



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electronique
Spécialité : Informatique industrielle

Présenté par : M. Mohamed Enasser Salah Eddine HAMMADI

Thème

**Développement d'un système
d'irrigation et fertilisation automatisé
par capteurs et microcontrôleur**

Soutenu publiquement, le 23 /06/ 2026, devant le jury composé de :

Mme. N. MIDOUN M. S.M. MERIAH M. L. MERAD M. B. SOUIER	MCB Professeur Professeur Doctorant	ESSA. Tlemcen Univ- Tlemcen ESSA. Tlemcen Univ- Tlemcen	Président Directeur de mémoire Co-Directeur de mémoire 1 Co- Directeur de mémoire 2
Mme. N. LABDELLI M. A. CHELLAL	MCB Assistant Teacher	ESSA. Tlemcen Instituto Politécnico de Bragança, Portugal	Examineur 1 Examineur 2
M. M. ZITOUNI Mme. E. KADAUI	MCB	ONID ESSA. Tlemcen	Partenaire socio-économique Representante de l'incubateur

Année universitaire : 2025 /2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicace

À mes chers parents,

Votre soutien inconditionnel, vos conseils avisés et votre amour sans faille ont été mes piliers tout au long de ce parcours académique. Votre confiance en moi m'a donné la force d'aller de l'avant et de surmonter les défis. Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait et pour avoir rendu possible la réalisation de ce mémoire.

À mes frères bien-aimés,

À travers les rires partagés, les encouragements constants et les moments précieux que nous avons vécus ensemble, vous avez été une source inépuisable de soutien. Votre présence et vos encouragements ont été des inspirations constantes. Merci pour votre soutien indéfectible et pour avoir été à mes côtés dans ce chemin vers l'accomplissement de mes objectifs académiques.

À mes amis,

Votre amitié sincère, vos mots d'encouragement et votre soutien indéfectible ont illuminé chaque étape de ce parcours académique. À travers les discussions enrichissantes et les moments de détente partagés, vous avez été une source de motivation et de réconfort. Merci pour votre présence constante et pour avoir enrichi cette expérience avec vos idées et votre enthousiasme.

Remerciements

Avant tout, nous remercions Allah le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants, Monsieur **MERIAH Sidi** Mohamed et Monsieur **MERAD Lotfi**, pour leur accompagnement, leur disponibilité, leurs précieux conseils, leurs orientations scientifiques et leur soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Leurs expertises et leurs remarques constructives ont grandement contribué à l'aboutissement de ce projet.

Nous adressons également nos sincères remerciements à notre co-encadrant, Monsieur **Bidjad Souier**, pour son aide, son suivi, ses encouragements et les connaissances qu'il nous a apportées durant toutes les étapes de ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement Monsieur **KADI Abdellatif**, chargé des composants et du matériel pédagogique, pour son aide précieuse dans la mise à disposition des équipements et des composants nécessaires à la réalisation pratique du prototype.

Nos remerciements vont également à Monsieur **ADJIM Ramzo**, responsable du FabLab, pour son accompagnement technique, son soutien lors des opérations de fabrication, ainsi que pour l'accès aux équipements de prototypage rapide, notamment les imprimantes 3D et les machines de découpe laser.

Nous remercions également l'ensemble des enseignants de l'École Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen pour la qualité de la formation reçue tout au long de notre parcours universitaire.

Nous adressons nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et à la réussite de notre parcours académique.

Enfin, nous adressons nos remerciements à tous nos amis et camarades de la promotion Electronique : 2023-2026, qui nous ont apporté leur soutien.

À tous, nous exprimons notre profonde reconnaissance et notre respect.

.

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système intelligent d'irrigation et de fertigation destiné à optimiser l'utilisation de l'eau et des engrais. Le système associe un Raspberry Pi 3 B+ pour la supervision et la décision, et un ESP32 pour l'acquisition des données et la commande des actionneurs. Les mesures d'humidité du sol, de température, de niveau d'eau, de NPK, de pH et de conductivité électrique permettent d'estimer les besoins des cultures. Le prototype intègre un dosage automatique des fertilisants, une gestion intelligente de l'irrigation et une interface web accessible par ordinateur ou smartphone.

Mots-clés : irrigation intelligente, fertigation, agriculture de précision, ESP32, Raspberry Pi, NPK, IoT.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of a smart irrigation and fertigation system for optimizing water and fertilizer use. The system combines a Raspberry Pi 3 B+ for supervision and decision-making with an ESP32 for sensor acquisition and actuator control. Soil moisture, temperature, water level, NPK, pH, and electrical conductivity data are used to estimate crop requirements. The prototype includes automatic fertilizer dosing, intelligent irrigation control, and a web interface accessible from computers and smartphones.

