de chaleur latente. La valeur de Kc est variable en fonction de la culture et son processus de croissance. Selon le stade de la plante, Kc est divisé en 4 phases : phase initiale, développement, intermédiaire et maturation. Chaque phase a une valeur de kC différente précisant les besoins en eau de la plante sur la base du temps.Le tableau suivant présente chaque stade ainsi que sa période, en lien avec la culture.

Tableau I-5: Timing de croissance des cultures.

Cultures	Init	Dev	Moy	final	Total	Date de plantation	Région
Céréales							Méditerranéen
Blé tendre	25	40	50	30	145	Novembre/Décembre	Méditerranéen
Blé dur	30	45	55	35	165	Novembre/Décembre	Méditerranéen
Orge	20	35	50	25	130	Novembre	Méditerranéen
Avoine	20	40	50	30	140	Novembre/Décembre	Méditerranéen
Maïs	30	40	50	30	150	Mars/Avril	Méditerranéen
Légumes							Méditerranéen
Carottes	30	40	60	20	150	Février/Mars	Méditerranéen
Céleri	25	40	45	15	125	Avril	Méditerranéen
Crucifères	25	35	25	10	95	Février	Méditerranéen
Pomme de terre	25	30	40	20	115	Mars/Avril	Méditerranéen

Afin de mieux comprendre le développement de la culture, nous avons souhaité représenter les différents stades de croissance de la plante. La figure I-10 illustre clairement les étapes principales, depuis la germination jusqu'à la maturité

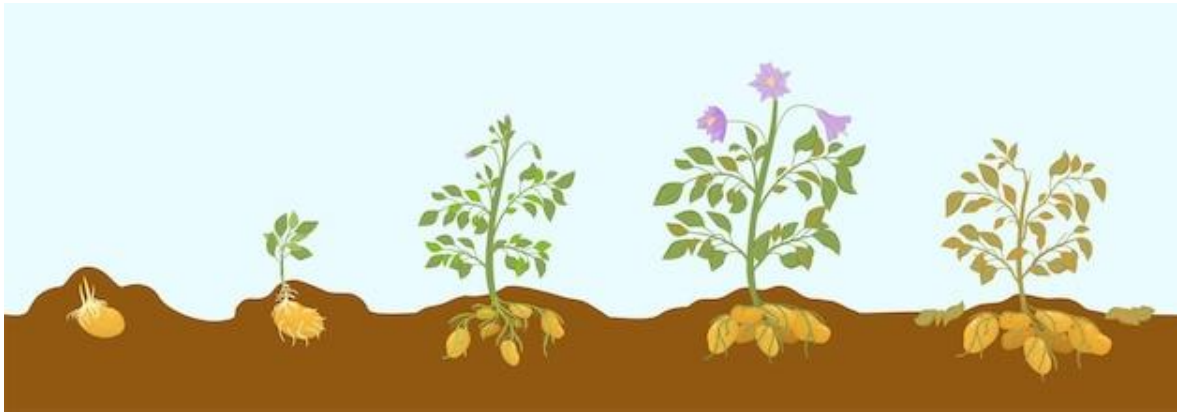


Figure I-10: Représentation des stades de développement de la pomme de terre

Chaque culture possède ses propres coefficients, et chaque stade de développement est associé à un coefficient spécifique, comme le montre le tableau I-6.

Tableau I-6: Coefficients des cultures.

Légume	Kc Début	Kc Développement	Kc Milieu	Kc Fin
Carotte	0.30	0.30- 0.60	0.60	0.20
Céleri	0.25	0.40 - 0.60	0.45	0.15
Crucifères	0.25	0.35 - 0.50	0.25	0.10
Pomme de terre	0.40	0.40 - 1.15	1.15	0.75

I.3.2.2.5 Evapotranspiration réelle (ETc)

L'évapotranspiration réelle est définie par l'eau utilisée par une culture pour son développement, elle prend en considération l'évaporation du sol et la transpiration de la plante. C'est un grand indicateur des besoins réels en eau des cultures, car c'est la quantité maximale que la plante doit retirer du sol, et avoisine souvent environ 110 %.

Les cultures sont diversifiées en termes de besoins et de stades de développement, le Kc permet d'utiliser l'eau à des fins spécifiques dans les phases appropriées. L'ETc est calculée à partir du ET0 et du Kc.

$$ET_c = K_c \times ET_0 \qquad \textbf{Eq I-17}$$

I.3.2.2.6 Les facteurs climatiques

- **Humidité de l'air**

Un air sec dessèche le sol et accélère l'évaporation de son eau et la transpiration des plantes, ce qui conduit à leur besoin en eau à son plus haut niveau, contrairement à un air humide qui diminue l'évaporation et la transpiration. En mesurant l'évaporation à l'humidité

de l'air, l'usage de l'eau peut être mieux géré et le stress hydrique évité.

- **Humidité du sol**

L'humidité du sol permet d'ajuster l'irrigation au besoin réel de la plante. En effet, un sol sec équivaut à une faible absorption d'eau et un stress hydrique, un sol trop humide, en revanche, peut aussi entraîner l'asphyxie de la racine. Ceci permet une utilisation judicieuse de l'eau pour une croissance optimale.

- **Radiation solaire**

La puissance du soleil sur le rayonnement est à la base de l'évaporation de l'eau et de la transpiration des plantes. L'arrosage pendant la journée entraîne une évaporation à un point tel que de grandes quantités d'eau sont perdues et éprouvent des répercussions négatives sur la culture. Pour éviter cela, l'irrigation devrait être en début de journée ou le soir. De nuit ou tard le soir pour éviter la perte de l'eau et de maximiser l'hydratation des plantes.

- **La température de l'air**

La culture des plantes doit également tenir compte de la température de l'air. En ce qui concerne les conditions de croissance, il est important de savoir non seulement à quel point il fait chaud dans le champ, mais aussi au-dessus des plantes.

- **Horaires d'irrigation :**

Les horaires d'irrigation sont essentiels, et le moment idéal pour arroser les plantes est tôt le matin. À cette heure, l'évaporation est minimale, ce qui permet une meilleure absorption de l'eau par le sol et les racines, garantissant ainsi une irrigation plus efficace pour les cultures.

- **La vitesse du vent**

Le vent est également un facteur clé idéal pour l'arrosage. Dans la plupart des cas, il est conseillé d'éviter de pratiquer l'arrosage, en particulier par aspersion, sous un flux fort. Cela peut causer une perte importante de l'eau à travers l'évaporation et la dispersion, rendant l'opération inefficace. En général, les périodes de calme sont les plus propices.

- **La Pluie**

La Pluie qui tombe dans le sol peut pénétrer dans la terre, ruisseler à la surface du sol ou s'évaporer. Elle assure le renouvellement et le maintien des réserves en eau du sol.il est souvent très utile d'apprécier la quantité d'eau tombé afin de pouvoir calculer le bilan hydrique.

I.3.2.3 Avantages de l'irrigation intelligente

L'irrigation intelligente présente de nombreux avantages. Elle permet d'améliorer les rendements agricoles tout en réduisant l'intervention humaine, ce qui limite la fatigue et le besoin de présence constante. Grâce à une répartition équilibrée de l'eau et à la capacité du système à prendre des décisions automatiquement, cette technologie assure une gestion efficace des ressources. Elle permet également de réaliser des économies importantes sur la consommation d'eau, tout en évitant le gaspillage grâce à l'automatisation et au contrôle précis des apports [4].

I.3.2.4 Les défis de l'irrigation intelligente

Malgré ses nombreux avantages, l'irrigation intelligente présente aussi certaines limites. Tout d'abord**,** le coût initial élevé lié à l'installation et aux équipements peut constituer un frein, en particulier pour les petits agriculteurs. De plus, la complexité technologique nécessite des compétences spécifiques pour l'installation, la configuration et l'utilisation des systèmes. Ces technologies sont aussi dépendantes de l'énergie (souvent solaire) et d'une connexion Internet stable, ce qui n'est pas toujours disponible en zones rurales. L'adaptabilité du système peut être limitée selon le type de sol ou de culture, et la maintenance régulière est indispensable en raison des capteurs sensibles aux conditions climatiques extrêmes.

I.3.3 Comparaison entre irrigation classique et intelligente

Une comparaison entre l'irrigation classique et l'irrigation intelligente permet de mieux comprendre leurs différences, comme le montre le tableau suivant :

Tableau I-7: Différenciation des 2 types d'irrigation.

Critère	Irrigation Classique	Irrigation Intelligente
Gestion	Exige une expérience et se fait uniquement de manière empirique.	Basée sur des capteurs, des données et l'IA pour optimiser les rendements.
L'eau	Irrigation insuffisante ou inutile, basée sur des hypothèses et des observations.	Précision de l'irrigation grâce aux capteurs d'humidité et aux prévisions météorologiques.
Surveillance	Inspections humaines sur place.	Drones, imageurs satellites, capteurs et IA.
Décision	Basée sur les observations humaines.	IA, modèles et analyse des données.
Productivité	L'excès d'irrigation entraîne une diminution des rendements.	L'IA et l'automatisation augmentent les rendements.
Technologie	Aucune technologie.	IoT, IA, capteurs et systèmes automatisés.
Environnement	Epuisement des ressources par gaspillage de l'eau.	Gestion précise des ressources, préservation de l'environnement.

L'irrigation intelligente est la solution innovante pour optimiser les ressources tout en augmentant les rendements, mais c'est une solution qui nécessite un investissement substantiel et une formation poussée .

I.4 Les réseaux de capteurs sans fil RCSF

I.4.1 Définition

Un Réseau de Capteurs Sans Fil est un système qui combine des micro-capteurs pour observer, traiter et transmettre les données. Les capteurs, ou nœuds du réseau, sont souvent disposés de manière aléatoire dans des zones inaccessibles appelées champs de captage. Les informations collectées par chaque nœud sont transmises, selon une topologie aléatoire, vers une station de base, qui les transmet ensuite à l'utilisateur final par différents moyens. La station de base peut également contrôler le réseau en envoyant des commandes.[15]

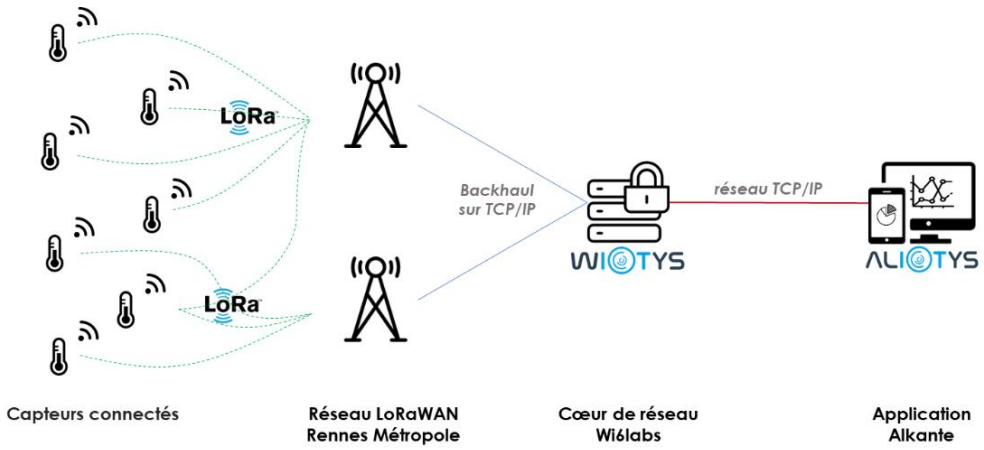


Figure I-11: Représentation RCSF.

I.4.2 Les Spécificités des RCSF

I.4.2.1 Topologie

La topologie d'un réseau désigne la manière dont les nœuds (appareils ou capteurs) sont disposés et connectés entre eux pour permettre la transmission des données. Elle définit la structure du réseau et influence son fonctionnement, sa performance et sa résilience.
Il existe trois types de topologies pour les réseaux de capteurs :

I.4.2.1.1 Topologie en étoile

Dans cette topologie, chaque nœud du réseau est relié à la station de collecte en tant que centre, créant ainsi un système à saut unique. Ce type de topologie est facile à mettre en œuvre et consomme peu d'énergie. Cependant, il présente un inconvénient : la station de base est un point de faiblesse, car tout le réseau dépend de cette station centrale. De plus, la

portée de cet arrangement peut être limitée en fonction de la distance maximale entre un nœud et la station comme la figure I-12 Montre[15]

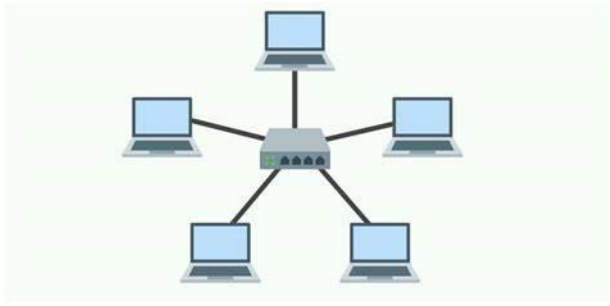


Figure I-12: Topologie en étoile.

I.4.2.1.2 Topologie en toile (Mesh Network)

Cette technologie permet à chaque nœud de se connecter à plusieurs autres, assurant ainsi une communication redondante, robuste et sans point unique de défaillance comme la figure I-13 le montre.

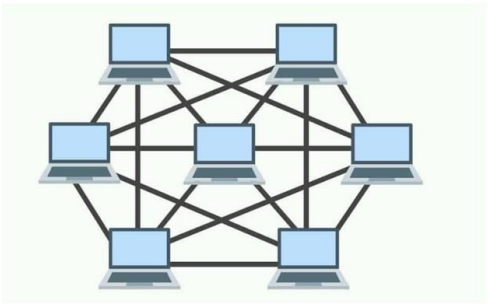


Figure I-13: Topologie en toile.

Cette technologie combine plusieurs types de topologies (comme en étoile, en toile, ou en arbre) afin de tirer parti des avantages de chacune et d'optimiser la performance du réseau comme la figure I-14 le montre.

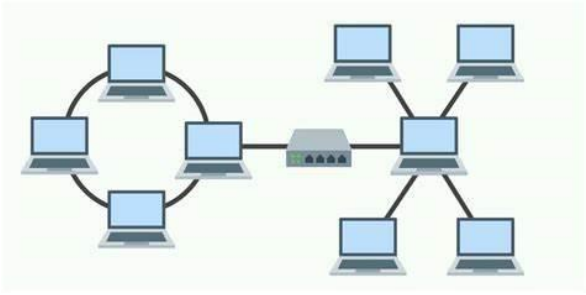


Figure I-14: Topologie hybride.

I.4.2.2 Medium

Les RCSF utilisent principalement les ondes radio comme médium de communication. Trois technologies radio sont utilisées couramment :

- **IEEE 802.11x / WiFi** : Ce protocole est utilisé fréquemment dans beaucoup de types

de communications sans fil, incluant la communication entre capteurs. Cependant, cette technologie a aussi une consommation haute en énergie qui a pour conséquence une réduction sérieuse de la vie des capteurs qui sont alimentés par batteries, jusqu'à quelques heures. Ainsi, son utilisation est évitée fréquemment dans les réseaux de capteurs.

- **IEEE 802.15.1 / Bluetooth** : Cette technologie permet de communiquer à courte portée et a un débit très bas, il est ainsi idéal pour les réseaux personnels.
- **IEEE 802.15.4 / Zigbee** : Ces ressources sont très communément utilisées dans les RCSF en raison de sa consommation basse en énergie. Cependant, cette technologie a aussi ses propres défauts : basse vitesse de 250 Kb/s et courte portée maximum de 100 mètres, cependant ça ne peut pas vous mener à de grands problèmes pour les RCSF avec plus de 65 000 capteurs.[15]

I.4.3 Caractéristiques et défis des RCSF

- **Tolérance aux fautes** : Les RCSF sont construits pour être toujours fonctionnels même deux Antennes si quelques capteurs ne marchaient pas, tout en fournissant toujours un service continu.
- **Mise à l'échelle :** Les RCSF doivent aussi être construits de sorte à accueillir de nouveaux capteurs et de garder le même service.
- **Bande passante limitée :** max des capteurs aux alentours de quelques connexions par jour, quelques débits de Kbyte/s sont utilisés pour ce but.
- **Gestion de l'énergie :** La vie des RCSF maximale est limitée par la vie des capteurs. Après que leurs ressources d'énergie aient été épuisées, les capteurs échoueront et aucun service ne peut plus être fourni. Les solutions renouvelables d'énergie comme l'énergie du soleil peuvent être utilisées ou d'autres sources d'énergie pour prolonger leurs durées.
- **Sécurité :** Les RCSF doivent être sûrs et sécurisés pour les applications critiques et doivent fournir de la confidentialité, de l'authenticité et un contrôle d'accès en ce qui concerne les données.
- **Possibilités de calculs :** Aujourd'hui nous constatons encore que les capteurs ne disposent pas de grandes possibilités de calculs et de la mémoire. Par exemple, le capteur MicaZ marche à la vitesse de 16 MHz avec 128 Ko de mémoire pour stocker les données. Cela peut mener au comportement de réseau imprévisible s'ils sont demandés plusieurs calculs en même temps par les services du réseau. Le pouls se droit ainsi à être corrigé

pour les RCSFs.[15]

I.4.4 Système d'exploitation pour RCSF

Les systèmes d'exploitation pour capteurs sans fil sont conçus pour répondre aux contraintes de mémoire et d'énergie.

- **TinyOS :** système open-source, modulaire, très économe en énergie.
- **Contiki :** léger, modulaire, écrit en C, adapté aux systèmes avec peu de mémoire.
- **LiteOS :** basé sur C++, simule un environnement Unix avec une faible empreinte mémoire. Le TinyOS est le plus efficace en termes de consommation d'énergie.[16]

I.4.5 L'utilisation des RCSF pour l'agriculture de précision

Les réseaux de capteurs sans fil sont des dispositifs de capteur distribué dans un environnement avec une tâche à réaliser pour surveiller et gérer des phénomènes physiques spécifiques. Les capteurs envoient des données au nœud puits, puis avertissent l'utilisateur final en utilisant un réseau sans fil, l'internet pour la transmission de données et le réseau local. Ils permettent en outre de bien gérer les secteurs de cette agriculture de précision et prendre des meilleures décisions. L'avantage des RCSF par rapport aux autres réseaux est qu'ils sont spécifiques dans l'environnement physique et les données. Ils fournissent des informations en temps réel pour maximiser le rendement et l'optimisation de l'utilisation des ressources[15].

I.4.6 L'avantage des RCSF dans l'agriculture de précision

Le plus gros avantage des RCSF réside dans l'absence de besoin en câblage, ce qui facilite grandement le déploiement tout en réduisant la charge d'installation. De plus, les réseaux sans fil sont très modulaires et extrêmement faciles à faire évoluer. En outre, les SDCR sont plus pratiques à entretenir puisque chaque capteur est autonome. De plus, en ce qui concerne les capteurs SDCR, leur nécessité en maintenance perpétuel est faible, particulièrement si le protocole de communication est tolérant aux pannes et offre une mobilité des nœuds. En plus, l'objectif des RCSF n'est pas forcément de surveiller toute la journée, mais plutôt d'aider les paysans à ne pas gâcher de l'eau ou de l'engrais et gagner du temps, puisqu'ils peuvent le contrôler depuis leur bureau. Par exemple, s'il y a un manque d'irrigation et d'insuffisance d'eau, cela peut être détecté et corrigé de très loin de manière à pouvoir sauver les plantes. Chaque plante a en effet son propre retour hydrique :

certaines ont simplement besoin de sources d'eau proches, et certaines peuvent devenir de la biomasse si on les garde un peu trop humides.[17]

I.4.7 Conditions nécessaires des RCSF pour l'agriculture de précision

- **Sensibilité :** Détecter de petits changements dans l'humidité du sol.
- **Réactivité :** Surveillance continue et réponse rapide en temps réel.
- **Universalité** : Adaptabilité à différents types de cultures et stades de croissance.
- **Robustesse :** Résistance aux défaillances et fiabilité des données.
- **Évolutivité** : Facilité d'extension de petite à grande échelle.
- **Convivialité** : Interface intuitive et facile à utiliser.
- **Déclencheur actionné :** Détection et action automatique via capteurs et actionneurs.
- **Efficacité énergétique :** Alimentation par batterie ou récupération d'énergie.
- **Communication fiable :** Connexion stable sur de grandes distances (1 km).
- **Faible coût :** Solution économique, facile à déployer et à maintenir.

I.5 Conclusion

Pour conclure, la gestion de l'eau en agriculture est un défi essentiel à relever pour faire face aux enjeux environnementaux et climatiques d'aujourd'hui. L'irrigation intelligente est une innovation majeure qui associe la sensibilisation artificielle hydrométrique pour un usage minimal de l'eau. La collecte de données sur les éléments inorganiques à l'aide de capteurs, tels que ceux mesurant l'humidité du sol, la température, l'évapotranspiration et les prévisions météorologiques, permet d'évaluer les besoins en eau des cultures. Non seulement cette collecte des données améliore le rendement agricole, mais aussi limite les frais coûteux tout en sauvegardant les ressources naturelles. En mettant en œuvre des technologies nouvelles, l'agriculture devient encore plus performante tout en optimisant la gestion des ressources de manière durable et efficiente malgré les dérèglements climatiques sans cesse croissants.

Chapitre II :
L’intelligence artificielle et la méthode de logique floue.

II.1 Introduction

Pour concevoir un système d'irrigation intelligent capable de prendre des décisions adaptées aux conditions climatiques et aux besoins des plantes, il est essentiel d'intégrer des techniques d'intelligence artificielle (IA). Dans ce chapitre, nous présentons les bases de l'IA, du ML (Apprentissage Automatique) et du DL (Apprentissage profond), en mettant l'accent sur les réseaux de neurones artificiels (ANN) utilisés pour estimer l'évapotranspiration. Nous abordons également la logique floue, utilisée pour ajuster la quantité d'eau à irriguer. Ces outils nous permettent d'optimiser l'irrigation de manière autonome, précise et efficace.

II.2 L'Intelligence Artificielle

II.2.1 Définition

L'Intelligence Artificielle (IA) est un domaine de recherche qui cherche à développer des machines capables d'exécuter des tâches nécessitant normalement l'intelligence humaine, comme l'apprentissage automatique, la reconnaissance des formes, la résolution des problèmes et la prise de décision. Elle repose sur des algorithmes avancés et des modèles computationnels pour analyser des données et reproduire des comportements intelligents.

II.2.2 Domaines d'applications de l'intelligence artificielle

- **Santé**

  L'intelligence artificielle améliore le domaine médical à travers le diagnostic d'images, la médecine personnalisée et la robotique chirurgicale, rendant les soins plus précis et adaptés à chaque patient.

- **Finance & Banque**

  L'intelligence artificielle est largement utilisée dans le domaine financier. Elle permet la détection des fraudes en analysant les transactions suspectes, offre des conseils automatisés via les robo-advisors, et facilite l'évaluation des risques

- **Transport & Mobilité**

  L'intelligence artificielle transforme le secteur des transports grâce aux véhicules autonomes (voitures, drones, navires), à l'optimisation du trafic via des systèmes intelligents de gestion, et à l'amélioration de la logistique

- **Industrie**

  Dans le secteur industriel, l'intelligence artificielle permet la maintenance prédictive en anticipant les pannes, renforce l'automatisation grâce à la robotique

industrielle, et améliore le contrôle qualité en détectant les défauts via la vision par ordinateur.

- **Agriculture (Agronomie)**

L'intelligence artificielle joue un rôle essentiel dans l'agriculture de précision, en optimisant l'irrigation et l'utilisation des engrais. Elle permet aussi la surveillance des cultures à l'aide de drones et d'algorithmes capables de détecter maladies et anomalies, ainsi que la prédiction des rendements agricoles grâce à l'analyse des données climatiques et des sols.

- **Éducation**

Dans le domaine de l'éducation, l'intelligence artificielle permet le développement de tuteurs intelligents à travers des plateformes d'apprentissage adaptatif. Elle facilite la correction automatisée des évaluations et offre une personnalisation des parcours en recommandant des contenus pédagogiques adaptés aux besoins de chaque apprenant.

- **Sécurité & Défense**

L'intelligence artificielle est largement utilisée dans le domaine de la sécurité et de la défense. Elle permet la reconnaissance faciale pour l'authentification et la sécurité publique, renforce la cybersécurité en détectant les intrusions et attaques, et est intégrée dans les drones militaires pour réaliser des missions de surveillance autonomes.

II.2.3 Spécificités d'applications de l'IA

Le domaine de l'intelligence artificielle contient plusieurs branches, ci-dessous :

- **Apprentissage Automatique (Machine Learning):** permet aux machines d'apprendre automatiquement à partir des données sans être explicitement programmées.[18]
- **Traitement automatique du langage naturel (NLP) :** Le traitement automatique du langage naturel permet aux machines de comprendre, analyser et générer du langage humain.
- **Reconnaissance Vocale (Speech) :** traite la conversion entre la voix et le texte, permettant aux systèmes de comprendre ou de produire la parole humaine**.**
- **Systèmes Experts : Systèmes** imitant la capacité de décision d'un expert humain dans un domaine spécifique en utilisant des règles logiques.
- **Planification, ordonnancement et optimisation :** Utilisé pour résoudre des problèmes complexes de planification et d'optimisation dans des systèmes industriels ou agricoles.