Keywords: smart irrigation, fertigation, precision agriculture, ESP32, Raspberry Pi, NPK, IoT.

الملخص

يقدم هذا العمل تصميم وإنجاز نظام ذكي للري والتسميد يهدف إلى تحسين استعمال المياه والأسمدة. يعتمد النظام على Raspberry Pi 3 B+ للإشراف واتخاذ القرار، و ESP32 لجمع بيانات الحساسات والتحكم في المشغلات. تُستعمل قياسات رطوبة التربة، ودرجة الحرارة، ومستوى الماء، وNPK، وpH، وEC لتحديد احتياجات المحاصيل. كما يضم النموذج جرعات أوتوماتيكية للأسمدة، وتحكماً ذكياً في الري، وواجهة ويب يمكن استعمالها عبر الحاسوب أو الهاتف الذكي.

الكلمات المفتاحية: الري الذكي، التسميد، الزراعة الدقيقة، ESP32، Raspberry Pi، NPK، إنترنت الأشياء.

Table des abréviations

Abréviation	Signification
N	Azote
P	Phosphore
K	Potassium
Ca	Calcium
Mg	Magnésium
S	Soufre
PWM	Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)
I ² C	Inter-Integrated Circuit, bus série de communication
FDM	Fused Deposition Modeling (modélisation par dépôt de filament fondu)
PLA	Acide polylactique, matériau utilisé en impression 3D
JSON	JavaScript Object Notation, format léger d'échange de données
HTTP	HyperText Transfer Protocol, protocole de communication web
IHM	Interface Homme-Machine
IoT	Internet of Things (Internet des Objets)
IA	Intelligence Artificielle
EC	Electrical Conductivity (conductivité électrique)
CLF	Contrôleur Logique Floue
ML	Machine Learning
I2C	Inter-Integrated Circuit
PWM	Pulse Width Modulation
PH	Potentiel Hydrogène
LLM	Large Language Model

Table des matières

Introduction générale.....	12
CHAPITRE 1 : NOTIONS SUR LES SYSTÈMES D'IRRIGATION	13
1.1. Introduction.....	13
1.2. Irrigation	13
1.2.1. Définition et importance	13
1.2.2. Types d'irrigation.....	14
1.2.2.1. Irrigation de surface	15
1.2.2.2. Irrigation par goutte à goutte	17
1.2.2.3. Irrigation par aspersion.....	18
1.2.3. Bilan hydrique et les besoins en eau des cultures	20
1.3. Fertilisation	21
1.3.1. Définition et importance	21
1.3.2. Besoins nutritionnels des plantes	22
1.3.2.1. Macronutriments primaires : NPK	22
1.3.2.2. Macronutriments secondaires et les micronutriments	24
1.3.3. Formes d'engrais NPK.....	26
1.3.3.1. Engrais simples	27
1.3.3.2. Engrais binaires et ternaires	27
1.3.3.3. Engrais hydrosolubles	28
1.3.4. Fertigation	28
1.3.5. Fertilisation de précision.....	29
1.3.6. Risques liés à une fertilisation mal maîtrisée.....	30
1.4. Systèmes d'irrigation intelligents	31
1.4.1. Définition et contexte.....	31
1.4.2. Architecture générale d'un système d'irrigation automatisé	31
1.5. Intelligence Artificielle dans les systèmes d'irrigation	32
1.5.1. Définition et apport de l'IA en agriculture.....	32
1.5.2. Logique Floue dans les systèmes d'irrigation.....	32
1.5.2.1. Principes fondamentaux de la logique floue	32
1.5.2.2. Architecture d'un contrôleur flou.....	33
1.5.3. Application de la logique floue à l'irrigation automatisée.....	34
1.6. Systèmes d'irrigation intelligents préexistants	34
1.6.1. Travaux antérieurs recensés dans la littérature	34
1.6.2. Tableau comparatif des systèmes existants.....	35
1.6.3. Analyse critique et lacunes identifiées.....	36
1.7. Conclusion	37
CHAPITRE 2 : CONCEPTION MATÉRIELLE ET LOGICIELLE	38
2.1. Introduction.....	38
2.2. Architecture générale du système	38
2.3. Description du matériel.....	40
2.3.1. Unité de décision : Raspberry Pi 3 B+	40
2.3.2. Contrôleur embarqué : ESP32.....	40

2.3.3. Interface d’affichage local : écran LCD tactile 7 pouces.....	41
2.3.4. Capteurs	42
2.3.4.1. Capteur d’humidité du sol	42
2.3.4.2. Capteur de température et d’humidité de l’air DHT22	43
2.3.4.3. Capteur NPK du sol.....	43
2.3.4.4. Capteur de pH.....	44
2.3.4.5. Capteur de conductivité électrique EC	44
2.3.4.6. Capteur de distance à ultrasons HC-SR04	44
2.3.5. Organes de dosage et de commande	45
2.3.5.1. Module PCA9685 et servomoteurs de dosage	45
2.3.6. Actionneurs de puissance et organes de commutation.....	46
2.3.6.1. Relais.....	47
2.3.6.2. Pompe immergée IP68	47
2.3.6.3. Électrovannes	48
2.3.6.4. Moteur mélangeur	49
2.3.6.5. Servomoteurs MG996R.....	49
2.3.7. Alimentation et câblage	50
2.4. Aspect logiciel du système	52
2.4.1. Environnement de développement du microcontrôleur	52
2.4.2. Serveur local et interface web	52
2.4.3. Communication HTTP/JSON	52
2.4.4. Base de données	53
2.4.5. Modes de fonctionnement automatique et manuel	53
2.5. Modélisation des données et logique de décision.....	53
2.5.1. Catégories de données.....	54
2.5.2. Données de référence agronomiques	55
2.5.3. Calcul des besoins en NPK	56
2.5.4. Estimation des disponibilités et calcul du déficit.....	57
2.5.5. Conversion du déficit en commande de dosage.....	57
2.5.6. Contrôle de l’irrigation par logique floue	57
2.5.7. Sécurité de la fertilisation	58
2.6. Conception mécanique du prototype sous SolidWorks	58
2.6.1. Plateau support des doseurs	59
2.6.2. Boîtier doseur.....	60
2.6.3. Volet rotatif d’ouverture et de fermeture	60
2.6.4. Entonnoir de collecte	61
2.6.5. Bâti et plaque de base.....	62
2.6.6. Assemblage d’ensemble et évolution du design	63
2.8. Conclusion	66
CHAPITRE 3 : RÉALISATION DU DISPOSITIF	67
3.1. Introduction.....	67
3.2. Moyens de fabrication utilisés	67
3.2.1. Impression 3D des pièces fonctionnelles	67
3.2.2. Découpe laser des éléments structurels.....	70

3.3. Assemblage mécanique du prototype	72
3.3.1. Étage de dosage des fertilisants	72
3.3.2. Entonnoir et réservoir de mélange	73
3.3.3. Pièce d'amortissement de la tige de mélange	74
3.3.4. Hélice de mélange.....	74
3.3.5. Sous-système d'irrigation pour pépinière	75
3.3.6. Prototype assemblé	76
3.4. Intégration électronique	77
3.5. Réalisation logicielle	78
3.5.1. Architecture logicielle retenue	78
3.5.2. Base de données locale	79
3.6. Interfaces utilisateur réalisées	80
3.6.1. Connexion utilisateur	80
3.6.2. Configuration de la parcelle.....	80
3.6.3. Tableau de bord	81
3.6.4. Commande manuelle	82
3.7. Validation fonctionnelle	83
3.8. Conclusion.....	84
Conclusion générale.....	85
Références bibliographiques.....	86

Liste des figures

Figure 1.1 : Les principaux types de systèmes d'irrigation.....	14
Figure 1.2 : Exemple d'irrigation de surface par écoulement	15
Figure 1.3 : Exemple d'irrigation par bassin	16
Figure 1.4 : Irrigation à la raie par circulation de l'eau dans les sillons.....	16
Figure 1.5 : Système d'irrigation goutte à goutte au niveau des lignes de culture.....	17
Figure 1.6 : Rampe mobile d'irrigation par aspersion.....	19
Figure 1.7 : Rôle des principaux éléments nutritifs dans le développement des plantes	23
Figure 1.8 : Rôle des macronutriments secondaires et des micronutriments dans la nutrition végétale	25
Figure 1.9 : Les principales formes d'engrais NPK utilisées en agriculture	26
Figure 2.1 : Architecture générale du système en couches	38
Figure 2.2 : Organigramme fonctionnel illustrant la répartition des rôles entre le Raspberry Pi et l'ESP32	39
Figure 2.3 : Carte Raspberry Pi 3 B+	40
Figure 2.4 : Carte ESP32 utilisée comme unité d'exécution et de commande.....	41
Figure 2.5 : Écran tactile LCD tactile 7 pouces pour l'interface locale	42
Figure 2.6 : Capteur capacitif d'humidité du sol.....	42
Figure 2.7 : Capteur de température et d'humidité DHT22	43
Figure 2.8 : Capteur multifonction 5 en 1 NPK-pH-EC pour l'analyse nutritionnelle et physico-chimique du sol.....	44
Figure 2.9 : Principe de fonctionnement du capteur ultrasonique HC-SR04 par l'émission et la réception d'une onde sonore	45
Figure 2.10 : Capteur ultrasonique HC-SR04 utilisé pour la mesure du niveau d'eau dans le réservoir.....	45
Figure 2.11 : Module PCA9685 à 16 canaux utilisé pour le pilotage des servomoteurs de dosage des engrais NPK	46
Figure 2.12 : Module relais utilisé pour la commande des actionneurs du système	47
Figure 2.13 : Pompe immergée IP68 utilisée pour l'acheminement de l'eau ou de la solution nutritive vers la plante	47