- **Robotique (Robotics) :** L'IA dans la robotique permet aux robots d'interagir intelligemment avec leur environnement pour accomplir des tâches variées.
- **Vision :** Inclut la reconnaissance d'image et la vision par ordinateur, permettant aux machines d'interpréter des images ou des vidéos. Voici le schémas global :

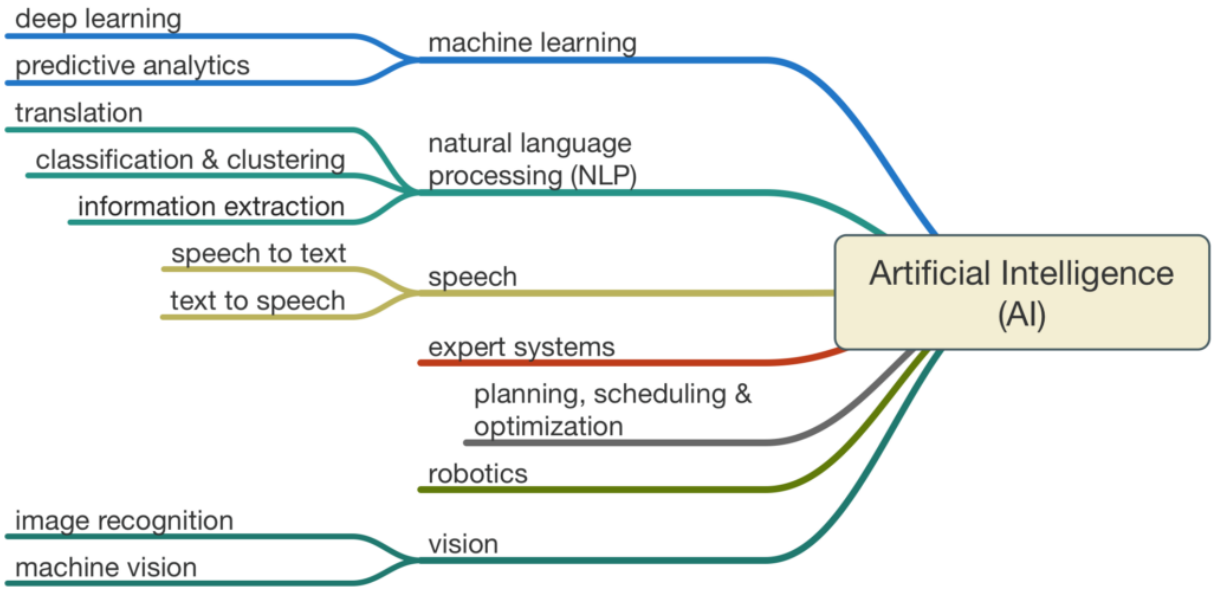


Figure II-1: Différents domaines de l'IA.

II.3 Apprentissage Automatique (Machine Learning) :

L'apprentissage automatique (Machine Learning), est une branche de l'intelligence artificielle (IA) qui rend possible l'évolution des ordinateurs grâce à leur apprentissage sans être explicitement programmés. Elle se base sur le développement des programmes informatiques permettant aux machines d'acquérir de nouvelles connaissances et d'être plus performantes au maximum. En d'autres termes, la machine ou l'ordinateur devient capable de résoudre des problèmes compliqués en faisant face à de grandes quantités d'informations. Par ailleurs, cela aboutirait à analyser et de découvrir les corrélations et les réticulations existantes entre deux ou plusieurs situations données afin de prévoir les différentes issues. Les algorithmes ne sont pas fermés à certaines évolutions.[19]

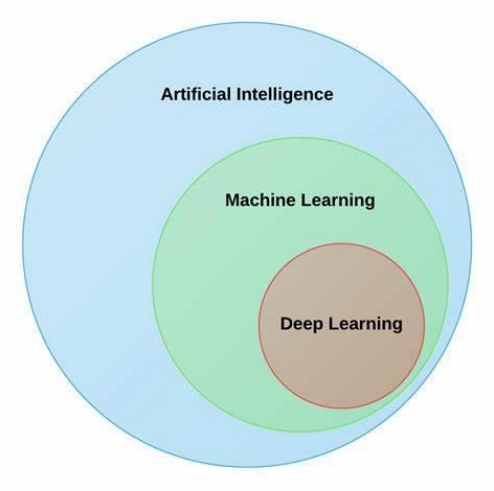


Figure II-2: Structure de l'IA.

II.3.1 Méthodes d'apprentissage automatique (machine Learning)

Le ML est divisé en trois méthodes principales : l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement, comme le montre la figure suivante.

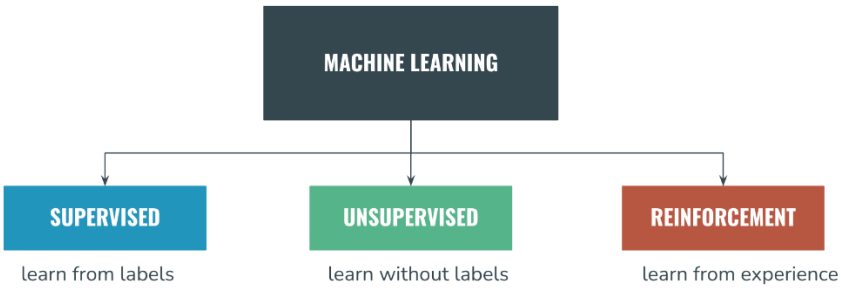


Figure II-3: Branches d'apprentissage automatique.

II.3.1.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé consiste en l'utilisation d'un ensemble de données pour prédire des événements futurs statistiquement probables. Autrement dit, un modèle de prédiction est formé pour identifier les caractéristiques d'un vecteur prévu dérivant d'un autre déjà prévu. De cette manière sont inclus, les modèles de la ML qui effectuent des applications de « prédiction » ou de « classification ». Ces derniers sont généralement conçus pour un certain objectif et quel que soit l'objectif, il existe deux types de problèmes pour l'apprentissage supervisé [20]:

II.3.1.1.1 Classification

Cette méthode consiste à attribuer une étiquette ou une catégorie à un élément donné en fonction de ses caractéristiques. L'objectif est de prédire la classe à laquelle un nouvel exemple appartient en se basant sur des exemples préalablement étiquetés.[21]

- **Classification binaire**

Dans le cas où les étiquettes sont binaires, elles indiquent l'appartenance à l'une des deux classes possibles. On parle alors de classification binaire.[22]

Exemple

Le modèle prédit si une plante est "saine" ou "malade".

- **Classification multi-classe**

Dans le cas où les étiquettes sont discrètes et correspondent à plus de deux classes, on parle de classification multi-classe[22]. (Par exemple, classer des images de fruits en catégories telles que pomme, orange, banane et poire) .

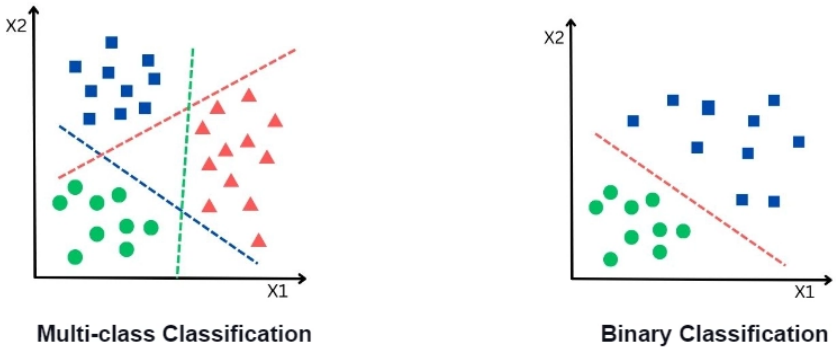


Figure II-4: Différentes méthodes de classification.

II.3.1.1.2 Régression

En mathématiques, la régression recouvre plusieurs méthodes d'analyse statistique permettant d'approcher une variable à partir d'autres éléments qui lui sont corrélés. Par extension, le terme est aussi utilisé pour certaines méthodes d'ajustement de courbes.[23]

- **Régression linéaire**

La régression linéaire est une technique d'analyse de données qui prédit la valeur de données inconnues en utilisant une autre valeur de données apparentée et connue. Il modélise mathématiquement la variable inconnue ou dépendante et la variable connue ou indépendante sous forme d'équation linéaire**.**[24]

- **Régression logistique**

La régression logistique est un modèle statistique permettant d'étudier les relations entre un ensemble de variables qualitatives X i et une variable qualitative Yi. Il s'agit d'un modèle linéaire généralisé utilisant une fonction logistique comme fonction de lien.[25]

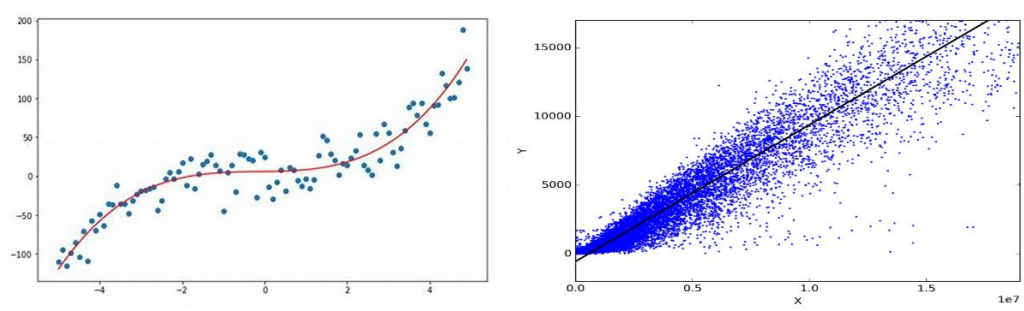


Figure II-5: Différentes méthodes de régression

II.3.1.2 Apprentissage non supervisé

On dit que l'apprentissage est non supervisé lorsqu'on ne connaît pas les valeurs en sortie et que l'algorithme doit travailler sur l'ensemble des aspects X où il doit reconnaître les structures communes entre ces derniers pour prédire la cible Y. Dans l'apprentissage non supervisé, l'agent apprend des structures dans les données d'entrée, même s'il ne dispose pas de feedback explicite sur ses actions.[22]

II.3.1.2.1 Clustering

Le clustering, ou regroupement, est une technique d'analyse de données qui consiste à regrouper des ensembles d'objets similaires. L'objectif principal est de segmenter un ensemble de données en sous-groupes appelés clusters, où les objets au sein d'un même cluster partagent des caractéristiques communes comme l'illustre la figure suivante[26]

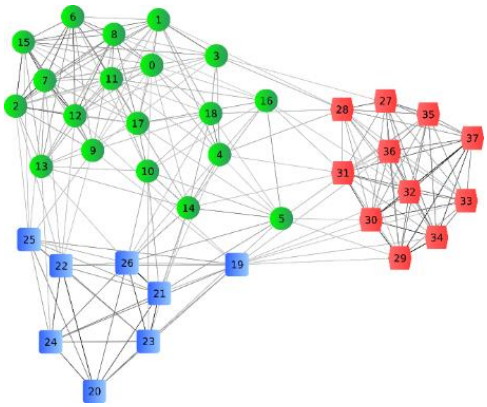


Figure II-6: Méthode de Clustering

II.3.1.3 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement consiste à apprendre à agir par essais et erreurs. Dans ce paradigme, un agent perçoit son état et effectue des actions. Après chaque action, une récompense numérique est attribuée. L'objectif de l'agent est de maximiser la récompense totale qu'il reçoit au fil du temps.[27]

II.4 Apprentissage profond (Deep Learning)

Apprentissage profond peut être décrit comme un sous-domaine de l'apprentissage automatique basé sur des algorithmes tirés de l'apprentissage multi-niveaux afin de fournir un modèle qui représente les relations complexes entre les données et permettre à la machine d'apprendre par elle-même a entrainer un réseau de neurones. Il est essentiellement le point, d'intersection entre réseaux de neurones, modélisation graphique, optimisation, intelligence artificielle, reconnaissance de formes ainsi que traitement du signal.[28]

II.4.1 Pourquoi l'apprentissage profond ?

Les algorithmes d'apprentissage profond sont des algorithmes d'apprentissage automatique. Par conséquent, il serait peut-être préférable de réfléchir à ce qui rend l'apprentissage profond spécifique dans le domaine de l'apprentissage automatique.

La réponse : la structure de l'algorithme ANN permet un moindre besoin d'intervention humaine et les exigences de données plus importantes. Les algorithmes d'apprentissage automatique traditionnels ont une structure plutôt simple, telle que la régression linéaire ou un arbre de décision, l'apprentissage en profondeur est basé sur un réseau de neurones artificiels.

Ce ANN multicouche est, comme un cerveau humain, complexe et entrelacé. Les algorithmes d'apprentissage en profondeur nécessitent beaucoup moins d'intervention humaine. Si la reconnaissance d'image du signe STOP était un algorithme d'apprentissage automatique plus traditionnel, un ingénieur logiciel choisirait manuellement les fonctionnalités et un classificateur pour trier les images. Il vérifierait si la sortie est conforme aux besoins et ajusterait l'algorithme si ce n'est pas le cas. Ce système d'apprentissage extrait les fonctionnalités automatiquement et l'algorithme apprend de ses propres erreurs[28].La figure II-7 représente la différence entre le (ML) et le (DL**).**

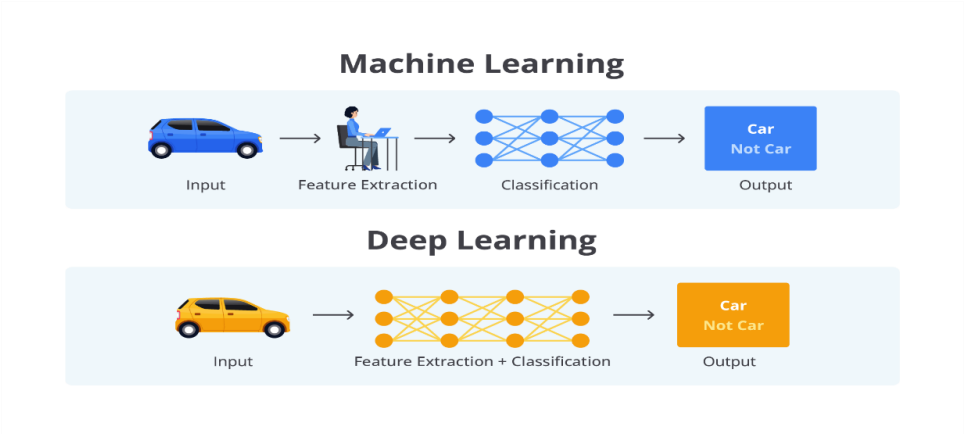


Figure II-7: Comparaison entre ML et DL.

II.4.2 Le réseau neuronal

Ce qui forme les réseaux de neurones, ce sont les neurones artificiels inspirés de vraies neurones qui existent dans notre cerveau. Les 2 figures suivantes montrent une représentation d'un neurone réel et d'un neurone artificiel.

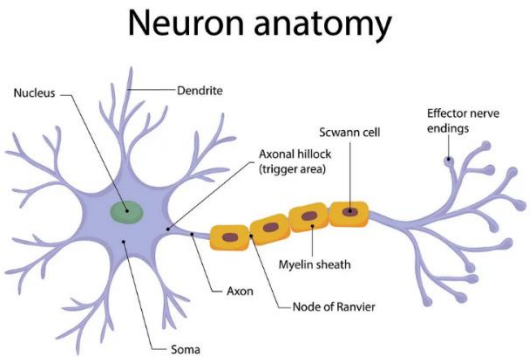


Figure II-8: Anatomie d'un neurone.

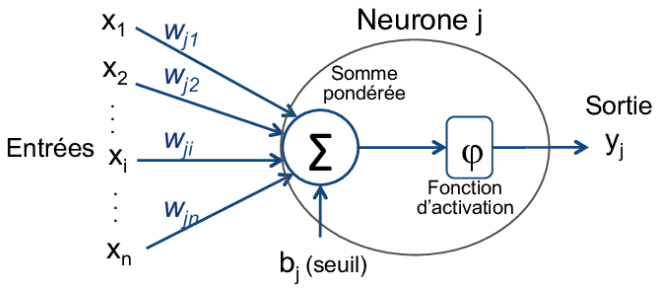


Figure II-9: Représentation réseau neuronal.

Les Xi sont des valeurs numériques qui représentent soit des données d'entrée, soit des valeurs de sorties d'autres neurones. Les poids Wi sont des valeurs numériques qui représentent soit la valeur de puissance des entrées, soit la valeur de puissance des connexions entre les neurones. Il existe des opérations qui se passent au niveau du neurone

artificiel. Le neurone artificiel fera un produit entre le poids (w) et la valeur d'entrée (x), puis ajoute les valeurs de biais (b), le résultat est transmis à une fonction d'activation (f) qui ajoutera une certaine non-linéarité.

II.4.3 Les différents types de réseau neuronal

Bien qu'il existe un grand nombre de variantes d'architectures profondes. Il n'est pas toujours possible de comparer les performances de toutes les architectures, car elles ne sont pas toutes évaluées sur les mêmes ensembles de données. Le DL est un domaine à croissance rapide, de nouvelles architectures, variantes ou algorithmes apparaissant toutes les semaines.

II.4.3.1 Les réseaux de neurones artificiels (ANN) :

Ce sont les plus simples et sont souvent utilisés car ils trient bien les informations. Le premier exemple d'un réseau neuronal a été appelé le perceptron, qui a été inventé par Frank Rosenblatt en 1957. Le perceptron est un réseau composé seulement d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie. Dans le cas des classifications binaires, la couche de sortie n'a qu'un seul neurone ou unité. Le perceptron a semblé très prometteur dès le début, bien qu'il ait rapidement compris qu'il ne pouvait apprendre que des motifs linéairement séparables. Par exemple, Marvin Minsky et Seymour Papert ont montré qu'ils ne pouvaient pas apprendre la fonction logique XOR. Dans ses représentations les plus basiques, les perceptrons ne sont que de simples représentations d'un neurone et son entrée (entrée qui peut être composée de plusieurs neurones). Etant donné les différentes entrées dans un neurone, nous définissons une valeur d'activation par la formule ($a(x) = \sum wi\ xi$) où xi est la valeur pour le neurone d'entrée, tandis que wi est la valeur de la connexion entre le neurone i et la sortie. Si la valeur d'activation, qui devrait être considérée comme l'état interne du neurone, est supérieure à un seuil fixe b, alors le neurone s'activera, c'est-à-dire qu'il se déclenchera, sinon ce ne sera pas le cas[29].

II.4.3.1.1 Fonction d'Activation

Dans le domaine des réseaux de neurones artificiels, la fonction d'activation est une fonction mathématique appliquée à un signal en sortie d'un neurone artificiel, c'est l'une des plus importantes taches dans ce domaine. Le terme de "fonction d'activation" vient de l'équivalent biologique "potentiel d'activation", seuil de stimulation qui, une fois atteint entraîne une réponse du neurone. La fonction d'activation est souvent une fonction non-linéaire. Sans une fonction d'activation, un réseau de neurones est juste un modèle de régression linéaire. Un exemple de fonction d'activation est la fonction de Heaviside, qui renvoie tout le temps 1 si le signal en entrée est positif, ou 0 s'il est négatif. Il existe plusieurs

types de fonctions parmi lesquelles nous trouvons :[30]

- **Fonction d'activation sigmoïde**

La fonction d'activation sigmoïde, souvent représentée par σ(x), est une fonction lisse et continuellement différentiable, historiquement importante dans le développement des réseaux neuronaux. La fonction d'activation sigmoïde a la forme mathématique suivante :

$$\sigma(x) = \frac{\sigma(x)\ 1}{(1\ +\ e^{-x})} \qquad \textbf{Eq II-1}$$

La représentation de cette fonction est illustrée dans la figure suivante :

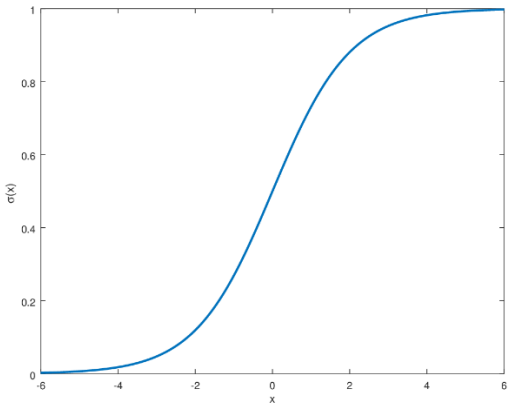


Figure II-10: Fonction d'activation sigmoïde.

Il prend une valeur réelle en entrée et la réduit à une valeur comprise entre 0 et 1. La fonction sigmoïde a une courbe en forme de "S" qui asymptote à 0 pour les grands nombres négatifs et à 1 pour les grands nombres positifs. Les résultats peuvent être facilement interprétés comme des probabilités, ce qui les rend naturels pour les problèmes de classification binaire[31].

- **Fonction Activation du Tanh**

La fonction Tanh est également appelée "tangente hyperbolique". Cette fonction ressemble à la fonction Sigmoïde. La différence avec la fonction Sigmoïde est que la fonction Tanh produit un résultat compris entre -1 et 1. La fonction Tanh est en terme général préférable à la fonction Sigmoïde car elle est centrée sur zéro. Les grandes entrées négatives tendent vers -1 et les grandes entrées positives tendent vers 1[30], [32]

$$F(z) = \frac{e^{z} - e^{-z}}{e^{z} + e^{-z}} \qquad \textbf{Eq II-2}$$

La représentation de cette fonction est illustrée dans la figure suivante :

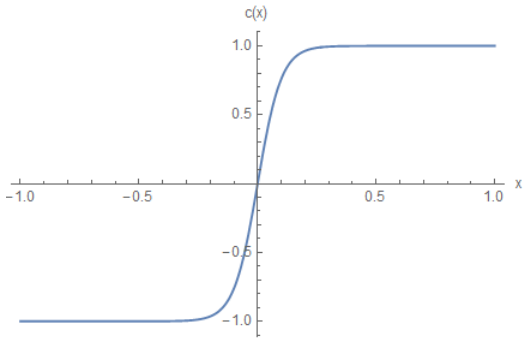


Figure II-11: Fonction Activation du Tanh.

- **L'activation de ReLU**

La fonction ReLU produit le maximum entre son entrée et zéro, comme le montre le graphique. Pour les entrées positives, la sortie de la fonction est égale à l'entrée. Pour les sorties strictement négatives, la sortie de la fonction est égale à zéro[33].

$$Fonction\ (X)\ =\ max\ (0, X) \qquad \textbf{Eq II-3}$$

La représentation de cette fonction est illustrée dans la figure suivante :

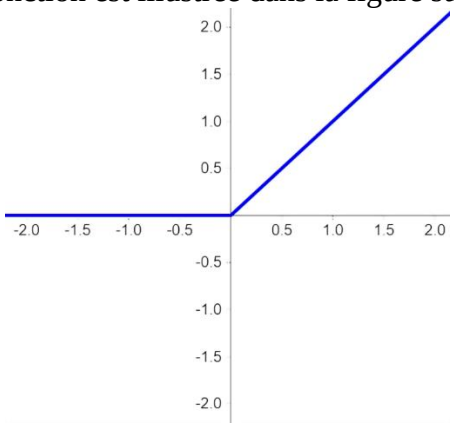


Figure II-12: Fonction Activation du Relu

- **Fonction Softmax**

La fonction Softmax est une fonction mathématique qui transforme un vecteur de scores bruts en probabilités. Elle est largement utilisée dans Apprentissage Automatique ML, en particulier dans les tâches de classification, où elle permet d'interpréter la sortie d'un modèle sous forme de S est égale à un, ce qui la rend adaptée aux problèmes de classification multi-classes.[34]

$$F_i(z) = \frac{e^{z_i}}{\sum_{k=1}^{k} e^{z_k}} \text{ Pour tout } i\ \epsilon\ \{1, \dots., K\} \qquad \textbf{Eq II-4}$$

II.4.3.1.2 Architecture des réseaux neurones artificiels

Chaque réseau de neurones est constitué de neurones artificiels qui reçoivent des

entrées et produisent une sortie. De manière générale, un réseau de neurones est structuré en plusieurs couches : une couche d'entrée qui reçoit les données brutes, une ou plusieurs couches cachées où se fait le traitement de l'information, et une couche de sortie qui fournit le résultat final comme l'illustre dans la figure suivante :

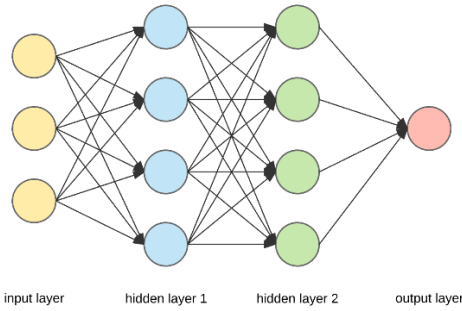


Figure II-13: Architecture des réseaux neurones artificiels

II.4.3.1.3 Types d'architectures de réseaux :

- **Réseaux à une couche (feed forward)**

Dans cette forme simple de réseau en couches, nous avons des nœuds d'entrée et une couche de neurones (couche de sortie). Le signal se propage dans le réseau de manière linéaire, en commençant par la couche d'entrée et en se terminant par la couche de sortie. Il n'y a pas de connexions qui reviennent et pas de connexions transversales dans la couche de sortie comme l'illustre dans la figure suivante :

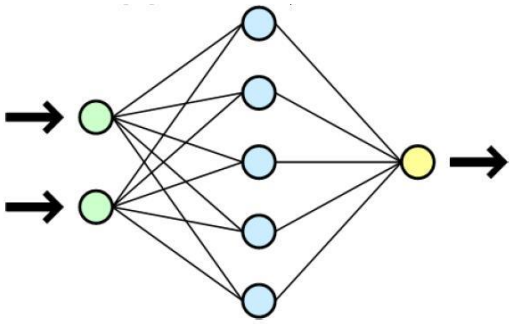


Figure II-14: Réseaux à une couche.

- **Réseaux multi couches (feed forward)**

Cette classe de réseaux feed-forward diffère de la précédente car elle a une ou plusieurs couches de neurones cachés (couches cachées) entre les couches d'entrée et de sortie. Chaque couche à des connexions entrantes de la couche précédente et sortantes dans la suivante, donc la propagation du signal se fait de façon linéaire sans cycles et sans connexions transversales. Ce type d'architecture fournit au réseau une perspective globale car il augmente les interactions entre les neurones. Ce réseau est représenté dans la figure

suivante :

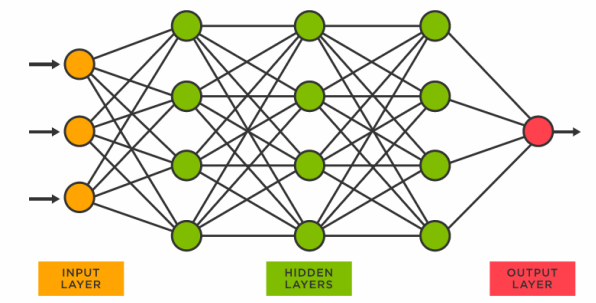


Figure II-15: Réseaux multi couches.

- **Réseaux récurrents (feed-back)**

Un réseau récurrent diffère des précédents par le fait qu'il est cyclique. La présence de cycles à un impact profond sur les capacités d'apprentissage du réseau et sur ses performances, notamment rendre le système dynamique.

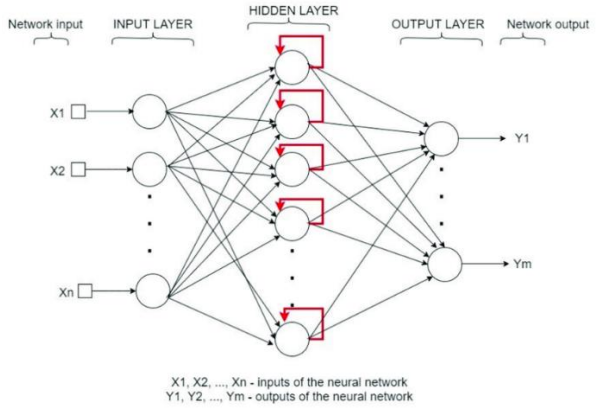


Figure II-16: Réseaux récurrents.

II.4.3.2 Les réseaux convolution

Un réseau neuronal convolutif (CNN), également appelé ConvNet, est un type spécialisé d'algorithme d'apprentissage profond principalement conçu pour les tâches qui nécessitent la reconnaissance d'objets, notamment la classification, la détection et la segmentation d'images[31].

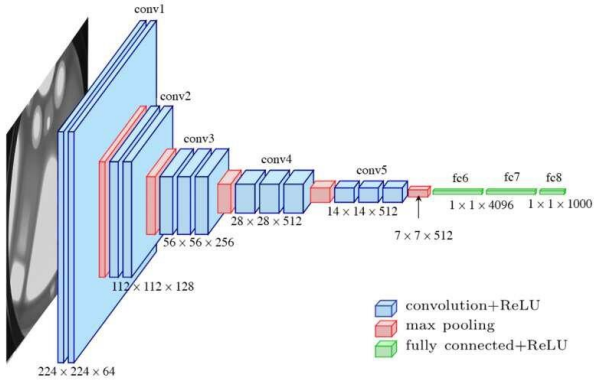


Figure II-17: Processus réseau convolution.

II.4.3.2.1 Applications pratiques des CNN

- **Classification des images :** Les réseaux neuronaux convolutionnels sont utilisés pour la catégorisation des images, qui sont classées dans des catégories prédéfinies. L'organisation automatique des photos sur les plateformes de médias sociaux est l'une des applications d'un tel scénario.
- **Détection d'objets :** Les CNN sont capables d'identifier et de localiser plusieurs objets dans une image. Cette capacité est cruciale dans de nombreux scénarios de balayage des rayons dans le commerce de détail pour identifier les articles en rupture de stock.
- **Reconnaissance faciale :** il s'agit également de l'un des principaux secteurs d'application des CNN. Par exemple, cette technologie peut être intégrée dans des systèmes de sécurité pour un contrôle d'accès efficace basé sur les caractéristiques faciales.

II.4.3.3 Réseau de neurones récurrents

Ce réseau est un modèle d'apprentissage automatique puissant qui permet d'analyser des séquences de données, telles que du texte, de la parole ou des séries temporelles. Ces réseaux permettent aux machines de « se souvenir » des informations passées et de les utiliser pour prendre des décisions en temps réel[35].

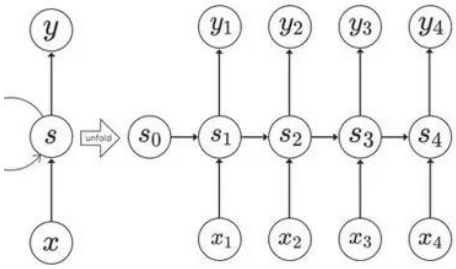


Figure II-18: Représentation Réseau de neurones récurrents.

II.4.3.4 Les reseaux Long Short-Term Memory (LSTM):

Les réseaux Long Short-Term Memory généralement appelés simplement « LSTM » sont un type spécial de RNN, capable d'apprendre les dépendances à long terme. Ils ont été introduits par Hochreiter & Schmidhuber (1997)[36].

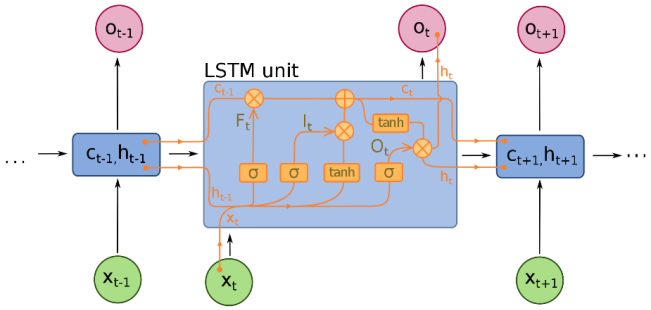


Figure II-19: Représentation réseau Long Short-Terme Memory.

II.5 Méthodes d'évaluation des réseaux IA

II.5.1 Erreur Quadratique Moyenne (MSE)

MSE est l'une des méthodes d'évaluation les plus courantes dans les modèles de régression. Elle mesure la moyenne des carrés des erreurs entre les valeurs réelles et les valeurs prédites.

$$MSE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - y'_i)^2 \qquad \textbf{Eq II-5}$$

- y_i : valeur réelle.
- y'_i : valeur prédite par le modèle.
- n : nombre d'échantillons.

II.5.2 Erreur Absolue Moyenne (MAE)

L'erreur absolue moyenne (MAE) mesure la moyenne des différences absolues entre les valeurs réelles et les valeurs prédites.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|y_i - y'_i| \qquad \textbf{Eq II-6}$$

II.5.3 Coefficient de Détermination (R^2)

Le R^2 mesure la proportion de la variance dans la variable dépendante qui est expliquée par le modèle.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y'_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - y''_i)^2} \qquad \textbf{Eq II-7}$$

- yi'' : moyenne des valeurs réelles.

II.5.4 Erreur Relative Absolue (RAE)

RAE est similaire à la MAE, mais elle est normalisée par rapport à l'erreur d'un modèle de référence, souvent la moyenne des valeurs réelles.

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}|y_i - y'_i|}{\sum_{i=1}^{n}|y_i - y''_i|} \qquad \textbf{Eq II-8}$$

II.6 Logique floue

II.6.1 Définition

C'est une logique polyvalente où les valeurs de vérité des variables, au lieu d'être vrai ou faux, sont des réels entre 0 et 1. En ce sens, elle étend la logique booléenne classique avec des valeurs de vérité partielles, c'est-à-dire situées entre les valeurs booléennes vrai et faux, qui consiste à tenir compte de divers facteurs numériques pour aboutir à une conclusion qu'on souhaite raisonnable. [21]

II.6.2 Système floue :

Un système flou est décrit par un ensemble de règles de type "**Si** (condition) **Alors** (action)" permettant de convertir la stratégie variable linguistique acquise auprès d'un expert humain en une stratégie de système automatique bien adaptée au monde réel. Le schéma synoptique général d'un système flou est illustré par la figure. Quel que soit le type d'application du système, on retrouve généralement la même configuration répartie en quatre blocs principaux à savoir :

La fuzzification des entrées, une base de règles, un mécanisme d'inférence, et la défuzzification pour produire une sortie claire à partir d'informations floues.

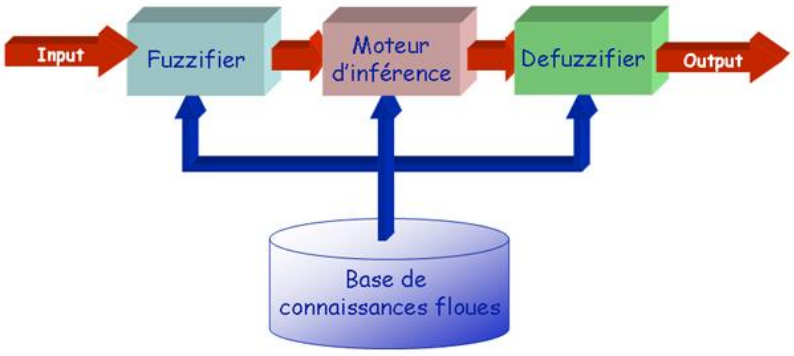


Figure II-20: Définition système logique floue.

II.6.2.1 Fuzzification

Dans cette étape l'ensemble classique avec des données d'entrée scalaires est transformée en un ensemble flou correspondant, c'est le processus dans lequel le concepteur définit ou détermine les degrés d'appartenance pour chacune des variables d'entrées.

A Chaque entrée réelle est attribuée un terme linguistique dans l'univers du discours. Par exemple, pour le paramètre d'entrée « hauteur », les termes flous peuvent être « grand », « court », « normal », « très grand » et « très court ». Chaque entrée réelle peut être attribuée plusieurs étiquettes. Lorsque le nombre d'étiquettes augmente, la résolution du processus est meilleure. Dans certains cas, l'attribution d'un grand nombre d'étiquettes conduit à un temps de calcul important et rend ainsi le système flou instable. Par conséquent, en général, le nombre d'étiquettes pour un système est limité à un nombre impair dans la plage[37], [38], [39],de sorte que la surface est équilibrée et symétrique.

La plage de la valeur d'entrée qui correspond à une étiquette spécifique peut être identifiée par une fonction d'appartenance. Pour illustrer ce processus, supposons que la variable d'entrée, qui peut être l'angle d'oscillation du pendule inversé, est une variable linguistique et que sa plage autrement dit, l'univers du discours est [-a , a]. Supposons en outre que les sept valeurs linguistiques suivantes (étiquettes floues) soient sélectionnées[39].

NG ---négatif grand NM ---négatif moyen NP ---négatif petit

PM --- positif moyen PP --- positif petit EZ --- environ zéro

Cet exemple est illustré dans cette Figure :

Remarque : Les formes n'ont pas besoin d'être symétriques et n'ont pas besoin d'être également réparties sur les plages données

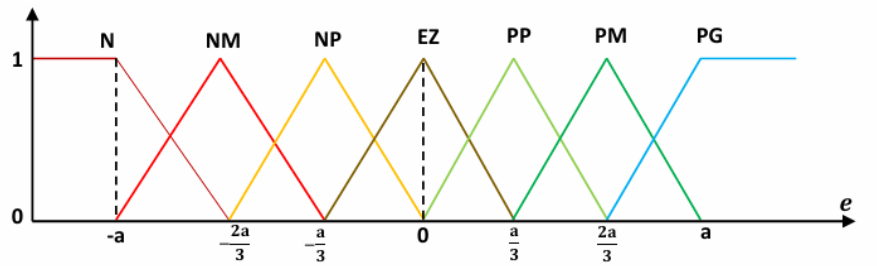


Figure II-21: Représentation des différentes classes.

II.6.2.1.1 Règles et opérateurs flous

Pour toute opération de logique floue, la sortie est obtenue à partir de l'entrée réelle par le processus de fuzzification et de défuzzification. Ces processus impliquent l'utilisation de règles, qui forment la base pour obtenir la sortie floue. Une règle floue IF-THEN,

également appelée instruction conditionnelle floue ou implication floue, [37].

II.6.3 Inférences floues

La procédure d'inférence reçoit comme entrées les variables d'entrée floues et un ensemble de règles pour calculer leurs dégrées de vérité, et la sortie de cette étape est une variable floue. Les méthodes d'inférence floue couramment utilisées sont la méthode d'inférence de Mamdani, la méthode de Takagi-Sugeno (TS) et celle de Tsukamoto. Toutes ces méthodes se ressemblent mais ne diffèrent que par leurs conséquents. La méthode d'inférence floue Mamdani utilise des ensembles flous comme conséquence de la règle, tandis que la méthode TS utilise des fonctions de variables d'entrée et la méthode d'inférence Tsukamoto utilise un ensemble flou avec une fonction d'appartenance monotone comme conséquence de la règle[37].

II.6.3.1 Modèle de Mamdani

Cette méthode couramment utilisée en raison de sa structure simple min-max. Le modèle a été proposé par Mamdani en 1975. Cette inférence floue a d'abord été introduite comme méthode pour créer un système de contrôle en synthétisant un ensemble de règles de contrôle linguistique obtenues auprès d'opérateurs humains expérimentés[39].

II.6.3.1.1 Méthode d'inférence Min-Max

La méthode Min-Max se décompose en deux étapes distinctes. Dans un premier temps, pour chaque règle activée, on retient la valeur minimale des degrés d'appartenance des conditions (partie antécédente), ce qui reflète le niveau d'activation de la règle. Ensuite, lorsque plusieurs règles conduisent à une même conclusion (même conséquence), on conserve le maximum des degrés d'appartenance associés à cette sortie, traduisant ainsi l'effet global de toutes les règles concernées. Cette approche permet de représenter de manière cohérente l'influence cumulative des règles sur la sortie floue du système comme l'illustre dans la figure suivante :

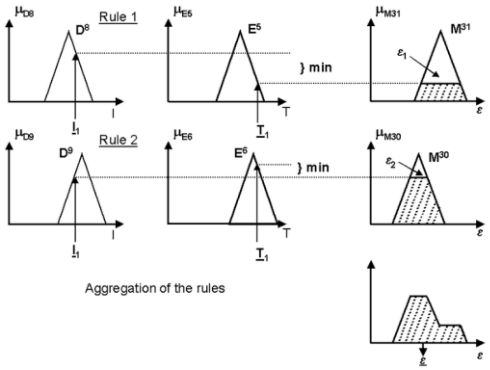


Figure II-22: Méthode d'application d'inférence Min-Max.

II.6.4 Défuzzification

La défuzzification est l'étape finale d'un système d'inférence floue. Elle consiste à convertir une valeur floue, généralement représentée par une fonction d'appartenance, en une valeur numérique nette utilisable par un système réel ou un actionneur. Plusieurs méthodes sont utilisées à cette fin, chacune ayant ses avantages et contraintes selon le contexte d'application.

II.6.4.1 Méthode du centre de gravité (COG)

Également appelée méthode du centroïde, c'est la plus utilisée. Elle consiste à calculer le centre de masse de la surface définie par la fonction d'appartenance agrégée. Mathématiquement, cela revient à :

$$z^* = \frac{\int z\, u(z) dz}{\int u(z) dz} \qquad \textbf{Eq II-9}$$

μ(z) est la fonction d'appartenance agrégée et z* la valeur défuzzifiée. Cette méthode offre une grande précision, mais elle peut être lourde en calculs si les fonctions sont complexes. La figure II-23 montre la représentation de la méthode COG

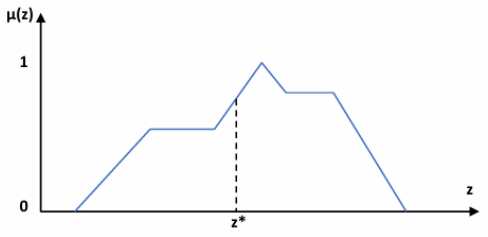


Figure II-23: Méthode du centre de gravité.

II.6.4.2 Méthode de la moyenne pondérée

Elle s'applique lorsque les fonctions d'appartenance sont symétriques et distinctes. Elle calcule la moyenne pondérée des sommets de chaque fonction d'appartenance activée selon

leur degré d'activation. Elle est moins exigeante en ressources que la méthode COG et donne des résultats comparables lorsque les conditions sont réunies. La figure II-24 montre la représentation de la méthode de la moyenne pondérée.

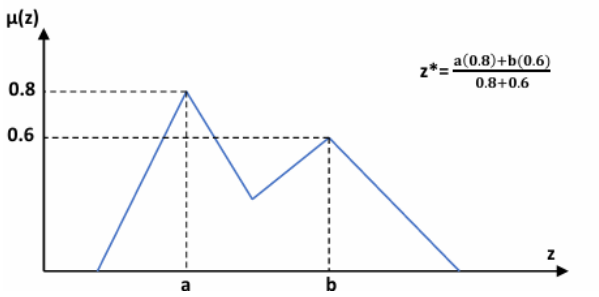


Figure II-24: Méthode de la moyenne pondérée.

II.6.4.3 Principe d'adhésion maximale (Max Membership Principle)

Également appelée méthode de la hauteur, cette méthode choisit la valeur de sortie ayant le degré d'appartenance maximal. Elle est très rapide et simple à mettre en œuvre, mais moins précise si la fonction d'appartenance comporte plusieurs sommets ou est asymétrique comme l'illustre la figure suivante :

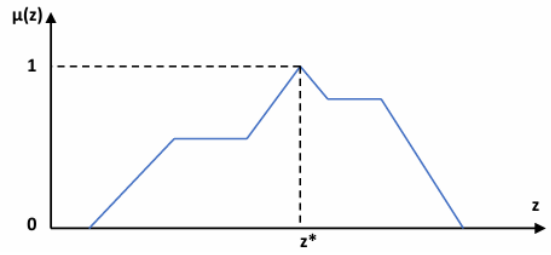


Figure II-25: Principe d'adhésion maximale.

II.6.4.4 Centre des sommes

Cette méthode calcule le centre de masse de la somme des fonctions d'appartenance, et non leur union. Elle est utile dans certains cas particuliers, mais elle peut conduire à des résultats biaisés si les fonctions se superposent fortement.

II.6.4.5 Centre de la plus grande zone

Elle consiste à choisir le centre de la région floue la plus large. Elle est utile pour privilégier la stabilité dans le choix de la sortie, surtout dans des environnements incertains.

II.6.5 Fonctions d'appartenance

Les fonctions d'appartenance sont un concept central en logique floue. Elles servent à définir à quel degré un élément appartient à un ensemble flou. Contrairement à la logique classique (où un élément appartient totalement ou pas du tout à un ensemble), en logique floue, l'appartenance est graduelle, entre 0 et 1.

II.6.5.1 Types de fonctions d'appartenance

II.6.5.1.1 Fonction triangulaire

Les fonctions d'appartenance sont définies par un ensemble de paramètres. Les fonctions les plus couramment cités dans la littérature sont :

$$u_{triangulaire}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b \le x \le c \\ 0 & allieur \end{cases} \qquad \textbf{Eq II-10}$$

II.6.5.1.2 Fonctions trapézoïdales

La fonction d'appartenance trapézoïdale peut être définie par quatre paramètres {a,b,c,d}, qui divisent l'espace en quatre comportements :

$$u_{trapéziodales}(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & a \le x \le b \\ 1 & b \le x \le c \\ \dfrac{c-x}{c-b} & c \le x \le d \\ 0 & allieur \end{cases} \qquad \textbf{Eq II-11}$$

II.6.5.1.3 Fonction gaussienne

$$u_{gaussien}(x) = e^{\left(\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)} \qquad \textbf{Eq II-12}$$

Nous Avon regrouper les trois représentations dans la figure suivante.

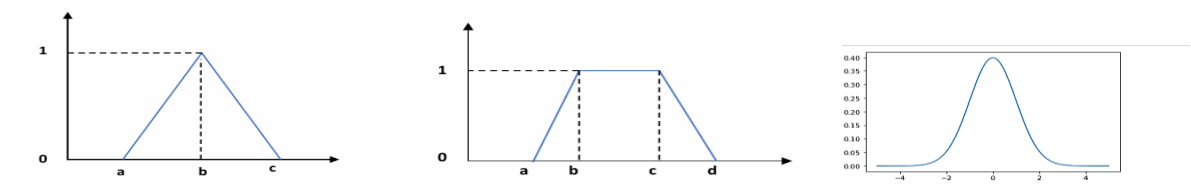


Figure II-26: Différents Types de fonctions d'appartenance.

II.6.6 Opérateurs de la logique floue

Dans un système flou, les fonctions d'appartenance permettent de quantifier des notions vagues comme "froid" ou "vent fort". Pour prendre une décision, comme fermer la porte, on doit combiner plusieurs conditions floues à l'aide des opérations logiques :

- ET : L'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la formation du minimum (intersection) des deux fonctions d'appartenance.

$$\mu c(z) = \mu A \textbf{ et } B(z) = \min (\mu A(x), \mu B(y) \qquad \textbf{Eq II-13}$$

- OU : En général, l'opérateur OU est réalisé par la formation du maximum des deux fonctions d'appartenance.

$$\mu c(z) = \mu A \textbf{ ou } B(z) = \max (\mu A(x), \mu B(y)) \qquad \textbf{Eq II-14}$$

- NON : Cet opérateur est commutatif, associatif, admet **1** comme élément absorbant et **0** comme élément neutre.

Ces opérations permettent de composer plusieurs prédicats flous et d'évaluer des règles comme :"Si l'air est froid ET le vent est fort", alors on agit. Cela permet de raisonner avec de l'information imprécise de manière progressive et réaliste.

II.6.7 Pourquoi on utilise logique floue dans notre projet

Dans le domaine agronomique, les données environnementales telles que la température, l'humidité, la force du vent ou les besoins hydriques des cultures sont souvent imprécises ou difficilement quantifiables de manière exacte. Pour cette raison, nous avons recours à la logique floue, qui permet de modéliser des notions vagues comme "sol sec", "plante stressée" ou "chaleur modérée". Contrairement à la logique classique, la logique floue accepte les degrés d'appartenance entre **0** et **1**, ce qui permet de prendre des décisions progressives et plus réalistes dans un contexte agricole. Dans le cadre de notre projet, elle est utilisée pour déterminer la quantité d'eau à fournir aux plantes en fonction de plusieurs facteurs (température, humidité du sol, stade de croissance, etc.), et cela même lorsque les données sont partielles ou incertaines. Cela permet une irrigation plus intelligente, économe en ressources et mieux adaptée aux conditions réelles du terrain.

II.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases théoriques nécessaires à la compréhension et à l'implémentation des outils d'intelligence artificielle dans notre projet d'irrigation intelligente. Nous avons exploré les principes de l'intelligence artificielle, du ML et du DL, avec un accent particulier sur les réseaux de neurones artificiels utilisés pour l'estimation de l'évapotranspiration. Par ailleurs, la logique floue s'est révélée être un outil puissant pour traduire les connaissances d'experts en règles linguistiques et prendre des décisions dans des environnements incertains, comme c'est souvent le cas en agriculture. L'intégration de ces techniques permet de concevoir un système d'irrigation autonome, adaptatif et optimisé, capable de répondre aux besoins réels des cultures tout en économisant les ressources hydriques.

Chapitre III : Conception et analyse du système.

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillons la réalisation du système d'irrigation intelligent proposé, en présentant les différentes étapes de sa conception et en analysant les résultats obtenus. L'objectif principal de ce système, comme évoqué au chapitre 1, est d'optimiser l'utilisation de l'eau en réduisant les efforts et les coûts de l'agriculteur. Ce système autonome permet ainsi à l'agriculteur de se consacrer à d'autres tâches importantes, tout en garantissant une gestion précise et efficace des ressources hydriques. Grâce à l'utilisation de technologies avancées telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN), les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et la logique floue, chaque composant du système, de la collecte à l'analyse des données, contribue à cette optimisation. De plus, ce système est conçu pour être adaptable à différents types d'environnements agricoles, sans nécessiter de couverture réseau Internet, offrant ainsi une solution flexible et autonome.

III.2 Présentation générale du système

III.2.1 Outils de conception

Dans ce projet, la mise à disposition des outils adéquats, tant au niveau matériel (hardware) que logiciel (software), est essentielle pour assurer la réussite de sa réalisation et l'atteinte des objectifs fixés.

III.2.1.1 Outils hardware

- **La lolin s3 :** est une carte de développement compacte basée sur le microcontrôleur ESP32-S3, qui combine connectivité Wi-Fi et Bluetooth basse consommation avec un processeur performant. Elle est adaptée aux projets embarqués et IoT, offrant plusieurs interfaces pour connecter des capteurs et modules, tout en supportant des applications d'intelligence artificielle grâce à son architecture optimisée. Cette carte permet ainsi de concevoir rapidement des systèmes intelligents, efficaces et économes en énergie[40].cette carte est représenter dans la figure suivante :

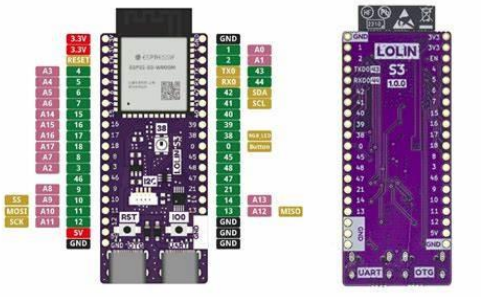


Figure III-1: Descriptif carte lolin s3.

- **Le WROOM-32 :** est un petit module qui contient un microcontrôleur ESP32 avec Wi-Fi et Bluetooth. Il est rapide, consomme peu d'énergie, et permet de créer facilement des objets connectés[41] . cette carte est representer dans la figure suivante :

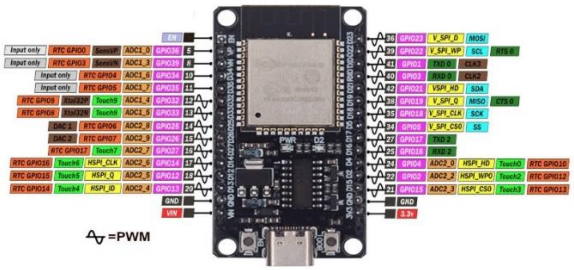


Figure III-2: Descriptif carte WROOM-32.

- **Le capteur AHT10 :** est un petit dispositif électronique qui mesure la **température** et l'**humidité relative** de l'air. Il est précis, peu gourmand en énergie, facile à utiliser avec des microcontrôleurs comme Arduino ou ESP32, et idéal pour les projets de surveillance environnementale, domestique ou météorologique. Ce capteur est representer dans la figure suivante :



Figure III-3: Descriptif capteur AHT10.

- **Le capteur capacitif d'humidité de sol 1.2 V** : mesure l'humidité en détectant les variations électriques liées à l'eau dans le sol. Il fournit une sortie en tension (environ 1.2 V) proportionnelle à l'humidité, offrant une mesure fiable et durable pour l'agriculture et l'irrigation intelligente.



Figure III-4: Capteur capacitif d'humidité de sol 1.2 V.

- **Le RTC ds1302 :** fournit une mesure précise du temps à un instant T (les secondes, les minutes, les heures, le jour de la semaine, le mois et l'année). Il fonctionne avec une

pile pour garder le temps même lorsque l'alimentation principale est coupée[42]. Comme l'illustre la figure suivante :



Figure III-5: Module RTC ds1302.

- **Le module SD adaptateur :** permet au microcontrôleur de lire et écrire des données sur une carte SD, facilitant le stockage externe de fichiers et données dans les projets électroniques. Ce module est représenter dans la figure suivante :



Figure III-6: Module SD adaptateur.

- **Le BMP280** : est un capteur illustrer dans la figure III-7 compact et précis qui mesure la pression atmosphérique et la température ambiante. Il est largement utilisé dans les applications météorologiques.



Figure III-7: Capteur BMP280.

- **Le FC-37 :** est un capteur simple illustrer dans ma figure III-8 qui détecte la pluie en mesurant la conductivité de l'eau sur sa surface, utilisé notamment pour l'irrigation automatique et la protection contre les intempéries[43].



Figure III-8: Capteur FC-37.

- **Anémomètre** : est un appareil illustrer dans la figure III-9 utilisé pour mesurer la vitesse du vent, essentielle en météorologie et dans les applications liées au contrôle du vent[44].



Figure III-9: Anémomètre.

- **Pompe à eau :** est un dispositif mécanique qui sert à déplacer l'eau d'un endroit à un autre, en augmentant sa pression. Elle peut être utilisée pour l'irrigation, le drainage, le remplissage de réservoirs ou tout autre transfert d'eau.



Figure III-10: Pompe à eau.

- **Le relai :** est un interrupteur commandé électriquement qui permet de contrôler un circuit puissant à l'aide d'un faible courant, assurant ainsi isolation et protection.



Figure III-11: Relai.

- **Batterie lithium :** est une source d'énergie rechargeable légère et performante, utilisée dans de nombreux appareils électroniques grâce à sa haute densité énergétique et sa longue durée de vie.
- **Support de batterie** : est un composant représenter dans la figure III-12 qui maintient la batterie en place, facilite son installation et ses connexions électriques, assurant sécurité et stabilité dans le montage.



Figure III-12: Batterie lithium et support.

III.2.1.2 Outils software

III.2.1.2.1 Logiciel

- **L'Arduino IDE :** c'est un logiciel qui permet d'écrire, de compiler et de télécharger des programmes sur une carte Arduino ou esp 32. Il utilise un langage de programmation simple basé sur le C++, facilitant ainsi la création de projets électroniques comme la gestion de capteurs.
- **NASA Power :** Ce site en ligne fournit des données climatiques et métrologiques (température, ensoleillement, humidité…etc), avec un historique et des prévisions sur l'ensemble de la planète.
- **Python** : langage de programmation open source multi-plateformes et orientée objet. Grâce à des bibliothèques spécialisées, Python s'utilise pour de nombreuses situations comme le développement logiciel, l'analyse de données, ou la gestion d'infrastructures.

III.2.1.2.2 Les bibliothèques utilisées

- **Pandas** : bibliothèque pour la manipulation et l'analyse efficace des données sous forme de tableaux.
- **Numpy** : bibliothèque de calcul numérique fournissant des tableaux multidimensionnels et fonctions mathématiques.
- **Tensorflow** : bibliothèque d'apprentissage profond développé par Google, utilisé pour créer et entraîner des réseaux de neurones.
- **Scikit-learn** : bibliothèque de machine learning avec des outils pour la classification, régression, prétraitement, et évaluation des modèles.
- **Matplotlib** : outil de visualisation graphique permettant de créer des graphiques, histogrammes, courbes d'apprentissage, etc.
- **Scikit-fuzzy (skfuzzy)** : extension de scikit-learn pour la logique floue et le contrôle flou, utilisée pour modéliser des systèmes à variables imprécises.
- **JacquesLucke** : est une bibliothèque optimisée pour ESP32 qui permet de créer des systèmes de contrôle flous avancés, facilitant la gestion de règles et de variables floues dans des applications embarquées complexes.
- **WiFi.h** : gestion de la connexion Wi-Fi pour microcontrôleurs ESP32/ESP8266.
- **Wire.h** : implémentation du protocole I2C pour la communication avec les capteurs et périphériques.
- **Adafruit_Sensor.h** : base commune pour la gestion des capteurs Adafruit, facilitant l'interfaçage.
- **Adafruit_BMP280.h** : pilote pour le capteur de pression atmosphérique et température BMP280.
- **Adafruit_AHTX0.h** : pilote pour le capteur de température et humidité AHT10/AHT20.
- **ThreeWire.h** : interface pour communication avec des RTC utilisant 3 fils (ex : DS1302).
- **RtcDS1302.h** : bibliothèque spécifique pour gérer le module horloge temps réel DS1302.
- **TensorFlowLite_ESP32.h** : portage de TensorFlow Lite pour exécuter des modèles d'IA sur ESP32.
- **MicroMutableOpResolver.h, MicroInterpreter.h, MicroErrorReporter.h, MicroOps.h** : composants internes de TensorFlow Lite Micro utilisés pour faire tourner les modèles sur microcontrôleurs.



Figure III-13: Logos des différentes bibliothèques.

III.2.1.2.3 Protocole utilisé

III.2.1.2.3.1 Protocole de communication ESP-NOW

ESP-NOW est un protocole de communication sans fil développé par la société (**Espressif)** qui propose des fonctionnalités courtes de transmission par paquets. Ce protocole permet à plusieurs appareils de communiquer facilement entre eux. Il est conçu pour une communication efficace et à faible latence entre les appareils, capable d'envoyer jusqu'à 250 octets sur une portée maximale de 200 mètres [45].

III.2.1.2.3.2 Les types de communication du protocole ESP-NOW

- **Communication peer-to-peer (P2P) :** Communication directe entre deux appareils sans intermédiaire.
- **Communication one-to-many :** Transmission d'un appareil vers plusieurs récepteurs simultanément.
- **Communication many-to-one :** Plusieurs appareils envoient des données vers un seul récepteur central.
- **Mode mixte Wi-Fi + ESP-NOW :** Utilisation simultanée de la connexion Wi-Fi et du protocole ESP-NOW sur un même appareil [46]**.**

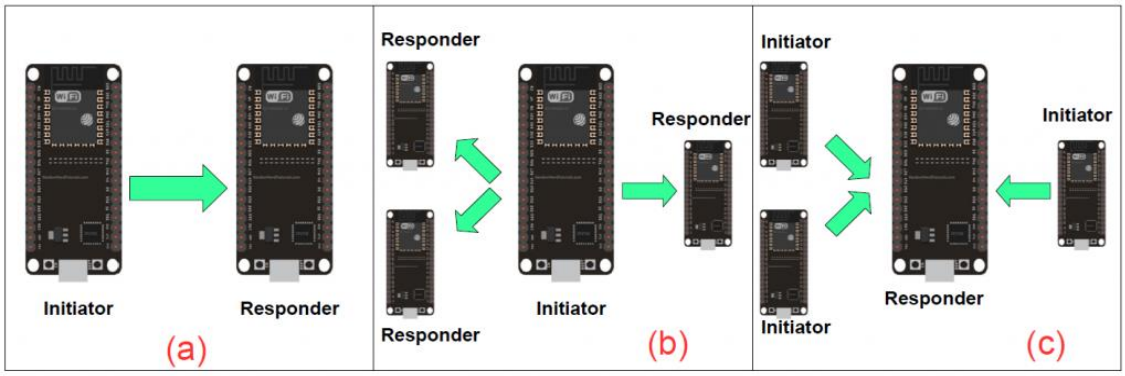


Figure III-14: Différents types de communication du protocole ESP-NOW.

III.2.2 Descriptif du système

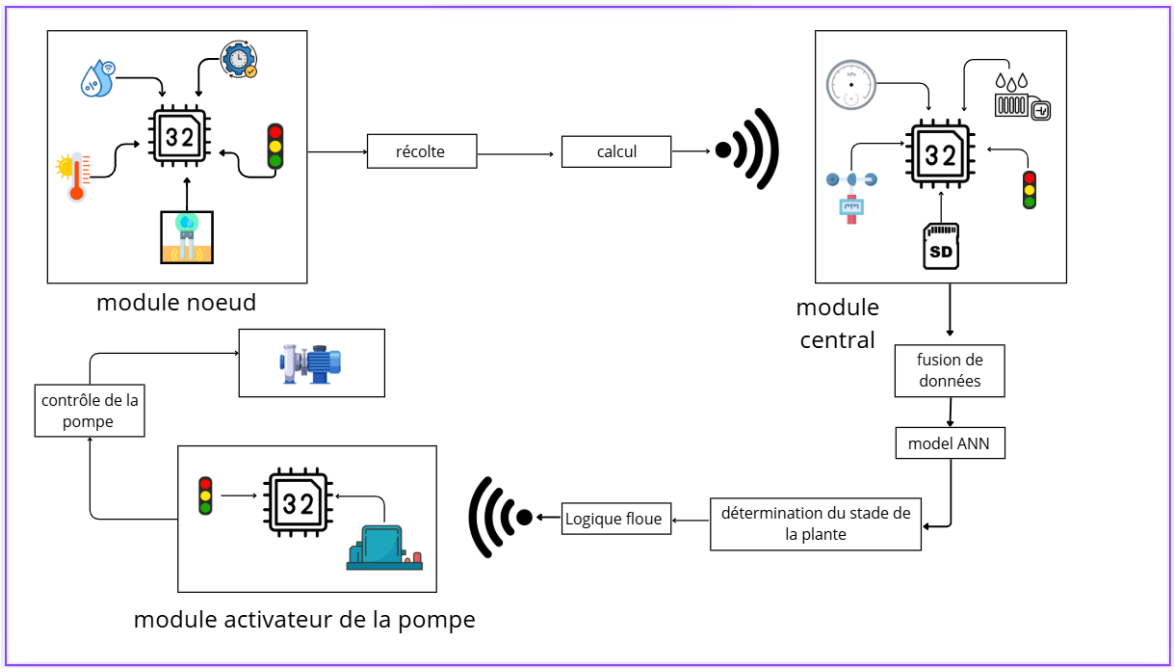


Figure III-15: Représentation de système d'irrigation intelligente.

Le système d'irrigation intelligent se compose de trois modules comme l'illustre la figure III-15, chacun ayant un rôle spécifique :

Le « module nœud » récolte à l'aide des capteurs, les données climatiques et les transmets au bout de 24 heures au « module central » par l'intermédiaire du protocole sans fil (ESP-NOW). Cette transmission sera signalée par un code couleur.

Le module central reçoit les données collectées par les capteurs et les enrichit avec d'autres mesures environnementales telles que la vitesse du vent et la pression atmosphérique. Une fois toutes ces informations regroupées, le module procède au calcul de

la quantité d'eau nécessaire pour l'irrigation. Ce calcul repose sur l'intégration de trois techniques principales : les réseaux de neurones artificiels (ANN), la détection du niveau de croissance de la plante, et la logique floue, permettant ainsi une décision intelligente, précise et adaptée aux besoins réels des cultures.

Une fois la quantité d'eau établie en fonction de la pluviométrie, et après calcul, les informations obtenues seront soit transmises par Le « module central » en l'état au « Module activateur de la pompe », soit bloquées. La transmission sera signalée au niveau des deux modules par un code couleur.

Le « Module activateur de la pompe » reçoit les données estimées d'eau à irriguer et les converties en temps d'activation de la pompe en fonction du débit.

III.3 Module nœud

La réalisation du module nœud se base sur une carte ESP connectée à plusieurs capteurs permettant de mesurer les données climatiques ainsi que celles du sol. Ce module est illustré dans la figure suivante :

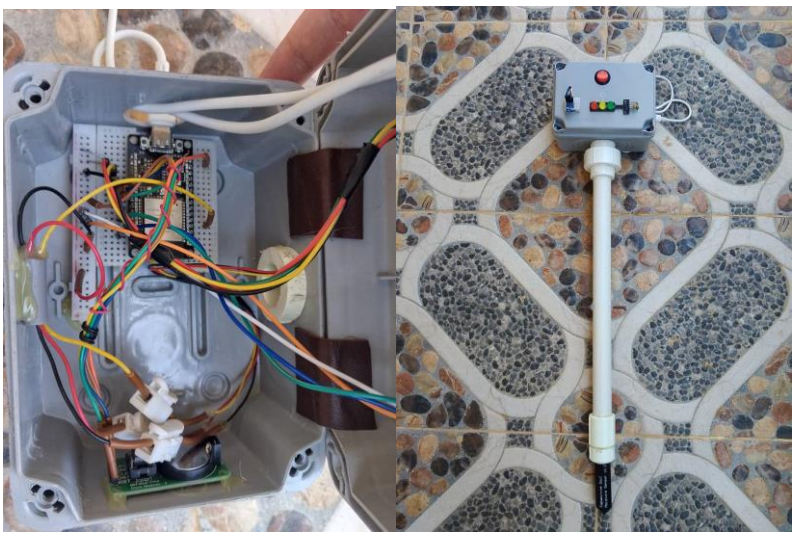


Figure III-16 : Réalisation initial module nœud**.**

III.3.1 Logigramme du module nœud

Nous avons résumé l'ensemble du fonctionnement de ce module dans le logigramme suivant :

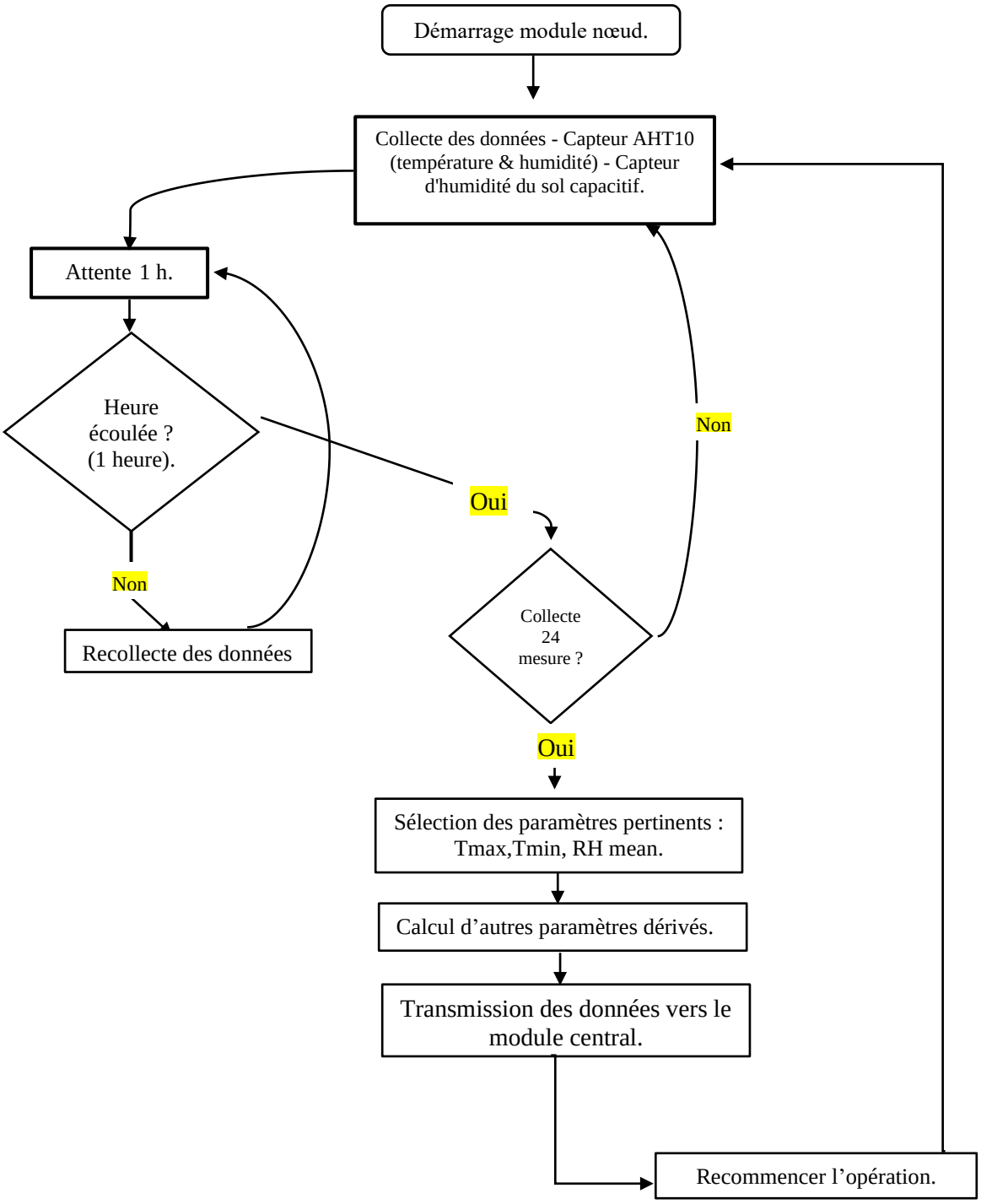


Figure III-17: Logigramme du module nœud.

Au démarrage, le « module nœud » initialise ses capteurs puis collecte les données de température, d'humidité et d'humidité du sol. Il effectue une lecture toutes les heures pour assurer un suivi régulier tout en économisant de l'énergie.

Après avoir validé la collecte des 24 mesure, le module nœud sélectionne les valeurs essentielles (température maximal, température minimal, humidité relative moyenne) parmi les données enregistrées.

Cette sélection permet de calculer les paramètres clés en relation directe avec l'estimation de l'évaporation.

Après l'opération de sélection des paramètres essentiels, une étape importante suit : le calcul du numéro du jour dans l'année à partir de la date fournie par le module RTC DS1302, permet de convertir la date normale (jour, mois, année) en un numéro entier représentant la position du jour dans l'année, par exemple le 2 février 2025 correspond au 33^{e} jour. Ce numéro de jour et indispensable, aide à appliquer les coefficients climatiques nécessaires au calcul de l'évapotranspiration (ET_0) et des besoins en eau (ETc). De plus, cette étape inclut la gestion des années bissextiles, grâce à une fonction intégrée qui détecte si l'année en cours comporte un 29 février, assurant ainsi l'exactitude des calculs liés à l'irrigation et à l'adaptation des besoins hydriques des plantes tout au long de l'année.

Après cette opération de conversion de la date en numéro de jour de l'année, le système calcule plusieurs variables climatiques à l'aide des équations présentées dans le chapitre 1. Cependant, il est important de préciser que, dans notre système actuel, nous ne prenons pas en compte toutes ces variables climatiques. Cette décision est justifiée par des contraintes spécifiques et des raisons techniques que nous expliquerons en détail dans la partie consacrée au module central. La non prise en compte de certaines variables, n'influe en rien la fiabilité du système.

Une fois toutes les étapes de collecte et de traitement des données complétées par le module nœud, ces dernières seront transmises au module central pour le traitement final. Chaque étape réalisée par le module nœud sera signalée par un code couleur, permettant une identification claire de l'état du processus. (Tableaux ci-dessous)

Tableau III-1: Définition des codes couleur.

Étape	Description	LED Rouge	LED Verte
Attente	Système en veille, prêt à commencer la mesure	Allumée	Éteinte
Collecte + calcule des données	Le système effectue la mesure des capteurs et les calculs de système	Éteinte	Allumée
Transmission	Envoi des données vers le Kit B	Éteinte	Clignotante
Retour à l'attente	Reprise du cycle, système prêt pour une nouvelle collecte	Allumée	Éteinte

III.4 Module central

III.4.1 Logigramme

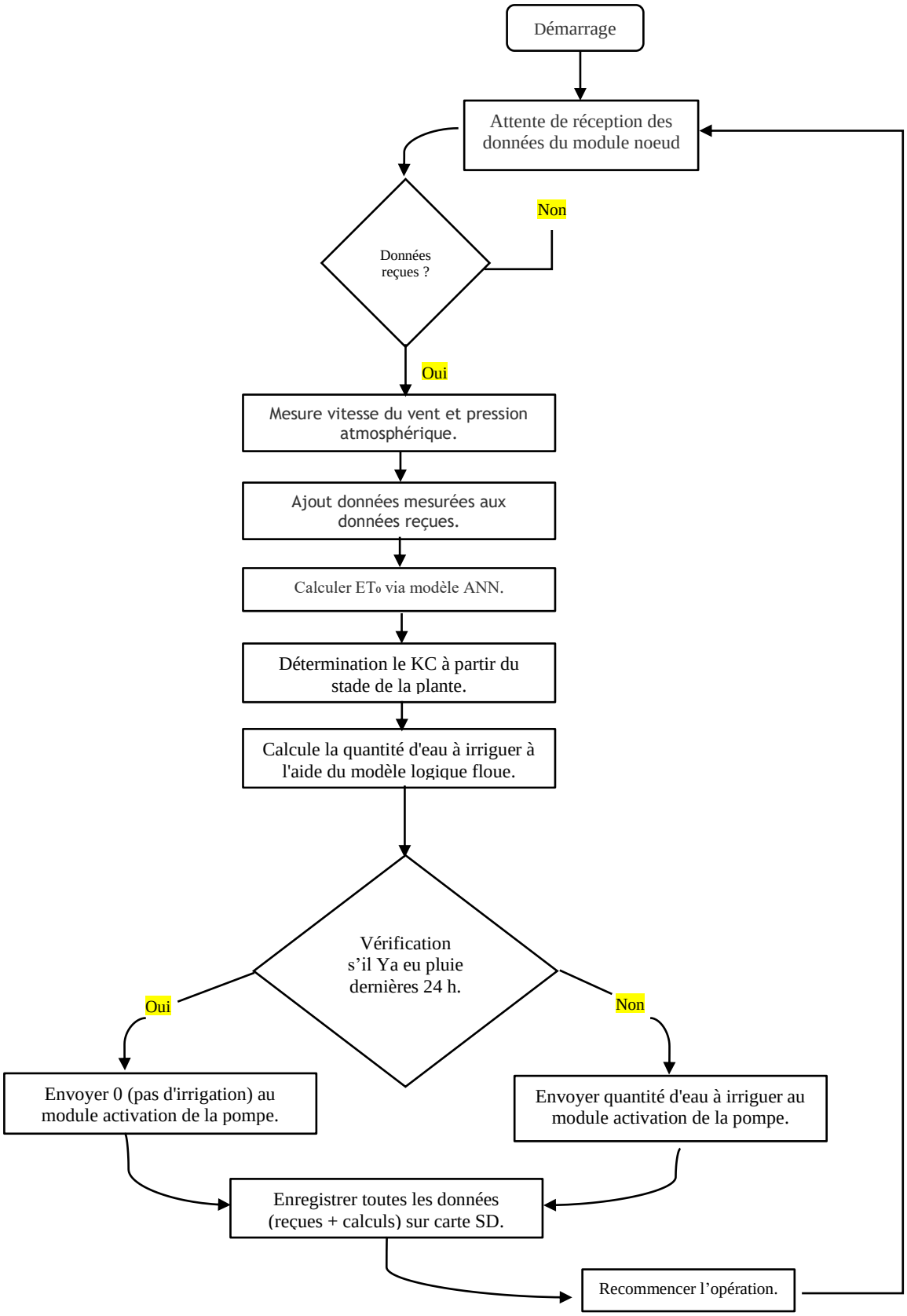


Figure III-18: Logigramme module central.

Le module central est une carte électronique de type ESP32 Lolin S3, reliée à deux capteurs, un module SD, et un feu tricolore. Il fonctionne comme une station capable d'analyser les données et de prendre la décision d'irriguer, comme illustré dans la figure suivante :

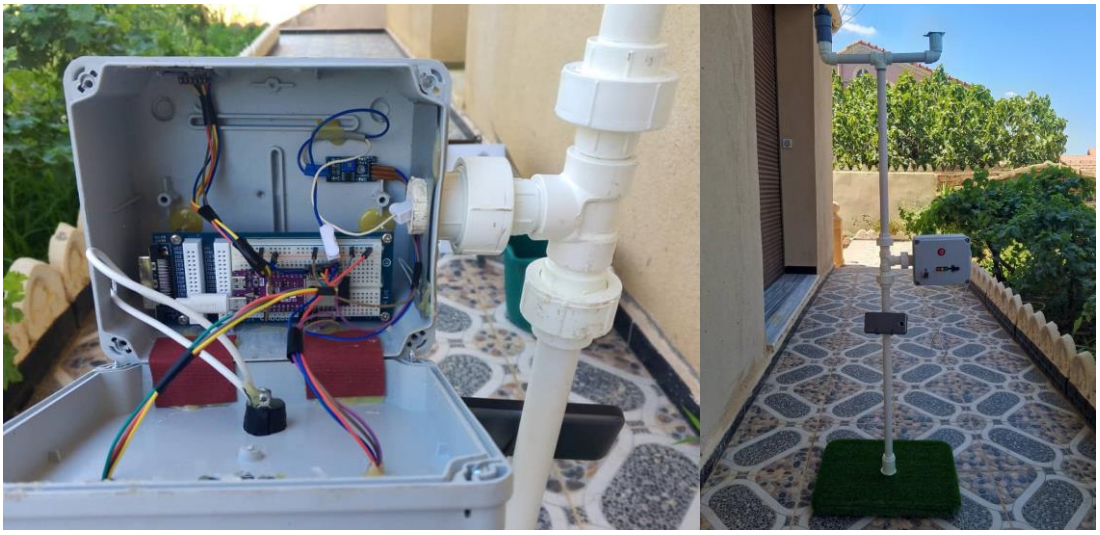


Figure III-19 : Réalisation initial module central.

Après le démarrage du système, le « module central » entre en phase d'attente, prêt à recevoir les données envoyées par le « module nœud ». Une fois que le « module central » reçoit ces données, il procède immédiatement à la mesure de la pression atmosphérique et de la vitesse du vent. Ces nouvelles mesures sont ensuite ajoutées aux données reçues, constituant ainsi un ensemble complet d'entrées. Cet ensemble est utilisé comme données d'entrée pour le modèle ANN.

III.4.2 Conception du système ANN

Pour concevoir notre système de réseau de neurones artificiels (ANN), la première étape consiste à constituer une base de données fiable et exhaustive. Pour cela, nous avons développé un programme spécifique qui récupère automatiquement les données climatiques nécessaires via l'API NASA POWER. Ce dernier, intégré dans un système composé d'une carte ESP32 connectée à un module SD, permet de :

- Recevoir les données climatiques brutes, telles que les températures minimale et maximale, la vitesse du vent, la pression atmosphérique, l'humidité relative, et d'autres variables essentielles.

- Calculer tous les paramètres nécessaires pour le modèle, notamment ceux requis par l'équation de Penman-Monteith, ainsi que l'évapotranspiration de référence (ET_0).

Enregistrer quotidiennement ces données dans un fichier CSV stocké sur la carte SD, avec un classement organisé par jour.Ce systéme s'illustre dans la figure suivante :

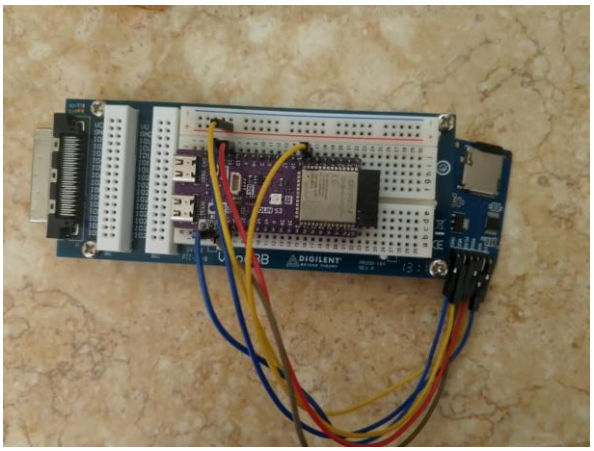


Figure III-20: Système de récolte base de données.

Ce processus est automatisé, récurrent pour chaque jour de la période étudiée, couvre une longue durée allant de 2002 à 2024, fournissant ainsi une base de données riche avec plus de 8000 enregistrements.

Avec cette base de données complète, nous avons procédé à une analyse approfondie des variables pour déterminer celles qui influencent significativement la sortie, c'est-à-dire la valeur d'ET_0.

Pour cela, nous avons utilisé une approche statistique en examinant la corrélation entre chaque variable d'entrée et de sortie, puis en identifiant les paramètres les plus pertinents.

Il est important de souligner que certaines variables, bien qu'ayant un impact potentiel sur la sortie, ont été volontairement éliminées pour des raisons pratiques et économiques. En effet, le coût élevé de leur acquisition ou mesure justifie leur exclusion, ce qui constitue un avantage non négligeable en termes de simplification du système et de réduction des coûts, tout en préservant la qualité des résultats.

Par exemple, la variable du rayonnement net (Rn) n'a pas montré une influence significative sur la performance de notre modèle, renforçant ainsi la pertinence de son exclusion sans compromettre la précision des prévisions.

Après cette sélection rigoureuse, **12 variables d'entrée** ont été retenues

Pour entraîner le modèle de réseau de neurones artificiels (ANN), plusieurs variables météorologiques et environnementales ont été utilisées comme entrées. Parmi ces paramètres figurent la température maximale (Tmax_C) et minimale (Tmin_C), l'humidité relative (RH_%), la pression atmosphérique (P_kPa), ainsi que la vitesse du vent (Wind_m/s). Des variables dérivées comme la pente de la courbe de pression de vapeur saturante (delta), la pression de vapeur saturante (es), la pression de vapeur réelle (ea), l'angle horaire au coucher du soleil (ws), la distance relative Terre-Soleil (dr), le rayonnement solaire extraterrestre (Ra) et le rayonnement solaire clair (Rso) sont également prises en compte. Ces données permettent au modèle ANN de prédire avec précision les besoins en irrigation selon les conditions climatiques.

Après avoir constitué notre base de données complète, l'étape suivante a consisté à développer un modèle capable d'estimer avec précision la sortie souhaitée. Nous avons testé plusieurs méthodes pour cette tâche, et après plusieurs expérimentations primaires, nous avons choisi d'utiliser le modèle ANN (réseau de neurones artificiels), car il a donné les meilleurs résultats.

De plus, ce modèle est facile à implémenter sur un microcontrôleur ESP32, ce qui le rend très adapté à notre projet. Nous avons donc décidé de l'utiliser comme base et d'améliorer ses performances en ajustant certains paramètres importants, comme le nombre de couches et de neurones, les fonctions d'activation, le nombre d'époques, le taux d'apprentissage et les techniques de régularisation. Ces ajustements permettront d'obtenir des résultats plus fiables et adaptés aux conditions réelles et de déterminer un modèle optimal décrit ci-dessous :

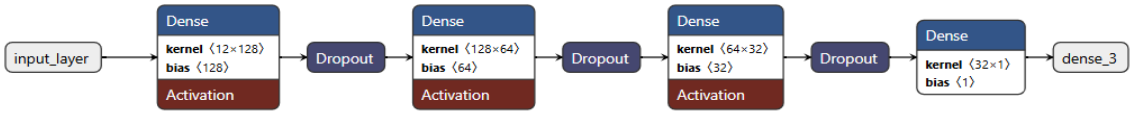


Figure III-21: Représentation du model optimal.

Le modèle de réseau de neurones utilisé est de type séquentiel, constitué de trois couches cachées denses comprenant respectivement 128, 64 et 32 neurones. Chaque couche emploie la fonction d'activation ReLU (Rectified Linear Unit), qui introduit de la non-linéarité dans le modèle et favorise une convergence plus rapide lors de l'entraînement. Pour limiter le risque de surapprentissage (overfitting), une régularisation L2 avec un coefficient de 0.0005 est appliquée à chaque couche dense. De plus, des couches Dropout avec un taux

de 10 % sont insérées après chaque couche dense afin d'améliorer la robustesse et la généralisation du modèle.

L'entraînement du modèle précité utilise l'optimiseur AdamW avec un taux d'apprentissage de 0,0003. Le modèle est entraîné pendant 222 époques avec un batch de 64. On utilise 80 % des données pour l'entraînement, 10% pour la validation et 10% pour le test. Un système d'arrêt anticipé stoppe l'entraînement si la validation ne s'améliore pas pendant 20 époques, et le meilleur modèle est automatiquement sauvegardé.

III.4.2.1 Implémentation du modèle ANN sur la carte ESP32 LoLin S3

La conversion du modèle Keras au format TensorFlow Lite constitue une étape clé pour optimiser l'utilisation du modèle sur des microcontrôleurs. Le modèle initial, sauvegardé au format Keras (.keras), est converti en un fichier TensorFlow Lite (.tflite), un format spécialement conçu pour réduire la taille du modèle et accélérer les temps d'inférence sur des environnements aux ressources limitées. Ensuite, le fichier TensorFlow Lite est transformé en un fichier header C (.h), dans lequel le modèle est représenté sous forme d'un tableau de données stockées en mémoire. Cette conversion facilite l'intégration directe du modèle dans le code source embarqué, permettant ainsi une exécution efficace et autonome du modèle sur les microcontrôleurs.

III.4.3 Détection des besoins de la plante à travers son stade et son type

Comme nous le savons, les besoins de la plante évoluent en fonction de son type et de sa phase de croissance. Pour pouvoir calculer ces besoins avec précision, il est indispensable de définir clairement la culture sur laquelle porte le projet ainsi que le stade de développement de la plante. Cela permet de déterminer le coefficient spécifique à chaque stade. Dans notre système, qui fonctionne actuellement pour la pomme de terre, on a programmé une méthode capable de détecter l'âge de la plante en jours (par exemple, premier jour, deuxième jour, etc.). Le système est conçu de manière à ce que, chaque fois qu'il reçoit de nouvelles données du module nœud, il incrémente automatiquement d'un jour l'âge de la plante, car le kit envoie les données toutes les 24 heures. Ce calcul nous permet de situer précisément cette dernière dans l'intervalle correspondant à son stade de croissance. Comme expliqué dans le chapitre 1, la plupart des plantes ont environ quatre stades, mais les intervalles varient d'une plante à l'autre. Par exemple, le jour 30 correspond au stade initial pour la carotte, alors que pour la pomme de terre, c'est un stade de développement différent. Une fois l'âge de la plante positionné dans l'intervalle adéquat, on peut déterminer le stade exact dans lequel elle se trouve. Ensuite, on choisit le coefficient (kc) correspondant à ce stade, qu'il soit initial, moyen ou final. Si la plante est en stade de développement, le

coefficient est calculé à partir de l'équation présentée dans le chapitre 1, qui prend en compte les phases initiale et moyenne.

Notre projet peut être adapté à d'autres plantes avec des réglages spécifiques selon la culture et les préférences de l'agriculteur.

III.4.4 Étude et analyse des caractéristiques du sol

Comme nous le savons, le besoin en eau de la plante joue un rôle crucial dans la détermination de la quantité d'irrigation nécessaire. Cependant, le type de sol intervient également de manière importante dans ce calcul, car il influence la rétention et la disponibilité de l'eau pour la plante. Pour améliorer la précision de notre système, nous avons donc intégré une analyse du sol dans notre étude. Cette analyse consiste à évaluer plusieurs critères spécifiques du sol, détaillés dans le chapitre correspondant. Nous avons mené cette expérience directement sur le terrain où le système sera implanté afin d'ajuster et d'affiner son fonctionnement, garantissant ainsi une meilleure adaptation aux conditions réelles du sol et une irrigation plus efficace.

La première étape que nous avons réalisée consiste à prélever des échantillons de sol provenant de trois endroits différents, éloignés les uns des autres, afin d'assurer une représentativité optimale. Ces prélèvements ont été effectués à des profondeurs variant entre 25 cm à 40 cm, ce qui correspond à la zone racinaire active de la plante comme la figure III-22 montre .



Figure III-22: Prélèvement échantillons du sol.

La deuxième étape que nous avons réalisée consiste à remplir un bocal vide avec environ 60 % du volume de sol prélevé sur le terrain cette opération est illustrer dans la figure suivante :



Figure III-23: Récipient échantillon de base.

Lors de la troisième étape qui est illustrer dans la figure III-24, nous ajoutons de l'eau dans ce bocal contenant le sol, en veillant à laisser un certain espace vide afin de pouvoir agiter et mélanger le contenu correctement.



Figure III-24: Récipient échantillon complété.

Lors de la quatrième étape qui est illustrer dans la figure III-25, nous mélangeons soigneusement le contenu du bocal, puis le laissons reposer pendant cinq minutes. Après ce temps, nous observons la formation de couche du sable se dépose au fond en raison de son poids plus élevé.

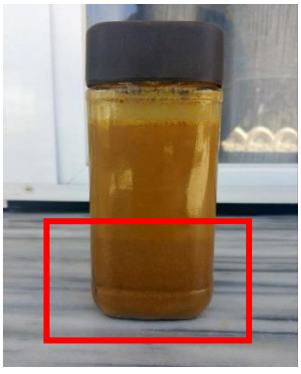


Figure III-25: Composition de la couche de sable.

Lors de la cinquième étape qui est illustrer dans la figure III-26 , nous laissons notre mélange reposer environ 1h afin d'observer la formation des différentes couches. À ce stade, une couche de limon se forme au-dessus de la couche de sable.

Lors de la sixième étape, nous laissons notre mélange reposer pendant 24 heures afin d'observer la formation de la couche d'argile.



Figure III-26: Analyse des différentes couches.

III.4.5 Conception du model logique floue

Comme nous le savons, il est impossible de garantir un retour précis à 100 % du système, car plusieurs facteurs externes échappent à notre contrôle. Par exemple, nous ne pouvons pas traiter certains types de végétation comme les herbes sauvages qui contiennent de nombreuses variétés et dont on ignore comment et quand elles absorbent l'eau. Ces herbes modifient également la quantité d'eau présente dans le sol. De plus, les incertitudes liées aux capteurs, qui ne fournissent pas toujours des valeurs exactes à 100 %, compliquent davantage la précision du système. Pour faire face à ces contraintes, Nous ne pouvons pas utiliser des conditions strictes telles que if ou else, car ces dernières nécessitent des informations précises et notre système ne peut pas toujours les fournir. En effet, l'utilisation excessive de ces conditions rendrait notre système trop rigide et moins performant. C'est pourquoi nous avons opté pour une logique floue, qui fonctionne de manière plus souple, un peu comme la réflexion humaine. Nous en avons expliqué le fonctionnement en détail dans le chapitre 2.

Comme nous le savons, le système de logique floue est fondé principalement sur l'expérience et la pratique. Pour notre modèle, nous avons défini deux entrées essentielles :le besoin en eau de la plante, ainsi que l'humidité du sol. Ces paramètres servent à estimer la quantité d'eau nécessaire à l'irrigation. Après avoir déterminé les entrées et la sortie (quantité d'eau à irriguer), nous passons à l'étape de fuzzification, où chaque entrée est divisée en plusieurs intervalles ou ensembles floues.

Ces intervalles ne sont pas choisis au hasard, mais basés sur notre expérience et nos tests. Par exemple, pour l'humidité du sol, on sait que la valeur maximale de notre terre est environ 21 % d'eau, et la minimale autour de 8 %. On a donc décidé que l'intervalle de 8 à 12 % représente un sol sec où la plante a vraiment besoin d'eau. Entre 12 et 18 %, le sol est normal, la plante a un besoin moyen. Entre 18 et 21 %, le sol est humide, donc la plante a moins besoin d'arrosage.

Pour la quantité d'eau à donner, on l'a divisée en 10 intervalles, car c'est ce qui a donné les meilleurs résultats pendant nos essais. La quantité varie de 0 à 30, ce qui correspond aux données qu'on a. Avec ces intervalles, on peut mieux gérer les différents cas, même ceux extrêmes.

Ces intervalles nous ont permis de créer des règles claires, qu'on voit bien dans le tableau suivant :

Besoin de la plante	**Humidité du sol**	**Quantité d'eau (Sortie)**
Très faible	Sèche	Très élevée
Très faible	Moyenne	Très faible
Très faible	Humide	Très faible
Faible	Sèche	Extrêmement élevée
Faible	Moyenne	Faible
Faible	Humide	Faible
Moyen	Sèche	Extrêmement élevée
Moyen	Moyenne	Moyenne
Moyen	Humide	Moyenne
Élevé	Sèche	Très très élevée
Élevé	Moyenne	Moyenne haute
Élevé	Humide	Très faible
Très élevé	Sèche	Maximum
Très élevé	Moyenne	Élevée
Très élevé	Humide	Moyenne basse

Tableau III-2: Définition des intervalles.

Tableau III-3: Condition des besoins en eau.

Variable	Intervalles (Ensembles flous)	Plage (valeurs approximatives)
Besoin plante	Très faible	0 — 1.6
	Faible	1.6 — 3.8
	Moyen	3.8 — 6.1
	Élevé	6.1 — 8.9
	Très élevé	8.9 — 11.7
Humidité sol	Sèche	8 — 12
	Moyenne	12 — 17
	Humide	17 — 21
Quantité eau	Très faible	0 — 2
	Faible	1.6 — 3.8
	Moyenne basse	3 — 5
	Moyenne	5 — 7
	Moyenne haute	7 — 9
	Élevée	9 — 12
	Très élevée	12 — 19
	Très très élevée	19 — 24
	Extrême basse	24 — 27
	Extrême haute	27 — 30

Après avoir défini les conditions comme on l'a vu dans le tableau, on donne un exemple pour expliquer : quand le besoin de la plante est très faible et que l'humidité du sol est sèche, la quantité d'eau en sortie sera très élevée. Cela permet de s'assurer que la plante ne manque pas d'eau dans cette situation. Ensuite, une fois cette étape terminée, on passe au choix de la fonction d'appartenance (membership function). On a testé plusieurs fonctions d'appartenance comme la triangulaire, la trapézoïdale, la gaussienne ou la sigmoïde. Après plusieurs essais, on a vu que les deux meilleures étaient la trapézoïdale et la triangulaire. Mais la fonction triangulaire a un peu mieux donné que la trapézoïdale, c'est pourquoi on l'a choisie pour notre modèle. Le tracé des intervalles avec la fonction triangulaire est montré dans la figure suivante :

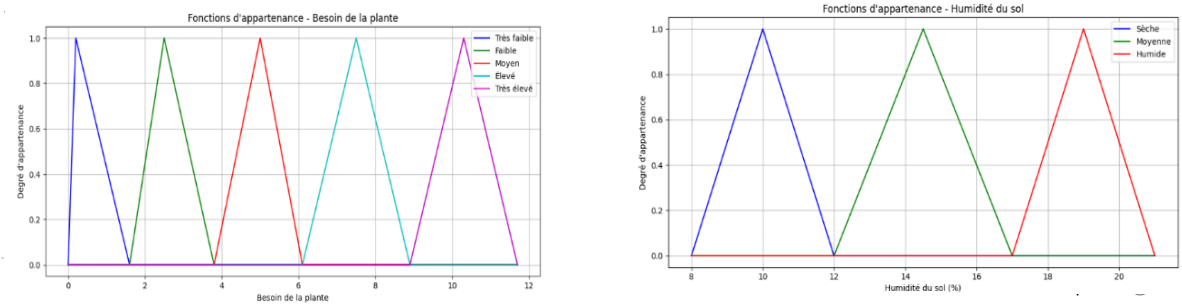


Figure III-27: Traçage des intervalles d'entrées.

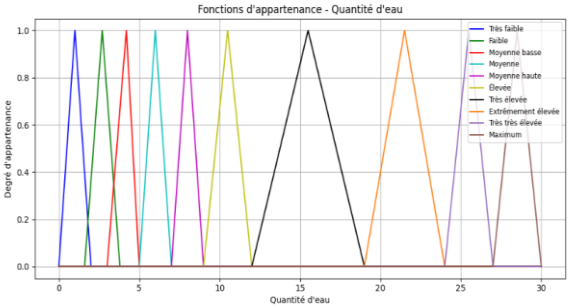


Figure III-28: Traçage des intervalles de sortie.

Après avoir défini les fonctions d'appartenance et les règles floues, il est nécessaire de passer à la construction de l'interface floue proprement dite. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser la méthode Mamdani. Cette méthode est la plus répandue et la plus connue dans le domaine des systèmes flous, ce qui en fait une référence solide et fiable.

De plus, notre modèle est relativement simple et ne comporte pas un grand nombre de conditions complexes. La méthode Mamdani est particulièrement adaptée à ce type de modèle, car elle permet une modélisation intuitive et facile à comprendre, sans alourdir le système avec des conditions compliquées.

Cette simplicité garantit que notre modèle reste clair, efficace et performant, tout en assurant une bonne interprétation des résultats.

Après avoir conçu l'interface de Mamdani, l'étape suivante que nous devons appliquer à notre modèle est la méthode de défuzzification, qui nous permet d'obtenir une valeur précise exploitable. La méthode que nous avons choisie est la méthode du centre de gravité (Centre Of Gravity - COG), car c'est la plus utilisée et reconnue dans les systèmes de logique floue. Plus important encore, cette méthode est la plus équilibrée pour calculer la valeur finale, notamment lorsqu'on travaille avec des données climatiques variables, car elle fournit une estimation stable et représentative de la situation réelle.

Une fois l'étape floue terminée nous passons à l'étape suivante qui est la détection de pluie. Une fois que le « module central démarre », le capteur de pluie prend des mesures toutes les 15 minutes et enregistre ces données dans la mémoire de l'ESP32 pendant 24 heures. Lorsqu'il est temps d'envoyer les informations, le « module central démarre », vérifiera la présence de pluie durant les dernières 24 heures. Si oui, le « module centrale démarre » envoie un « 0 » au « module d'activation de la pompe » . Sinon, il envoie le volume d'eau à irriguer, calculé en convertissant les millimètres par jour en litres, en fonction de la surface à arroser. Avant l'envoi, toutes les données sont sauvegardées sur une carte SD. Ensuite, les informations sont transmises au « module d'activation de la pompe ».

L'ensemble des opérations de traitement est signalé par des codes couleur repris dans le tableau suivant :

Tableau III-4: Représentation des codes couleur (module central).

Étape	Description	LED Rouge	LED Verte	LED jaune
Attente	Système en veille, prêt à commencer la mesure.	Allumée	Éteinte	
Collecte + calcul des données	Le système effectue la mesure des capteurs et les calculs.	Éteinte	Allumée	
Transmission	Envoi des données vers module central.	Éteinte	Clignotante	
Retour à l'attente	Reprise du cycle, système prêt pour une nouvelle collecte.	Allumée	Éteinte	
Détection de pluie	Lorsqu'il détecte la pluie.	Elle reste telle quel	Elle reste telle quel	Alumée

III.5 Module de l'activations de la pompe

III.5.1 Logigramme

Les étapes de fonctionnement du module central sont résumées dans le logigramme suivant :

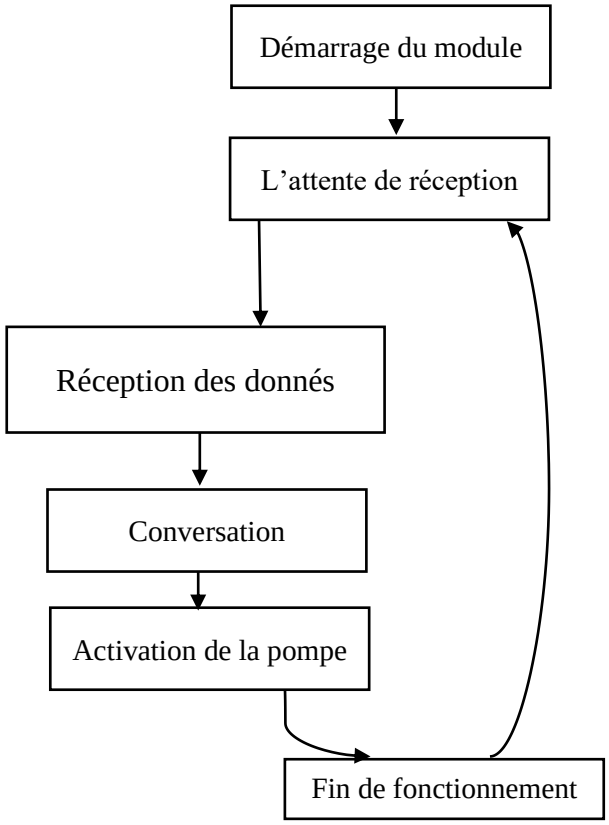


Figure III-29: Logigramme activation de la pompe.

Après le démarrage, le « module d'activation de la pompe » reste en attente de réception des données venant du « module central. Dès réception de la donnée quantité d'eau (en litres), le module d'activation de la pompe convertit cette valeur en temps de fonctionnement du débit connu de la pompe. Par exemple, si la pompe délivre 1 litre en 3 secondes (soit un débit de 0,333 litre par seconde), le « module d'activation de la pompe » calcule combien de temps la pompe doit fonctionner pour fournir la quantité d'eau requise.

Ensuite, le « module d'activation de la pompe » déclenche le démarrage de la pompe pour ce temps calculé. Pendant ce temps, un compteur décompte la durée. Une fois ce temps écoulé, la pompe s'arrête automatiquement. Les étapes de fonctionnement du module seront signalées par des codes couleurs décrits ci-dessous :

Tableau III-5: Représentation des codes couleur (module A.P).

ÉTAPE	DESCRIPTION	LED Rouge	LED Verte	LED Jaune
Attente	Système en veille, prêt à commencer la mesure.	Allumée	Éteinte	Éteinte
Réception	Lorsque la réception est validée.	Éteinte	Allumée	Éteinte
Retour à l'attente	Reprise du cycle, système prêt pour nouvelle collecte.	Allumée	Éteinte	Éteinte
Détection de pluie	Lorsque reçoit un 0.	Éteinte	Éteinte	Allumée

III.6 Analyse, évaluation et discussions des résultats

III.6.1 Analyse du fonctionnement du « module nœud » prédéfini

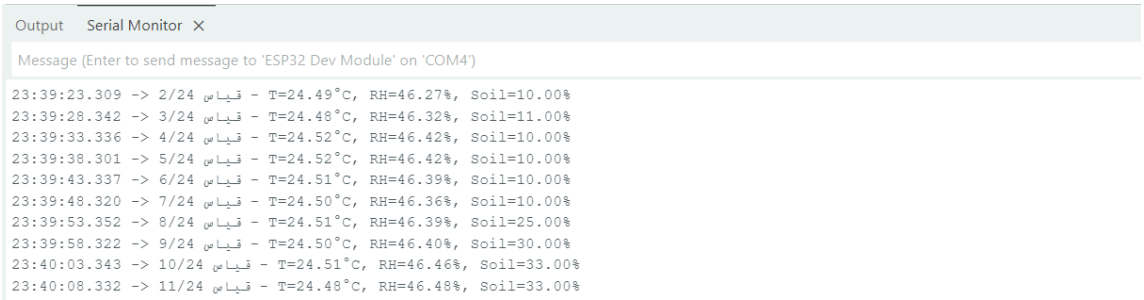


Figure III-30: Vérification de la récolte des données.

La figure III-30 montre clairement que le système collecte les données avec succès, sans aucun problème détecté. Chaque ligne affiche une lecture toutes les 5 secondes, ce qui correspond ici à un test rapide pour vérifier le fonctionnement en temps réel.

Les données mesurées (température, humidité relative, humidité du sol) sont stables et cohérentes sur la figure III-30, confirmant que le système fonctionne correctement et réalise la

collecte en continu sans interruption.

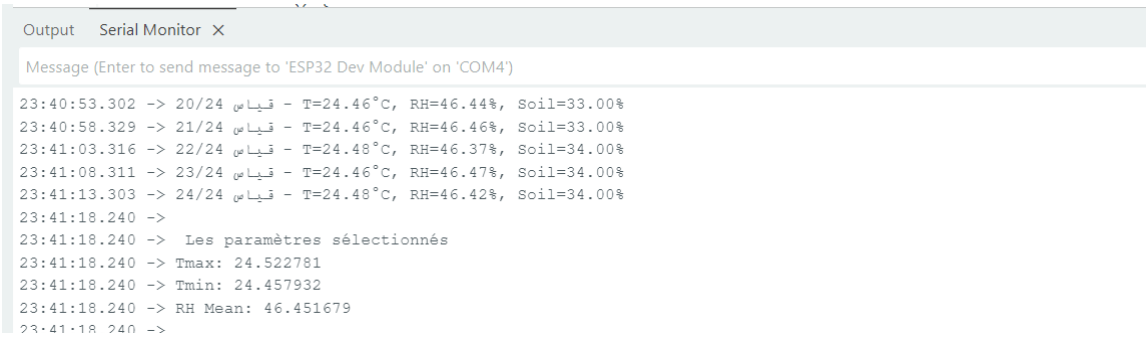


Figure III-31: Vérification de la sélection des paramètres définis.

La figure III-31 montre qu'après 24 heures de collecte, le système a correctement calculé et affiché les paramètres essentiels : Tmax, Tmin et RH Mean, confirmant que le programme a bien enregistré toutes les données dans la mémoire de l'ESP32, puis a extrait ces indicateurs clés pour les afficher.

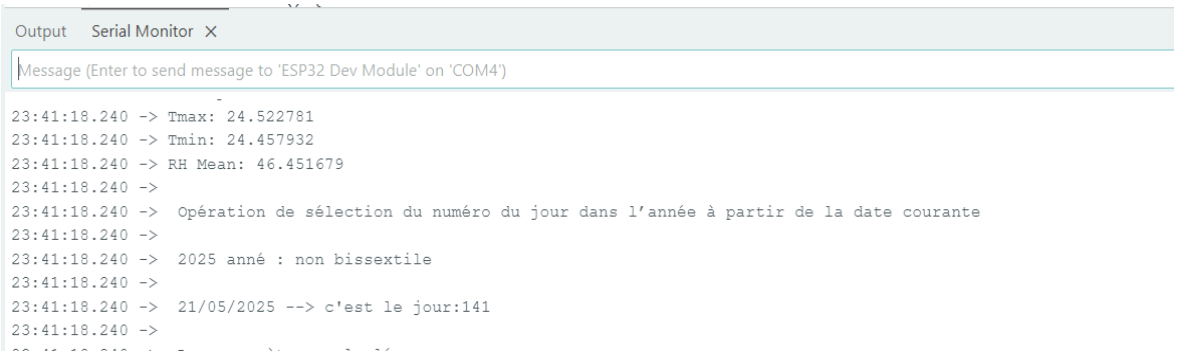


Figure III-32: Vérification de la prise au compte des années bissextiles.

La figure III-32 montre que l'opération de conversion de la date courante en numéro du jour dans l'année s'effectue avec précision. Le programme affiche que l'année 2025 n'est pas bissextile, puis il calcule et affiche le numéro de jour correspondant (ici, le 21/05/2025 est bien le 141e jour de l'année). Cette sortie confirme que la conversion de la date est bien réalisée, assurant ainsi une bonne gestion temporelle des données.



Figure III-33: Calcul des paramètres.

Après avoir effectué avec succès les calculs nécessaires, comme le montre la figure III-33, le système procède à l'envoi de toutes les données collectées vers le « module

central ».

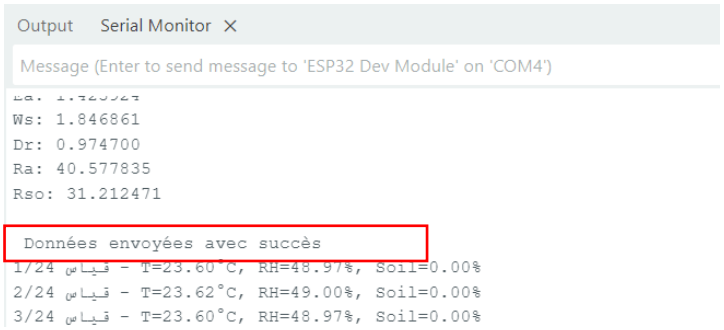


Figure III-34: Validation de l'envoi des données.

Comme on peut le voir sur la figure III-34, l'envoi des données s'est déroulé avec succès, ce qui confirme que la communication fonctionne parfaitement entre le module nœud et le module central. Après cette transmission, le système revient automatiquement à son état initial pour recommencer la procédure de collecte et de traitement des données, assurant ainsi un cycle complet et continu.

III.6.2 Analyse du fonctionnement du « module central »

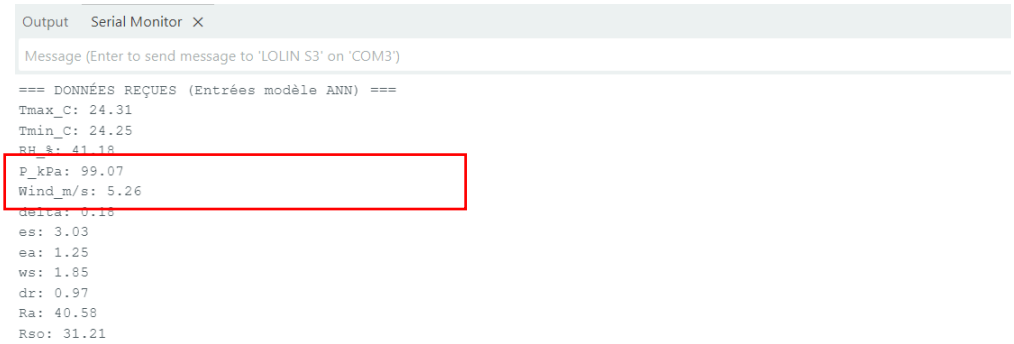


Figure III-35: Validation du complement des données.

D'après la figure III-35, nous observons que le « module central » reçoit correctement les données transmises. Ensuite, il enrichit ces données en y ajoutant les valeurs mesurées de la pression atmosphérique et de la vitesse du vent. La figure montre également que ces informations sont organisées précisément selon l'ordre des entrées requises par le modèle ANN. Cette organisation rigoureuse et cohérente des données démontre que notre programme a fonctionné avec succès dès ses premières étapes.

Après avoir finalisé le développement du programme et réalisé le montage matériel, nous avons procédé à une série d'observations pour vérifier le bon fonctionnement du système.

III.6.2.1 Analyse de la conception de la base de données

```
13:15:35.199 -> Connexion au Wi-Fi........
13:15:40.262 -> Connecté au Wi-Fi!
13:15:40.262 -> Initialisation de la carte SD...Carte SD prête !
13:15:40.262 -> Demande de données pour le 20020101
13:15:46.009 -> Données enregistrées sur la carte SD pour le 20020101
13:15:46.009 ->
13:15:46.009 -> Données météorologiques du 20020101
```

Figure III-36: Constation de démarrage de la récolte des données.

La figure III-36 illustre bien que notre système fonctionne parfaitement. On peut voir que la connexion au Wi-Fi s'établit sans problème, ce qui est essentiel pour la communication des données. La carte SD est correctement initialisée et prête à être utilisée, ce qui garantit la sauvegarde fiable des données. Ensuite, le système demande et enregistre avec succès les données météorologiques pour la date spécifiée (20020101). Cela confirme que notre dispositif collecte, traite et stocke les informations comme prévu, démontrant ainsi sa stabilité et son efficacité opérationnelle. En somme, tout indique que notre système est robuste et prêt à être déployé.

Le système crée un fichier sur la carte SD où il stocke clairement les données météorologiques, assurant ainsi un enregistrement fiable et un accès facile pour un traitement futur.

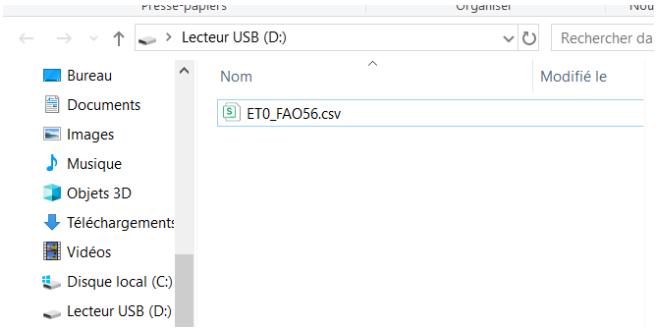


Figure III-37: Visualisation de la création du fichier.

La base de données est sous forme d'un tableau csv stocké sur la carte SD

Date	J	Tmax_C	Tmin_C	Tmean_C	RH_%	P_kPa	Wind_m/s	delta	sigma	es	ea	delta_e	albedo	MJ/m2/d	Rns	Rnl	Rn	phi	ws	dr	Ra	Altitude	Gsc	Rso	ET0_mm/da
20020101	1	16.82	9.43	13.12	87.04	98.70	3.47	0.098676	0.000000	1.548788	1.348065	0.200723	0.23	7.45	5.74	2.69	3.05	0.633031	1.254442	1.032995	16.14237	960.00	0.082000	12.41671	1.10
20020102	2	16.54	10.30	13.42	74.59	98.61	3.48	0.100358	0.000000	1.567413	1.169133	0.398280	0.23	6.41	4.93	2.15	2.78	0.633031	1.255756	1.032980	16.19724	960.00	0.082000	12.45892	1.64
20020103	3	17.60	8.25	12.93	70.05	98.35	2.16	0.097549	0.000000	1.551909	1.087113	0.464797	0.23	9.68	7.46	4.44	3.02	0.633031	1.257176	1.032956	16.25648	960.00	0.082000	12.50448	1.55
20020104	4	13.60	8.55	11.08	83.20	98.43	2.00	0.087638	0.000000	1.335600	1.111220	0.224381	0.23	7.81	6.02	3.02	3.00	0.633031	1.258700	1.032922	16.32008	960.00	0.082000	12.55341	1.01
20020105	5	13.83	6.23	10.03	84.58	99.07	2.12	0.082428	0.000000	1.265579	1.070427	0.195152	0.23	6.84	5.27	2.36	2.91	0.633031	1.260328	1.032878	16.38802	960.00	0.082000	12.60567	0.94
20020106	6	12.96	4.63	8.80	77.84	99.10	2.46	0.076615	0.000000	1.171946	0.912243	0.259703	0.23	8.64	6.65	3.66	3.00	0.633031	1.262058	1.032824	16.46029	960.00	0.082000	12.66126	1.15
20020107	7	12.17	3.29	7.73	64.15	98.65	2.16	0.071886	0.000000	1.095934	0.703042	0.392892	0.23	11.12	8.57	5.65	2.91	0.633031	1.263888	1.032761	16.53686	960.00	0.082000	12.72015	1.42

Figure III-38: Délivrance d'enchantions de la base de données.

Le choix des 12 variables citées précédemment a été fait par la matrice de corrélation Afin de déterminé celles qui influencent positivement les données sur la sortie .

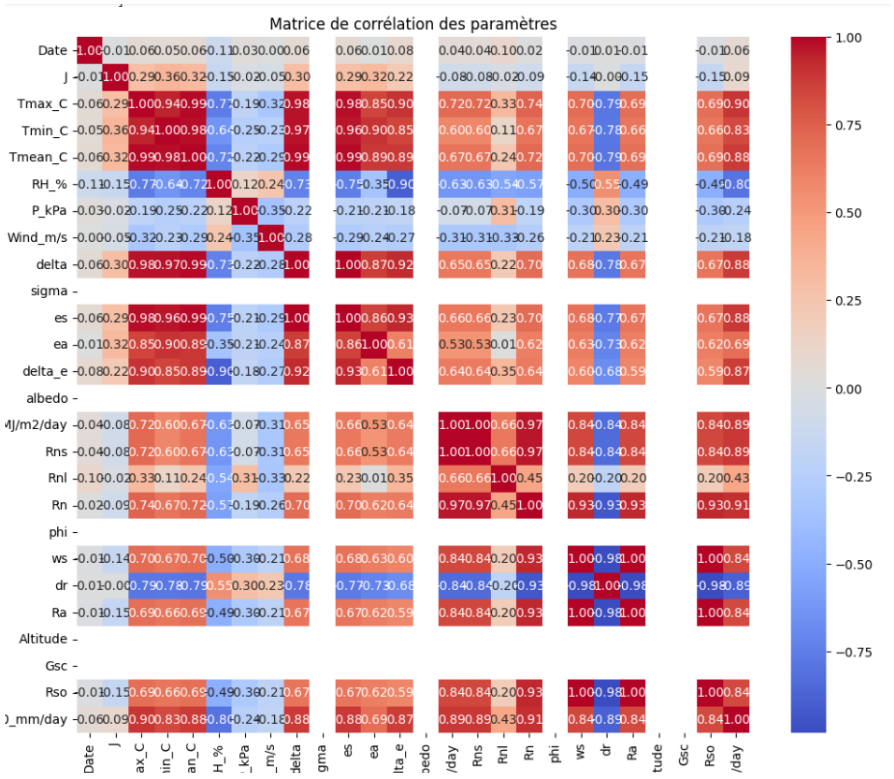


Figure III-39: Matrice de corrélation.

Cette figure III-39 montre clairement la distinction entre la variable a incidence positive et celles qui impactent négativement sur la sortie.

Tmax_C	Tmin_C	RH_%	P_kPa	Wind_m/s	delta	es	ea	ws	dr	Ra	Rso	T0_mm/day
16,82	9,43	87,04	98,7	3,47	0,098676	1,548788	1,348065	1,254442	1,032995	16,14238	12,41672	1,1
16,54	10,3	74,59	98,61	3,48	0,100358	1,567413	1,169133	1,255756	1,03298	16,19724	12,45892	1,64
17,6	8,25	70,05	98,35	2,16	0,097549	1,551909	1,087113	1,257176	1,032956	16,25649	12,50449	1,55
13,6	8,55	83,2	98,43	2	0,087638	1,3356	1,11122	1,2587	1,032922	16,32009	12,55341	1,01
13,83	6,23	84,58	99,07	2,12	0,082428	1,265579	1,070427	1,260328	1,032878	16,38803	12,60567	0,94
12,96	4,63	77,84	99,1	2,46	0,076615	1,171946	0,912243	1,262058	1,032824	16,4603	12,66126	1,15

Figure III-40: Base de données optimale après modifications.

III.6.2.2 Sélection de la technologie retenue

Nous avons choisi la technologie ANN car elle s'est révélée être la plus performante par rapport aux autres méthodes, comme le montrent les résultats présentés dans le tableau III-6 et la figure III-41, où elle affiche l'erreur la plus faible.

Tableau III-6: Comparaison des résultats des différentes technologies.

Modèle	MSE	RMSE	MAE	R^2
Régression Linéaire	0.1620	0.4025	0.2981	0.9567
ANN	0.0866	0.2942	0.1809	0.9768
DNN	0.0977	0.3126	0.2009	0.9739
CNN	0.0906	0.3009	0.1841	0.9758

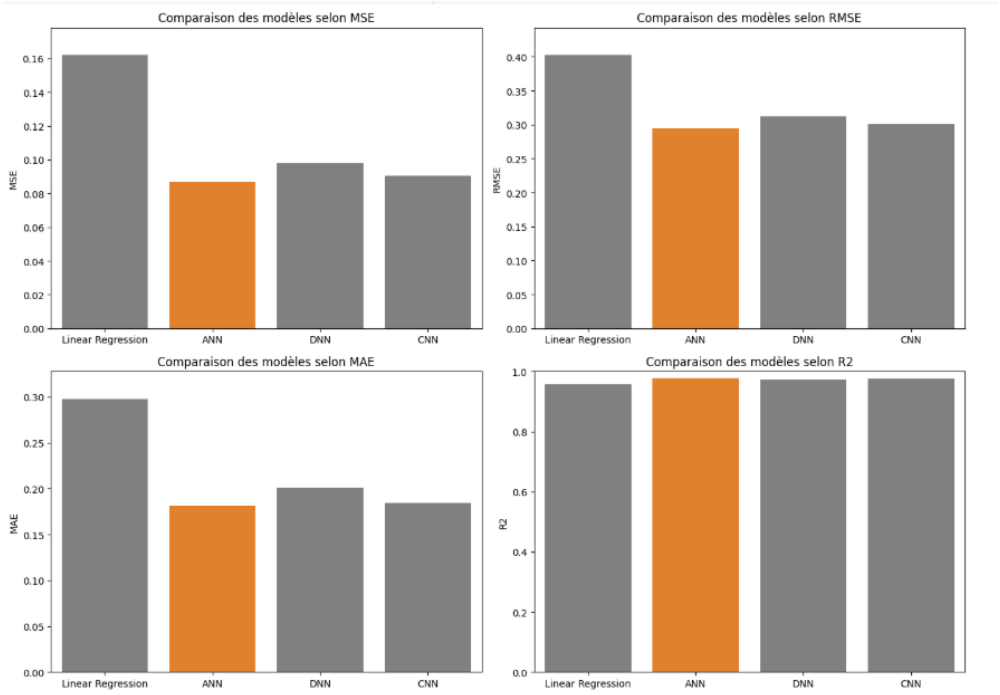


Figure III-41: Graphe des résultats de comparaison.

III.6.2.3 Résultats pour détermination du système optimal

La figure III-41 montre que le modèle ANN a été le meilleur, ce qui conforte la pertinence de notre choix.

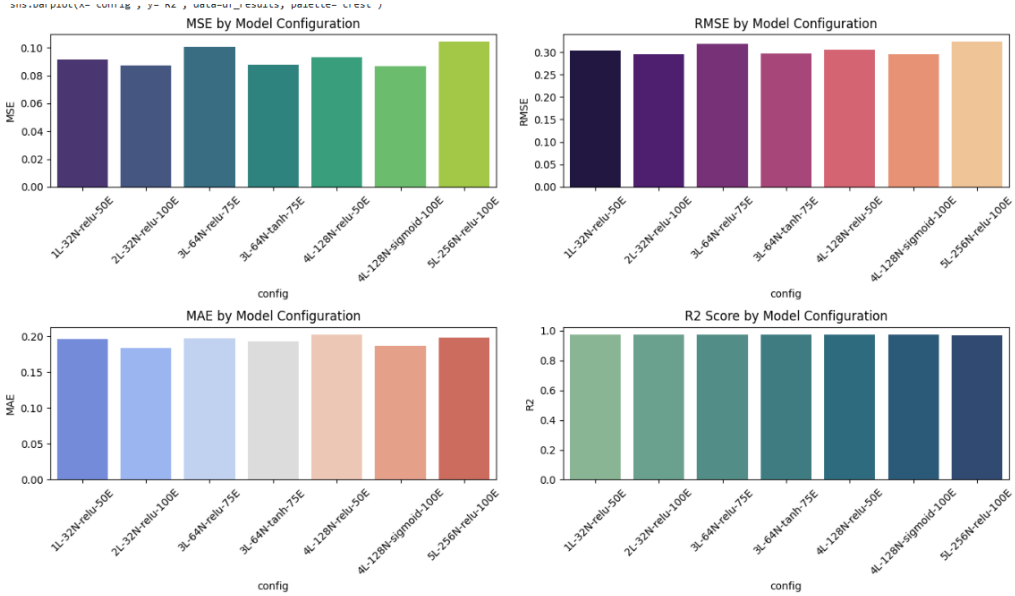


Figure III-42: Graphes simulation essais des différents modéles.

La figure III-42 indique une partie seulement de nos nombreux essais, durant lesquels nous avons modifié les fonctions d'activation, le nombre de couches, le nombre de neurones par couche, ainsi que le nombre d'époques d'entraînement. Ils montrent l'impact de ces variations sur les performances des modèles. Après ces multiples expérimentations, nous avons pu identifier des configurations offrant de meilleurs résultats.

Après avoir sélectionné le modèle optimal et procédé à son entraînement, nous l'avons évalué en fonction des résultats présentés dans les figures suivantes :

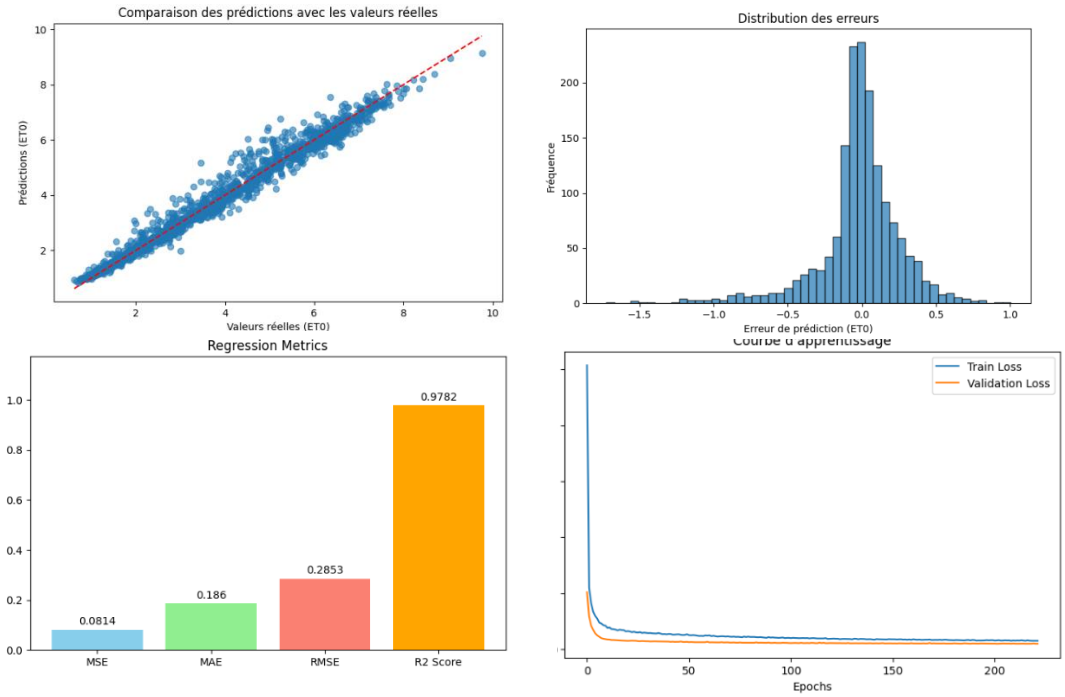


Figure III-43: Représentations des résultats obtenus du modèle optimal.

Les résultats indiquent que le modèle de régression développé offre une performance excellente pour la prédiction de la variable cible (ETO). Le premier graphique montre une relation forte et claire entre les valeurs réelles et prédites, avec la majorité des points concentrés près de la diagonale représentant une correspondance parfaite, ce qui témoigne d'une grande précision des prédictions et d'un faible biais. La distribution des erreurs révèle que la plupart des écarts entre les valeurs réelles et prédites se situent autour de zéro, reflétant ainsi une bonne stabilité et précision du modèle, avec quelques légères variations normales dans ce type d'analyse. Ces observations sont corroborées par les mesures quantitatives des performances, où le modèle affiche une faible erreur quadratique moyenne (MSE) de 0,0814, une erreur absolue moyenne (MAE) de 0,186, une racine de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) de 0,2853, ainsi qu'un coefficient de détermination (R^2) très élevé de 0,9782, indiquant que le modèle explique environ 98 % de la variance des données. Sur la base de ces résultats, il est clair que le modèle est robuste et fiable pour ses prévisions précises.

III.6.2.4 Implémentation du modèle ANN sur la carte ESP32 LoLin S3

Après avoir préparé le programme avec le modèle, il fallait le tester avant de l'intégrer dans le système principal. Cette phase de test consiste à injecter dans le modèle des données d'entrée issues de notre base existante, puis à comparer les résultats obtenus

avec ceux attendus. Si la sortie est proche de celle enregistrée auparavant, cela signifie que le modèle fonctionne bien et qu'il est prêt à être ajouté dans notre système principal. Ce contrôle garantit que l'intégration se fera sans problèmes.

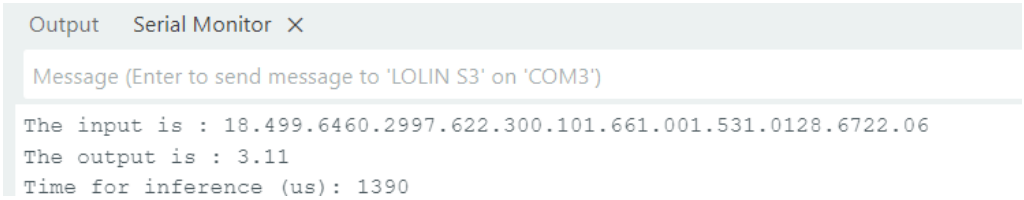


Figure III-44: Validation du modèle d'essai.

La figure III-44 nous montre clairement qu'en entrant ces valeurs dans le modèle, la sortie estimée est de 3,11, alors que la valeur réelle dans notre base de données est de 3,18. Cela correspond à une précision d'environ 97,79 %, ce qui signifie que le modèle fonctionne de manière optimum. Par conséquent, il est prêt à être intégré dans notre programme principal sans risques.

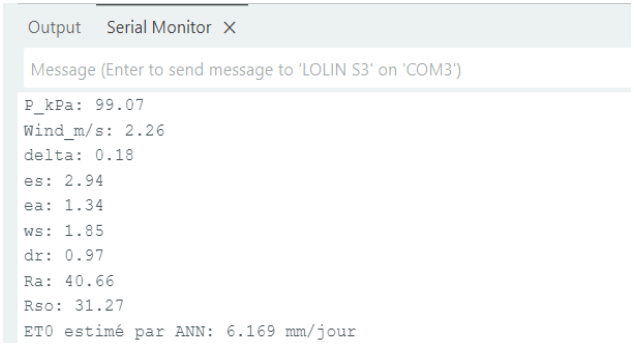


Figure III-45: Vérification d'estimation du modèle principal.

On constate sur la figure III-45 que notre système principal, après l'intégration du modèle, calcule les résultats avec succès.

III.6.3 Détection des besoins de la plante à travers son stade et son type

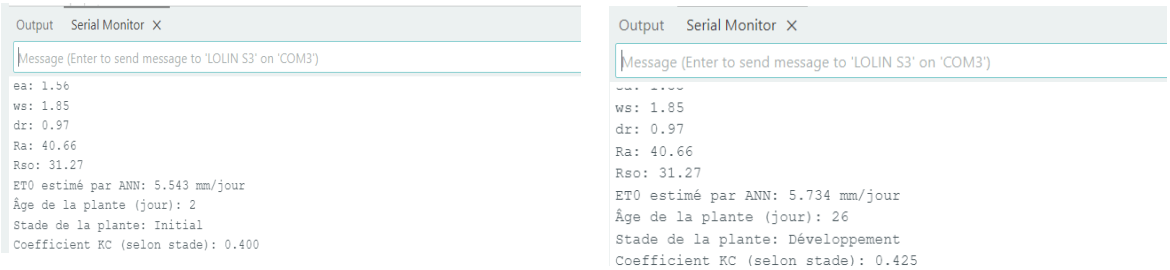


Figure III-46: Validation des informations du stade de la plante.

Comme nous pouvons le constater dans la figure III-46, notre système détermine avec précision le stade, l'âge et le coefficient (kc) de la plante. Par exemple, après la 26e

réception des données, correspondant au 26e jour, le système a correctement calculé le coefficient, car il a reconnu que les 25 premiers jours correspondent au stade initial, et que la plante est désormais entrée dans son stade de développement, selon le tableau présenté dans le chapitre 1. Ainsi, on peut affirmer que notre système effectue cette étape avec fiabilité. La phase suivante consiste à calculer les besoins de la plante, en utilisant les données d'ET0 fournies par l'ANN ainsi que le coefficient kc calculé, selon l'équation également mentionnée dans le chapitre 1.

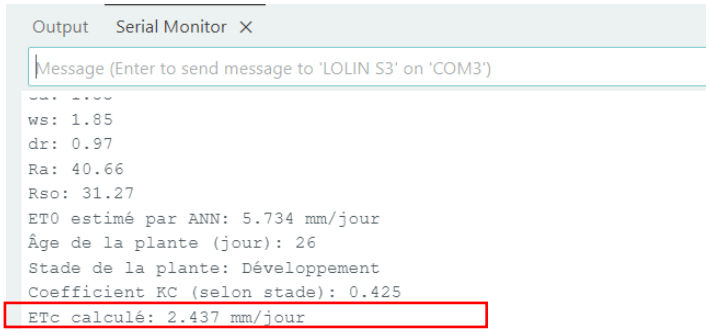


Figure III-47: Calcul opérant des besoins de la plante.

Comme nous le constatons dans la figure III-47, notre système est capable de calculer précisément les besoins en eau de la plante. Il est important de noter que cette valeur est exprimée en millimètres par jour (mm/jour), ce qui correspond à des litres d'eau par mètre carré. Par exemple, si le système indique un besoin de 2,4 mm/jour, cela signifie qu'il faut irriguer la plante avec 2,4 litres d'eau par mètre carré chaque jour.

III.6.4 Étude et analyse des caractéristiques du sol

Suite à l'analyse de sol effectuée précédemment, nous appliquons une méthode simple qui consiste à calculer le pourcentage de chaque couche par rapport à la hauteur totale du mélange.

$$Pourcentage\ de\ la\ couche = (\frac{Hauteur\ de\ la\ couche}{Hauteur\ totale}) \times 100 \qquad \textbf{Eq III-1}$$

Tableau III-7: Calcul des pourcentages des couches de sol.

Couche	Hauteur (cm)	Pourcentage (%)
Sable	4.9	62.82 %
Limon	2.2	28.20 %
Argile	0.7	8.97 %
Total	**7.8**	**100 %**

Les coefficients obtenus dans le tableau III-7 a été appliqués sur le triangle textural du sol présenté dans le chapitre 1. Cette opération nous permet de déterminer précisément le type de sol avec lequel nous travaillons.

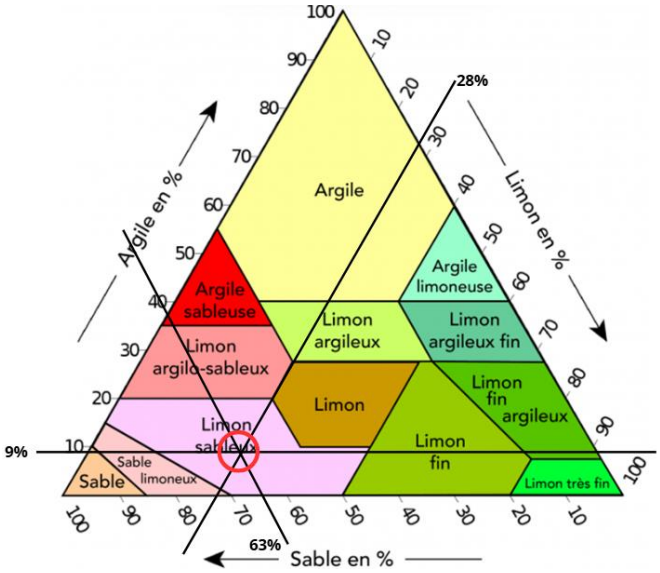


Figure III-48: Détection du type de sol.

En examinant la figure III-48, on remarque clairement que les pourcentages des trois couches du sol confirment le type de sol avec lequel nous travaillons. En effet, d'après les tableaux établis dans le chapitre 1, les valeurs de la capacité de champ (FC) et du point de flétrissement permanent (PWP) correspondent respectivement à 0,21 et 0,08 pour ce type de sol. Ces résultats nous permettent donc d'affirmer que notre analyse de sol est fiable et conforme aux caractéristiques attendues. Finalement, nous pouvons conclure que notre expérimentation a été un succès, comme l'a confirmé un ingénieur qualifié avec 32 ans d'expérience dans le domaine.

Après avoir testé notre modèle de logique floue avec des valeurs aléatoires, notamment un besoin de plante de 2 litres et une humidité du sol de 9 %, nous avons obtenu une quantité d'eau à irriguer d'environ 21 litres. Cette valeur élevée s'explique par le fait que la plante se trouve dans la zone de danger que nous avons définie : lorsque l'humidité descend en dessous de 8 %, la plante risque de mourir.

Pour valider la justesse de notre modèle, il est important de se référer aux caractéristiques physiques du sol que nous avons étudiées. Nous savons, par nos mesures avec une équation situé dans chapitre 1, que la teneur en eau du sol doit passer de 9 % à environ 13 % pour sortir de cette zone critique. La quantité d'eau nécessaire pour cette augmentation est estimée à 18 litres, calculée à partir d'une équation présentée dans le chapitre 1, qui prend en compte la densité du sol, la profondeur des capteurs, et d'autres paramètres spécifiques.

En ajoutant les 2 litres nécessaires pour le besoin spécifique de la plante, on obtient une quantité totale d'eau idéale d'environ 20 litres, proche de la valeur de 21 litres calculée par notre système. Cela signifie que notre modèle de logique floue peut estimer la quantité d'eau à irriguer avec une précision d'environ 95 %. Cette estimation reste une approximation basée sur l'expérience et l'observation, contrairement à un modèle ANN qui est purement basé sur une grande base de données.

Remarque

Dans notre modèle, nous avons volontairement exclu les intervalles d'humidité du sol inférieurs à 8 % et supérieurs à 21 %, car ces situations ne nécessitent pas de règles floues complexes. En effet, lorsque l'humidité est inférieure à 8 %, la plante a besoin d'une quantité d'eau constante pour éviter la dessiccation, tandis qu'au-delà de 21 %, le sol est considéré saturé, ne requérant aucune irrigation. Ces cas sont donc gérés par des conditions simples if-else, ce qui permet de simplifier le modèle tout en assurant des décisions appropriées face à ces conditions extrêmes.

III.6.5 Analyse des dernières étapes

Je précise que cette partie ne contient pas de complexité, ce n'est pas comme le modèle ANN. C'est pour cela qu'on a pu le convertir facilement, simplement en traduisant le code Python vers Arduino en utilisant seulement les bibliothèques adéquates.

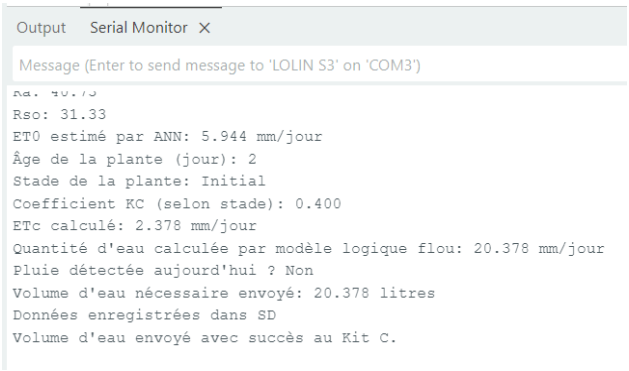


Figure III-49: Validation de processus défini.

Dans cette figure III-49, on peut observer que notre système calcule avec précision la quantité d'eau nécessaire, et voir après cette étape comment le système s'adapte aux différents cas de détection de la pluie représentés aux figures suivante :

- **Le premier cas : oui**



Figure III-50: Définition de la situation en période de pluviométrie.

- **Le deuxième cas : no**

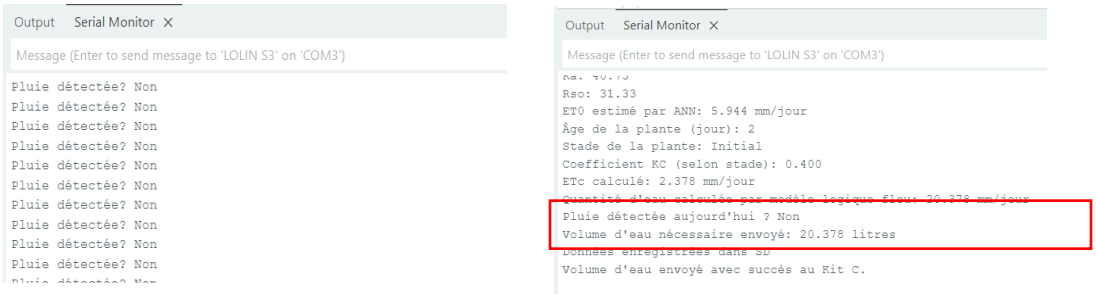


Figure III-51: Définition de la situation en période sèche.

III.6.6 Analyse du module activateur de la pompe

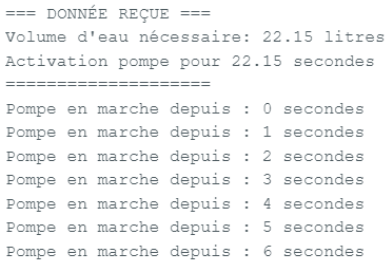


Figure III-52 : Validation de la réception de donnée et l'activation de la pompe**.**

Dans cette figure, on observe que la conversion du litre en temps s'est effectuée avec succès, et que la pompe a démarré également. On remarque que le système met en place un compteur qui décompte la durée puis arrête la pompe une fois ce temps écoulé. Cela signifie que l'on peut considérer que le système est fonctionnel et fiable.

Le module d'activation de la pompe est basé sur une carte ESP32 connectée à un relais, ce qui permet d'activer une pompe de 24 V à partir d'un signal de 5 V. Ce module comprend également la pompe elle-même, comme illustré dans la figure suivante.



Figure III-53: Réalisation initiale du module activateur de la pompe.

III.7 Difficultés rencontrées dans ce projet

La première difficulté réside dans la disponibilité limitée des anémomètres en Algérie, ce qui complique la mesure précise du vent. Ensuite, le secteur agricole en Algérie ne dispose pas de bases de données météorologiques suffisantes et fiables, ce qui nous oblige à nous appuyer sur des données externes. De plus, les données météo disponibles sont coûteuses, ce qui limite notre capacité à intégrer des prévisions météorologiques précises dans le système. Enfin, et c'est l'une des difficultés majeures, l'alimentation énergétique du projet pose problème : les batteries doivent être remplacées fréquemment pour éviter que le système ne s'arrête faute de charge, ce qui nuit à la continuité et à la fiabilité du système.

III.8 Comment notre système sera développé et amélioré à l'avenir

Tout d'abord, nous allons y intégrer une prédiction de la pluie basée sur les données collectées par le système, afin d'anticiper les précipitations avant qu'elles ne se produisent. Ensuite, nous tenterons d'intégrer l'Internet des objets (IoT), permettant aux agriculteurs disposant d'une connexion internet dans leurs exploitations, de contrôler et suivre le système à distance. En troisième lieu, nous chercherons à améliorer la précision de nos modèles afin d'optimiser encore plus la gestion de l'irrigation. Quatrièmement, nous envisagerons l'intégration de panneaux solaires pour réduire les coûts énergétiques et rendre le système plus autonome. Enfin, nous développerons le système pour qu'il soit flexible et adaptable à plusieurs cultures en même temps, afin de répondre aux besoins diversifiés des exploitations agricoles.

III.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la réalisation complète de notre système d'irrigation intelligent en détaillant les aspects matériels, logiciels et méthodologiques. Malgré les nombreux défis rencontrés, tels que la disponibilité limitée des équipements, le manque de données locales fiables, les coûts élevés des données météorologiques et les contraintes d'alimentation énergétique, nous avons réussi à développer un système fonctionnel, fiable et efficace.

Les résultats obtenus montrent que notre approche basée sur l'intégration de différentes technologies (réseaux de neurones, logique floue, capteurs variés) permet une gestion optimisée de l'irrigation. Cet accomplissement de l'objectif fixé, constitue une base solide pour poursuivre le développement et l'amélioration du système, en vue d'une application rigoureuse et pratique.

Chapitre IV :
Étude de gestion de projet.

IV.1 Premier axe : présentation du projet

IV.1.1 L'idée de projet (solution proposée)

- Le domaine d'activité dans lequel s'inscrit cette idée est principalement l'agriculture, avec une approche technologique et moderne. Ce projet concerne particulièrement les systèmes d'irrigation intelligents qui visent à améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau dans les exploitations agricoles, en utilisant des technologies telles que l'IA, l'Internet des objets (IoT) et des capteurs, tout en prenant en compte la gestion de l'eau dans des régions où l'accès à Internet est limité.
- L'idée a germé suite à une expérience personnelle réalisée lors d'un travail d'été dans le secteur agricole. Pendant cette période, j'ai observé que de nombreux agriculteurs dans la région de Médéa, en Algérie, rencontraient de graves difficultés concernant l'approvisionnement en eau et les factures d'eau élevées. La situation était aggravée par la sécheresse, qui touchait particulièrement cette région. Après avoir pris conscience de ces défis, l'idée de développer une solution d'irrigation intelligente est née. L'objectif était de proposer une technologie permettant de mieux gérer la consommation d'eau tout en optimisant les rendements agricoles.
- Le projet consiste à développer un système d'irrigation intelligente utilisant des technologies modernes comme l'IA et les capteurs d'humidité, avec une solution adaptée aux zones agricoles où l'accès à Internet est limité (90 % des zones agricoles de la région). Ce système d'irrigation serait en mesure de réguler la quantité d'eau utilisée en fonction des besoins réels des plantes et des prévisions météorologiques, réduisant ainsi le gaspillage d'eau.
- Notre projet consiste en la conception et la mise en œuvre d'un système d'irrigation intelligent permettant d'optimiser l'utilisation de l'eau dans l'agriculture. Ce système repose sur trois étapes clés : la collecte des données environnementales, leur traitement par un module central, et l'activation automatique de la pompe en fonction des besoins réels du sol. Grâce à cette approche, nous visons à réduire le gaspillage d'eau tout en assurant une irrigation efficace des cultures.
- L'équipe en charge de ce projet est composée de Bendamardji Mahrez, Billel Bengharbia et Chadli Samir, qui collaborent pour développer une solution technologique adaptée aux besoins des agriculteurs. Leurs expertises combinées avec électronique, programmation et agronomie permet d'assurer l'efficacité du système.

- Les tests du système seront menés dans la région de Médéa.

IV.1.2 Les valeurs proposées

- La modernité : Ce système répond à un besoin entièrement nouveau dans la gestion de l'irrigation agricole, un domaine où il n'existait pas de solution comparable auparavant. L'irrigation intelligente, avec son utilisation des technologies modernes telles que l'IA, les capteurs et l'automatisation, permet de répondre à des besoins en eau tout en optimisant la consommation.
- La performance : Le système d'irrigation intelligente dépasse les attentes en matière de gestion de l'eau. Il permet d'ajuster précisément l'irrigation en fonction des besoins réels des plantes, ce qui garantit des rendements élevés tout en réduisant le gaspillage d'eau.
- La flexibilité : Le système est flexible grâce à son adaptation aux conditions météorologiques et aux spécificités des sols agricoles. Il peut être facilement ajusté en fonction des différents types de cultures et des besoins changeants des agriculteurs.
- Accomplissement des tâches : Ce projet aide les agriculteurs à accomplir des tâches précises, notamment l'irrigation de leurs cultures, en automatisant le processus et en le rendant plus précis. Les agriculteurs n'ont plus à se soucier des décisions quotidiennes liées à l'irrigation.
- La conception : Le système est conçu pour répondre aux attentes spécifiques des agriculteurs, en tenant compte du contexte local de la région de Médéa, notamment des défis liés à la sécheresse et à la gestion de l'eau.
- Réduire les coûts : En optimisant l'utilisation de l'eau et des ressources énergétiques, le système permet de réduire les coûts de production et donc, de proposer des solutions plus économiques aux agriculteurs, contribuant ainsi à la réduction des factures d'eau.
- Réduction des risques : Le système minimise les risques associés à la gestion inefficace de l'eau en apportant des solutions plus sûres et en sécurisant les agriculteurs contre les pénuries d'eau et la surexploitation des ressources.
- Accessibilité : Ce système d'irrigation permet aux agriculteurs, en particulier dans les zones rurales de la région de Médéa, d'accéder à une technologie avancée qu'ils n'auraient pas pu envisager auparavant, en raison de l'accès limité aux solutions modernes.
- Facilité d'utilisation : Aucune intervention humaine.

IV.1.3 Équipe de travail

- **BENGHERBIA Billel**

- **CHADLI Samir**

- **BENDAMARDJI Mahrez**

Étudiant en fin de cycle, Master 2 système de télécommunication à la faculté de technologie de l'université Yahia Fares de Médéa.

❖ **Titulaires des diplômes suivants :**

- Licence en système de télécommunication.
- Diplôme étudiant 5 étoile.

❖ **Expérience professionnelle**

- Stage Sonatrach 1 mois.
- Stage Algérie télécom 15 jour.

IV.1.4 Objectifs du projet :

- **Objectifs à court terme :**

Mon objectif à court terme est de vendre 44 systèmes d'irrigation sur le marché local la première année. Je vise à atteindre une clientèle ciblée, principalement dans la région de Médéa, en répondant aux besoins spécifiques des agriculteurs en matière d'irrigation intelligente. Ce premier objectif me permettra de tester le marché et de valider le fonctionnement du système dans des conditions réelles d'exploitation.

- **Objectifs à moyen terme :**

À moyen terme, mon objectif est de déployer 59 et 74 systèmes la 2eme et 3eme année a travers le territoire national.

- **Objectifs à long terme :**

À long terme, mon ambition est de faire en sorte que la valeur de marché de ma société dépasse les 60 millions de dinars de chiffres d'affaires. Cela passera par une expansion progressive, non seulement au niveau ressources humaines, investissements et aussi une prospection rigoureuse ainsi qu'une sensibilisation importante des agriculteurs.

IV.1.5 Calendrier de réalisation du projet :

		oct	nov	Dec	janv	fev	Mars	Avr	Mai	Juin
1	Réflexion, étude préalable et fixation du projet	✔	✔	✔	✔					
2	Listing du matériel nécessaire pour le projet				✔					
3	Commande et réception du matériel					✔	✔			
4	Développement de la base de données et programmes						✔	✔		
5	Réalisation du prototype							✔	✔	✔

IV.2 Deuxième axe : Aspects innovants

IV.2.1 Nature des innovations

On considéré que notre projet est une innovation technologique car il existe déjà

des système d'irrigation sur ce marché Algérien, notre projet contient des technologies innovantes qui le rend plus performant.

IV.2.2 Domaines d'innovation :

Dans l'ensemble, l'innovation de notre projet est décrite comme suit :

- Incorporation de plusieurs capteurs plus performants.
- Intégration des dernières technologies telles que l'IA et le logique floue.
- Adaptation d'un réseau de capteurs sans fils afin de permettre une utilisation autonome plus efficace.
- Minimiser au maximum les couts de production du système.
- Le système tient compte des besoins de la plante en temps réel, en fonction de sa nature et de son Age ainsi que le type du sol dans lequel elle est plantée.
- Le système s'arrête automatiquement lors des précipitations pluviales quelles que soit leurs volumes.

IV.3 Troisième axe : Analyse stratégique du marché

IV.3.1 Segments du marché

Les clients ciblés sont tous les agriculteurs en Algérie, car ce système leur permet une économie considérable de l'eau et une souplesse dans la gestion de l'irrigation de leurs cultures .

Le nombre d'agriculteurs en Algérie important en constante augmentation compte tenu de la politique nationale en matière de l'agriculture et l'autosuffisance.

Le marché ciblé est l'agriculture qui est actuellement considérée comme segment stratégique dans l'autosuffisance alimentaire et dont la rente financière est très considérable.

Eu égard à nos contacts avec les agriculteurs pendant le recensement national agricole 2024 auquel on a participé, et compte tenu des bénéfices que peut apporter notre système, & constaté une adhésion d'environ 80% des agriculteurs à notre système et sont prêt à contracter avec notre future entreprise dans le cas ou notre système est fiable.

IV.3.2 Mesure de l'intensité de la concurrence

L'analyse des systèmes d'irrigation effectuée sur le marché actuel montre qu'il existe des entreprises concurrentes qui fabriquent des systèmes d'irrigation automatiques fonctionnels mais qui manquent de précision.

Par ailleurs, certains concurrents indirects existent, notamment :

- Le soutien de l'État pour les ouvrages hydro-agricoles qui est dominant, accessible difficilement pour ses conditions d'éligibilité

- Les bureaux d'étude (BET) réalisent des Prévisions techniques en matière d'irrigation qui, malgré leurs précisions restent théoriques.

IV.3.3 La stratégie marketing

Convaincre les agricultures des effets positifs dans la cause en places d'un tel système à savoir :

- Economie d'eau d'où réduction, de temps d'arrosage et quantité d'eau, ce qui permet un gain énorme de couts.
- Meilleure croissance des plantes ayant pour résultats une augmentation de la production.

Les arguments précités, se sont complétés par une compagne promotionnelle dès démarrage de notre entreprise tel que :

- Essai gratuit pendant 4 mois.
- Service après-vente gratuit la 1 ère année .

IV.4 Quatrième axe : Plan de production et d'organisation

IV.4.1 Le Processus de production

Pour produire notre système d'irrigation, il est impératif de suivre des étapes indispensables et qui sont les suivantes :

Acquérir le Matériel nécessaire a la fabrication du systèmes a savoir les capteurs, les carte électroniques, le fil PLA, les carte PCB et les cartons d'emballage.

Réception du matériel, ce dernier sera inventorié et stocké.

Après cette étape, il sera procédé au démarrage de trois chaines de fabrication des 3 modules au niveau de chaque chaine, il sera effectué la fabrication de la carte PCB, montage des composants e soudure.

Ensuite, il y'aura l'implémentation du programme propre a chaque carte, ensuite synchronisation et en fin le test.

Le système sera finalisé par la conception du boitier par impression 3D et emballage Ces étapes sont résumées dans l'organigramme suivant :

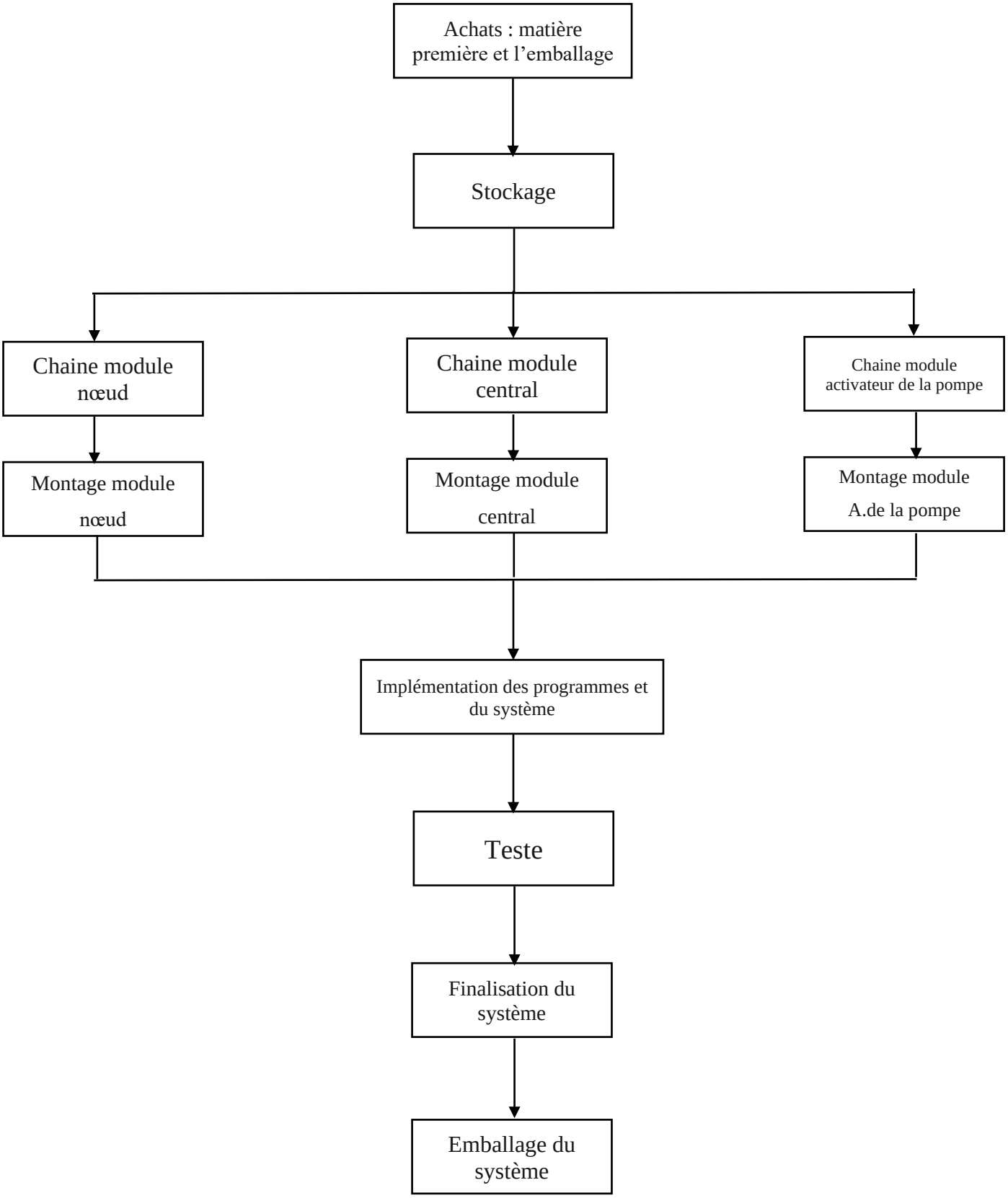


Figure IV-1: Représentation du processus de production.

IV.4.2 L'Approvisionnement

- Identification des fournisseurs et négociants de contrats pérennes sur plusieurs années dans la mesure de possible aux conditions financières suivantes :
  - Crédits fournisseurs a tenue prédéfini.
  - Credoc a 90 jours.

  Afin de garantir les meilleurs couts pour les matières processus.
- Choisir les imprimantes les plus performantes techniquement ayant pour une meilleure qualité, prix et formation du nos employons afin d'optimiser la cadence de notre production.
- Définition d'un emballage certain solide et pratique pour le système.

IV.4.2.1 Liste des fournisseurs potentiels

- MHTronic (Alger).
- Orbit Electronic (Alger-ben Aknoun).
- Dz automation (Oran)
- Entreprise nationale des industries électronique (sidi bel abbés) .
- Site web comme Alibaba et Ali express.

IV.4.3 La main d'œuvre

- **Nombre et répartition des postes**

Le projet prévoit la création de 10 postes permanents répartis comme suit : un gérant pour la supervision globale, un chef commercial chargé des ventes et marketing, un agent logistique pour la gestion des stocks, quatre techniciens spécialisés en production (montage, soudage, tests), un chauffeur-livreur, et deux techniciens de maintenance intervenant chez les clients. Cette structure couvre l'ensemble des besoins opérationnels de la chaîne de valeur.

- **Profil et localisation des équipes**

La main-d'œuvre requise combine des profils cadres (gérant, chef commercial) et techniques (production, maintenance). Les techniciens de production travailleront en atelier, tandis que les équipes mobiles (chauffeur, techniciens SAV) interviendront sur le terrain. Le chef commercial et le gérant opéreront depuis le siège, avec l'agent logistique basé dans la zone de stockage.

- **Externalisation complémentaire**

Pour les besoins ponctuels ou spécialisés, le projet pourra recourir à des partenaires externes : sous-traitance de manutention lourde, prestataires pour études techniques

pointues, ou consultants en optimisation industrielle. Cette flexibilité permettra de maintenir un effectif permanent optimisé tout en répondant aux pics d'activité ou besoins spécifiques.

IV.4.4 Les Principaux partenaires

Parmi les institutions qui ont joué un rôle clé dans la réussite de ce projet, on peut citer :

- **L'Université de Médéa :** Son soutien aux start-ups à travers des outils essentiels et des formations spécialisées.
- **Partenaires potentiels futurs :**

- Les banques,pour le financement du projet et les structures de l'Etat pour une aide sur le plan administratif .

IV.5 Cinquième axe : Plan financier

ANNEXE 1

IV.5.1 Prix de revient système

Module nœud

Tableau IV-1: Prix de revient module nœud.

Matériel	Prix
Capteur humidité de sol	350 DA
Capteur de température	1000 DA
Capteur d'humidité de l'air	500 DA
Carte électronique ESP 32 WROOM	1700 DA
Feux tricolore	200 DA
Carte PCB	700 DA
Boitier	3000 DA
Module RTC	450 DA
Câbles	200 DA
Système alimentation batterie lithium avec support	3000 DA
S/T Matériel	**11100 DA**
Main d'œuvre installation et mise en œuvre (15 h x taux horaire 1080 DA voir annexe)	16200 DA
Frais structure (voir annexe)	19260 DA
Prix de revient module nœud pour 1 unité	**46560 DA**
Marge 10%	**51216 DA**
Prix de vente arrondi	**51220 DA**

Module central

Tableau IV-2: Prix de revient module central.

Matériel	Prix
Capteur anémomètre	14000 DA
Capteur détection de pluie	350 DA
Capteur de pression	2000 DA
Carte PCB	700 DA
Carte électronique ESP 32 Lolin s3	3500 DA
Feux tricolore	200 DA
Module SD	600 DA
Carte SD	1000 DA
Câbles	150 DA
Boitier	3000 DA
Système alimentation batterie lithium avec support	3000 DA
S/T Matériel	**28500 DA**
Main d'œuvre installation et mise en œuvre (15 h x taux horaire 1080 DA voir annexe)	16200 DA
Frais structure (voir annexe)	19260 DA
Prix de revient module nœud pour 1 unité	**63960 DA**
Marge 10%	**70 356DA**
Prix de vente arrondi	**70 360 DA**

Module activateur de la pompe

Tableau IV-3: Prix de revient module activateur de la pompe.

Matériel	Prix
Relai	400 DA
Carte électronique ESP 32 WEROOM	1700 DA
Feux tricolore	200 DA
Boitier	3000 DA
Câbles	100 DA
Débit mètre	1500 DA
S/T Matériel	**6900 DA**
Main d'œuvre installation et mise en œuvre (10 h x taux horaire 1080 DA voir annexe)	10800 DA
Frais structure (voir annexe)	19260 DA
Prix de revient module nœud pour 1 unité	**36960 DA**
Marge 10%	**40 656 DA**
Prix de vente arrondi	**40 660 DA**

Tableau IV-4: Prix de revient pour une superficie de 2500 m2(25 ares).

	Prix de revient	Prix de vente
Module nœud	46560 DA	51220DA
Module central	63960 DA	70 360 DA
Module activateur de la pompe	36960 DA	40 660 DA
Totaux	**147480 DA**	**162 240 DA**

Remarque :

- Pour les surfaces supérieures à 2500 M2, il faudra rajouter un module nœud tous les 2500 M2.

- Les prix mentionnés sont de l'année 2025 a un instant « T », ils peuvent évoluer sur le marché national en fonction du Taux de change de la devise et de la disponibilité du matériel .

ANNEXE 2

IV.5.2 DETAIL DE LA PRODUCTION EN QUANTITE

Tableau IV-5: Volume global d'heures de production.

	Poste	1 ère année	2ème année	3ème année
Bases	Tech maintenance	1	1	1
	Tech production	2	3	4
Total heures production (n.p x n.h) pendant 10 mois		**5100 h** (3 x 170h x10)	**6800 h** (4 x170h x10)	**8500 h** (5 x170 h x 10)

Considérant un système moyen composée de 6 modules nœud +1 module central + 1 module activateur module pompe.

Tableau IV-6: Heures nécessaires pour la fabrication d'un système.

	Module nœud	Module central	Module activateur de la pompe	
Quantités	6	1	1	
Temps de production par module	15 h	15 h	10 h	
Total heures production	**90 h**	**15 h**	**10 h**	**115 h**

Tableau IV-7: Nombre de systèmes fabriqués chaque année.

	1 ère année	2éme année	3éme année
Module nœud	264	354	444
Module central	44	59	74
Module activation de la pompe	44	59	74
Totaux des modules	**352**	**472**	**592**
Nombre de système	**44**	**59**	**74**

Tableau IV-8: Détail frais de Structure annuels en DA (voir Annexe détail des charges).

Frais généraux	**Montants (1ere année)**
Salaires & charges	5459400
Location Bureaux	840000
Electricité	180000
Téléphone et internet	240000
Entretien général	60000
Totaux	**6 779 400**
Nombre de modules	352
Cout par module	**19260**

Tableau IV-9: Calcul Taux horaire en DA.

Salaires	1 Téch.maint	840000
	2 Téch.Prod	1920000
Charge sociales 35%		966000
Charges connexes	Missions	1782000
	Déplacement	
	Indemnités	
Total couts main d'œuvre production		**5 508 000**
Nombre D'heures production 1ere année		**1080**

*(montant main d'œuvre production / volume annuel heures production)

Tableau IV-10: Valeurs matières premières consommées en DA.

	1ere année			2éme année			3éme année		
	Qte	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**
Module nœud	264	11 100	2 930 400	354	11 100	3 929 400	444	11 100	4 928 400
Module Central	44	28 500	1 254 000	59	28 500	1 681 500	74	28 500	2 109 000
Module activateur de la pompe	44	6 900	303 600	59	6 900	407 100	74	6 900	510 600
Totaux			**4 488 000**			**6 018 000**			**7 548 000**

Tableau IV-11: Valeurs production stockée en DA.

	1ere année			2éme année			3éme année		
	Qte	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**
Module nœud	18	46 560	838 080	26	46 560	1 210 560	34	46 560	1 583 040
Module Central	3	63 960	191 880	5	63 960	319 800	2	63 960	127 920
Module activateur de la pompe	3	36 960	110 880	5	36 960	184 800	2	36 960	73 920
Totaux			**1 140 840**			**1 715 160**			**1 784 880**

Tableau IV-12: Détail des quantités et montants de chiffre d'affaires.

	1ere année			2éme année			3éme année		
	Qte	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**	**Qte**	**P.unit**	**Mont**
Module nœud	264			354			444		
- stock 31/12	-18			-26			-34		
+ stock 01/01	0			+18			+26		
Total	**246**	**51 220**	**12 600 120**	**346**	**51 220**	**17722120**	**436**	**51 220**	**22331920**
Module Central	44			59			74		
- stock 31/12	-3			-5			-2		
+ stock 01/01	0			+3			+5		
Total	**41**	**70 360**	**2 884 760**	**57**	**70 360**	**4010520**	**77**	**70 360**	**5417720**
Module activateur de la pompe	44			59			74		
- stock 31/12	-3			-5			-2		
+ stock 01/01	0			+3			+5		
Total	**41**	**40 660**	**1 667 060**	**57**	**40 660**	**2317620**	**77**	**40 660**	**3130820**
Totaux			**17 151 940**			**24050260**			**30880460**

Tableau IV-13: Détail investissement.

		Montant en DA
Investissements	Agencement	150 000
	2 imprimantes 3D	1 000 000
	Mobilier	250 000
	Fourgon	3 500 000
	Petit outillage	200 000
	Total	**5 100 000**
Amortissements 20%	1ere année	**1 020 000**
	2eme année	**1 020 000**
	3eme année	**1 020 000**

Tableau IV-14: Financement bancaire (estimation).

		Montant DA
Prêt	Investissements	5 100 000
	4 mois salaires et charges (9185400 x 4/12)	3 061 800
	3 mois stock matières premières (4 488 000 x3/12)	1 122 000
	Montant de location	840 000
	Autres charges	76 200
	Total prêt	**10 200 000**
Calendrier de Remboursement	1ere année	2 000 000
	2eme année	3 000 000
	3eme année	4 000 000
	4eme année	1 200 000
Paiement des Intérêts (12% l'an)	1ere année (10 200 000 x 12%)	1 224 000
	2ieme année (8 200 000 x 12%)	984 000
	3ieme année (5 200 000 x 12%)	624 000
	4ieme année (1 200 000 x 12%)	144 000
	Total remboursable	**13 176 000**

Tableau IV-15: Détail des charges prévisionnelles.

	1ere année			2éme année			3éme année		
Désignations	**NB**	**Mensuel**	**Annuel**	**NB**	**Mensuel**	**Annuel**	**NB**	**Mensuel**	**Annuel**
Salaire et charge sociales									
Gérant	1	150 000*	1800000	1	150 000	1800000	1	150 000	1800000
Agent commercial et administratif	1	70 000*	840000	1	70 000	840000	1	70 000	840000
Agent stock, emballage,expédition	1	50 000*	600000	1	50 000	600000	1	50 000	600000
Technicien de maintenance	1	70 000**	840000	2	72 000	1728000	2	72 000	1728000
Chauffeur	1	42 000*	504000	1	45 000	540000	1	45 000	540000
Technicien de production	2	80 000*	1920000	3	85 000	3060000	4	900 000	4320000
2 manutentionnaires (temps partiel)	1	25 000*	300000	1	25 000	300000	1	25 000	300000
Total salaires			**6804000**			**8868000**			**10128000**
Charge sociales 35%			**2381400**			**3103800**			**3544800**
Total salaires et charges			**9185400**			**11971800**			**13672800**
Services									
Location bureaux ou local		70 000*	840000		75 000	900000		80 000	960000
Électricité		15 000*	180000		17 000	204000		19 000	228000
Téléphone et internet		20 000*	240000		22 000	264000		24 000	288000
Transport et déplacement		20 000	240000		22 000	264000		24 000	288000
Entretient général		5 000*	60000		6 000	72000		8 000	96000
Publicité		20 000	240000		20 000	240000		20 000	240000
Autre frais assurances		5 000	60000		5 000	60000		5 000	60000
Total de services			**1860000**			**2004000**			**2160000**
Total général			**11045400**			**13975800**			**15832800**

*Frais de structure

** Frais de production

Tableau IV-16: Tableau des comptes de résultats prévisionnel.

		1ere année		2éme année		3éme année	
PCN	**Désignations**	**Débits**	**Crédits**	**Débits**	**Crédits**	**Débits**	**Crédits**
70	**Ventes marchandises**		0		0		0
60	**Marchandises consommées**	0		0		0	
80	**Marge brute**	0	0	0	0	0	0
80	**Marge brute**	0	0	0	0	0	0
71	**Production vendu**		17 151 940		24 050 260		30 880 460
72	**Production stockée**		1 140 840		1 715 160		1 784 880
	Matières et fres						
61	**Consommées**	4 488 000		6 018 000		7 548 000	
62	**Services**	1 860 000		2 004 000		2 160 000	
81	**Valeur ajoutée**		**11 944 780**		**17 743 420**		**22 957 340**
81	**Valeur ajoutée**		**11 944 780**		**17 743 420**		**22 957 340**
63	**Frais de personnel**	9 185 400		11 971 800		13 672 800	
65	**Frais financiers**	1 224 000		984 000		624 000	
68	**Dotation Amortissements**	1 020 000		1 020 000		1 020 000	
83	**Résultats d'exploitation**		**515 380**		**3 767 620**		**7 640 540**
79	**Produits hors expl**		0		0		0
69	**Charges hors expl**	0		0		0	
84	**Résultat hors expl**	0	0	0	0	0	0
83	**Résultat d'exploitation**		515 380		3 767 620		7 640 540
84	**Résultat hors expl**	0		0		0	
880	**Résultat brut exercice**		**515 380**		**3 767 620**		**7 640 540**
889	**Impôt bénéfices**	0		0			
88	**Résultat exercice**		**515 380**		**3 767 620**		**7 640 540**

Tableau IV-17: Bilan prévisionnel actif.

	1ere année			2eme année			3eme année		
Désignations	Brut	Amort	Net	Brut	Amort	Net	Brut	Amort	Net
INVESTISSEMENTS									
Equipement de production	5 100 000	1 020 000	4 080 000	5 100 000	2 040 000	3 060 000	5 100 000	3 060 000	2 040 000
Total 1	**5 100 000**	**1 020 000**	**4 080 000**	**5 100 000**	**2 040 000**	**3 060 000**	**5 100 000**	**3 060 000**	**2 040 000**
STOCKS									
Matières et fournitures			1 860 000			2 325 000			3 255 000
Produits finis			1 140 840			1 715 160			1 784 880
Total 2			**3 000 840**			**4 040 160**			**5 039 880**
CREANCES									
Créances sur clients			3 278 890			4 653 270			6 436 262
Disponibilités			1 151 000			2 230 520			4 520 218
Total 3			**4 429 890**			**6 883 790**			**10 956 480**
Total actif			**11 510 730**			**13 983 950**			**18 036 360**

Tableau IV-18: Bilan prévisionnel passif.

Désignations	1ere année	2ème année	3ème année
FONDS PROPRES			
Capital	200 000	200 000	200 000
Résultats antérieurs	0	515 380	3 767 620
Total 1	**200 000**	**715 380**	**3 967 620**
DETTES			
Fournisseurs	0	525 000	342 000
Emprunts et dettes financières	10 200 000	8 200 000	5 200 000
Dettes d'exploitation	595 350	775 950	886 200
Total 2	10 795 350	9 500 950	6 428 200
Résultats de l'exercice	515 380	3 767 620	7 640 540
Total passif	**11 510 730**	**13 983 950**	**18 036 360**

Type de société : SARL (société à responsabilité limitée) au capital de 200 000 DA

IV.5.3 Business Model Canvas

<table>
<tr><th>Key Partner</th><th>Key Activités</th><th>Value Propositions</th><th>Customer Relationship</th><th>Customer segments</th></tr>
<tr><td rowspan="2">- Fournisseur du matériels nécessaires.
- La banque.
- Les sociétés de livraison.
- Un bureau d’étude comptabilité.</td><td>- Acquisition et achat de matières nécessaires
- Montage de produit.
- Programmation et test du produit.
- Emballage.
- Installation
- Maintenance et service après-vente</td><td rowspan="2">- Automatisation complète
- Technologie innovante
- Économie d’eau
- Gain de temps et d’effort
- Réduction des coûts
- Sécurisation de l’investissement
- Amélioration de la production
- Coût abordable</td><td>- Garantie de 1 ans sur le produit
- Service après-vente gratuit pendant 4 mois.
- Livraison gratuite du système.
- Possibilité d'achat par bon de commande.
- Assistance permanente : réponse rapide aux demandes et accompagnement dans la résolution des problèmes.</td><td rowspan="3">Clients principaux :

- Agriculteurs.
- Fermes pilotes.
- Institut technique de l'arboriculture fruitière et de la viticulture.
- Institut technique des cultures maraîchères et industrielles.
- Institut technique des grandes cultures.

Clients secondaires :

- Particuliers possédant un jardin.
- Pépinières.
- Magasins .
- d'équipement d'irrigation.</td></tr>
<tr><td>Key Ressources
- Ressources financières : fonds de roulement.
- Ressources humaines : montage, programmation, stockage……
- Ressources matérielles : imprimantes 3D, capteurs….
- Ressources intellectuelles : idées protégées.</td><td>Channels
Le produit sera vendu en magasin, en ligne et directement par l’entreprise, avec une diffusion publicitaire sur les réseaux sociaux. Un programme de parrainage offrira des avantages aux agriculteurs qui apportent des clients.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Cost Structure
- charges d’investissement (équipement informatiques, outillage pour le montage).
- Effectifs et employés, matières et composants et emballage.
- Factures et charge (location de locale, énergie électrique, téléphone et internet…etc).</td><td colspan="2">Revenue Streams
- Revenues des ventes.
- Maintenance après la période garantie.</td></tr>
</table>

Conclusion Générale.

Face aux enjeux environnementaux, économiques et sociaux auxquels est confrontée l'agriculture moderne, il devient indispensable d'adopter des solutions technologiques capables de concilier performance, durabilité et rationalisation des ressources. Ce travail s'inscrit dans cette dynamique en proposant la conception et la réalisation d'un système d'irrigation intelligent, basé sur l'intégration de capteurs, de modèles d'intelligence artificielle et de logique floue.

À travers les différentes étapes de ce projet, nous avons démontré qu'il est possible de concevoir un système autonome capable de détecter les besoins réels des plantes et d'adapter l'irrigation en fonction de plusieurs paramètres : le type de culture, les caractéristiques du sol et les conditions climatiques. Ce système permet ainsi de limiter le gaspillage d'eau, de préserver les ressources naturelles et d'optimiser la productivité agricole.

En plus de l'aspect technique, notre étude a mis en évidence les perspectives économiques et stratégiques du projet, en le positionnant comme une solution innovante et compétitive sur le marché de l'agriculture. Les résultats obtenus sont encourageants et ouvrent la voie à de futures améliorations, notamment par l'intégration de nouvelles sources de données, l'optimisation des modèles d'apprentissage, ou encore l'extension du système à d'autres cultures et environnements.

En conclusion, ce projet constitue une avancée significative vers une agriculture plus intelligente et connectée, et nous espérons qu'il contribuera, à son échelle, à répondre aux grands défis de demain en matière de sécurité alimentaire et de gestion durable des ressources hydriques.

Bibliographie

[1] :Contribution au développement d'un système d'aide au diagnostic en agriculture de précision dans la région de Chaudière-Appalaches, Mémoire de fin d'études, 2024.

[2] :L'agriculture de précision : Comment l'intelligence artificielle (IA) a révolutionné l'irrigation des cultures ?, Mémoire, 2024.

[3] : Contribution à l'étude des plantes spontanées dans les oasis de Biskra (cas de la région de Ain Ben Noui), Mémoire de Master, Université de Biskra, 2021.

[4] :Étude et réalisation d'un système d'irrigation intelligente, Mémoire, 2019.

[5] : Réalisation d'un système intelligent de gestion d'agriculture, Mémoire, 2022.

[6] :Étude et réalisation d'un système d'irrigation intelligente, Mémoire, 2021.

[7] :République Algérienne Démocratique et Populaire, *Stabilisation d'un sol argileux par un nouveau liant et une fibre naturelle*, Mémoire, 2024.

[8] : L'effet des amendements organiques sur les paramètres biométriques de la tomate, Mémoire, 2024.

[9] :D. Hillel, *Environmental Soil Physics*, Internet Archive. [En ligne] : https://archive.org.

[10] :J. Gong, X. Liu, J. Liu, Y. Li et S. Zhao, "Hazard evaluation of mountain flood disaster based on multi-source remote sensing information – A case study in city of rain, Ya'an," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 794, no. 1, mai 2020. doi: 10.1088/1757-899X/794/1/012008.

[11] :N. C. Brady et R. R. Weil, *The Nature and Properties of Soils*, 15e éd., Pearson. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/301200878.

[12] :Google Mail – Interface de messagerie personnelle. [En ligne] : https://mail.google.com/mail/u/4/#sent?projector=1.

[13]: FAO, *Irrigation and Drainage Paper No. 56*. Disponible sur : https://www.researchgate.net/publication/284300773.

[14]: J. Monteith et M. Unsworth, *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*, 4e éd., Elsevier, 2013. doi: 10.1016/C2010-0-66393-0.

[15] :U. Abou et B. Belkaid-Tlemcen, *Réalisation d'un prototype d'un réseau de capteurs sans fil dédié à l'agriculture de précision*, Mémoire, 2015.

[16] : D. Hamdan, *Détection et diagnostic des fautes dans des systèmes à base de réseaux de capteurs sans fils*, Thèse de doctorat, 2013. Disponible sur : https://theses.hal.science/tel-00953241.

[17] : *Un Prototype de Réseaux de Capteurs sans Fil pour l'Agriculture et le Contrôle de l'Environnement*, [En ligne] : https://www.researchgate.net/publication/280751453.

[18] : U. Mohamed Boudiaf, *Modèles de machine learning pour la prédiction de la consommation en énergie électrique – Cas d'étude : La société Sonelgaz*, Mémoire, 2022.

[19] : U. M. Khider, *Une approche intelligente pour la santé (Aide au diagnostic du cancer de la peau)*, Université de Biskra, 2019.

[20] : U. Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen, *Prédiction des propriétés des matériaux par apprentissage automatique*, Mémoire, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique.

[21] : M. Taffar, *Initialisation à l'apprentissage automatique*, Document pédagogique.

[22] : U. Abderrahmane et M. De Béjaia, *Machine Learning et Application en finance*, Mémoire, 2019.

[23]: F. Galton, "Kinship and correlation," *Statistical Science*, publication académique.

[24] : Amazon Web Services, *Qu'est-ce que la régression linéaire ?*, [En ligne] : https://aws.amazon.com/fr/what-is/linear-regression/.

[25] : J. Robert, *La régression logistique, qu'est-ce que c'est ?*, [En ligne] : https://datascientest.com/regression-logistique-quest-ce-que-cest.

[26] : Clustering – *Définition, Mode d'emploi et Applications*, Appvizer. [En ligne] : https://www.appvizer.fr/magazine/services-informatiques/gestion-informatique/clustering-glossaire.

[27] : Apprentissage *par renforcement utilisant des réseaux de neurones, avec des applications au contrôle moteur*, Mémoire, 2022.

[28] : U. L. Tebessi, *Recalage des images médicales par apprentissage profond*, Mémoire, 2021.

[29] : Python, *Deep Learning*, Documentation technique.

[30] : U. Saad et D. Blida1, *Analyse de sentiments dans la langue arabe en utilisant différentes approches*, Mémoire, 2020.

[31] : Introduction *aux fonctions d'activation dans les réseaux neuronaux*, DataCamp. [En ligne] : https://www.datacamp.com/fr/tutorial/introduction-to-activation-functions-in-neural-networks.

[32] : U. Larbi Tébessi, *Apprentissage profond pour la classification d'images*, République Algérienne Démocratique et Populaire, Mémoire, 2022.

[33] :*Guide du débutant sur l'unité linéaire rectifiée (ReLU)*, DataCamp. [En ligne] : https://www.datacamp.com/fr/blog/rectified-linear-unit-relu.

[34] : Qu'est-*ce que c'est : la fonction Softmax*, Statistics Easily. [En ligne] : https://fr.statisticseasily.com/glossaire/qu%27est-ce-que-la-fonction-softmax-expliqu%C3%A9e-en-d%C3%A9tail/.

[35] : R. Kassel, *Recurrent Neural Network (RNN) : de quoi s'agit-il ?*, Publication non datée.

[36] :*Recurrent Neural Network*, DataScientest. [En ligne] : https://datascientest.com/recurrent-neural-network.

[37] : E. H. Mamdani et S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, pp. 1–13, 1975. doi: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

[38] :S. Sumathi et S. Paneerselvam, *Computational Intelligence Paradigms*, CRC Press, 2010. doi: 10.1201/9781439809037.

[39] : U. A. Mira, M. F. Yahiaoui, M. B. Mendil, M. F. Zaouche et M. L. Tighzert, *Conception d'un contrôleur flou de type Mamdani en langage VHDL*, Mémoire, 2022.

[40]:*Boards based ESP32-S3*, WEMOS. [En ligne] : https://www.wemos.cc/en/latest/s3/s3.html.

[41] :*ESP32-WROOM-32 (ESP-WROOM-32) Datasheet*, Espressif, 2018.

[42] :*Capteur d'humidité du sol Capacitif V1.2*, Shop4makers Maroc. [En ligne] : https://shop4makers.com/produit/capteur-dhumidite-du-sol-capacitif-v1-2/.

[43] R. Santos, *Guide for Rain Sensor FC-37 or YL-83 with Arduino*, Random Nerd Tutorials. [En ligne] : https://randomnerdtutorials.com/guide-for-rain-sensor-fc-37-or-yl-83-with-arduino/.

[44] : J. Reynolds, *Anémomètre : qu'est-ce que c'est, types, fonctionnement, utilisations…*, Physigeek. [En ligne] : https://physigeek.com/anemometre/.

[45] : *Introduction à ESP-NOW*, Arduino Forth. [En ligne] : https://esp32.arduino-forth.com/article/espnow_introduction.

[46] : *ESP-NOW: Espressif's Wireless Communication Protocol*, Espressif. [En ligne] : https://www.espressif.com/en/news/ESP-NOW.