Figure 2.14 : Électrovannes utilisées pour le contrôle de l'entrée et de la sortie d'eau dans le système	48
Figure 2.15 : Moteur à courant continu utilisé pour le mélange de la solution nutritive	49
Figure 2.16 : Servomoteur MG996R.....	50
Figure 2.17 : Convertisseurs DC-DC utilisés dans le système	50
Figure 2.18 : Schéma de câblage de la partie puissance et commande	51
Figure 2.19 : Organigramme du cycle de décision du Raspberry Pi	54
Figure 2.20 : Plateau support des trois ensembles de dosage.....	59
Figure 2.21 : Vues du boîtier doseur en perspective et de face	60
Figure 2.22 : Volet rotatif d'ouverture et de fermeture du doseur, vue de face à gauche et vue de profil à droite.....	61
Figure 2.23 : Vues de l'entonnoir de collecte (dessus et profil).....	61
Figure 2.24 : Bâti porteur logeant le réservoir de mélange	62
Figure 2.25 : Plaque de base de la structure et ses perçages de fixation	63
Figure 2.26 : Première version de l'assemblage du système : structure à montants et réservoirs N, P et K	64
Figure 2.27 : Version finale de l'assemblage du système	65
Figure 3.1 : Imprimante 3D Zortrax utilisée pour la fabrication de pièces fonctionnelles du prototype.....	68
Figure 3.2 : Imprimante 3D FlashForge utilisée pour l'impression de composants mécaniques	68
Figure 3.3 : Imprimante 3D Creality Ender-3 en cours de fabrication d'une pièce du prototype.....	69
Figure 3.4 : Imprimante 3D Creality CR-10 utilisée pour les pièces de plus grand volume	69
Figure 3.5 : Pièces du prototype imprimées en PLA sur le plateau de la FlashForge....	70
Figure 3.6 : Machine de découpe laser CO ₂ utilisée pour la découpe des éléments structurels plans	71
Figure 3.7 : Vue générale de la machine de découpe laser CO ₂ utilisée dans l'atelier ..	71
Figure 3.8 : Pièces du bloc de dosage des fertilisants imprimées en PLA jaune sur la Creality Ender-3, encore sur le plateau d'impression avant nettoyage	72

Figure 3.9 : Pièce du bloc de dosage fixée au plateau d'impression avant nettoyage et ébavurage.....	73
Figure 3.10 : Entonnoir de collecte fabriqué par impression 3D et destiné à guider les fertilisants vers le réservoir de mélange	73
Figure 3.11 : Pièce d'amortissement et de guidage de la tige de mélange, imprimée en PLA bleu, positionnée sur le fond du réservoir pour supprimer les vibrations.....	74
Figure 3.12 : Hélice de mélange à trois pales imprimées en PLA jaune, montée sur la tige d'entraînement avec son écrou de fixation	75
Figure 3.13 : Sous-système d'irrigation pour pépinière réalisé par impression 3D	76
Figure 3.14 : Prototype final assemblé, montrant l'intégration mécanique des réservoirs, du bloc de dosage, de l'entonnoir et du réservoir de mélange	77
Figure 3.15 : Interface de connexion de l'application web développée sous Flask	80
Figure 3.16 : Interface de configuration de la parcelle pour la culture de pomme de terre	81
Figure 3.17 : Interface de configuration de la parcelle pour la culture du blé	81
Figure 3.18 : Tableau de bord de supervision du système d'irrigation et de fertigation	82
Figure 3.19 : Interface de commande manuelle des actionneurs.....	82

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Comparaison des systèmes d'irrigation intelligents préexistants	36
Tableau 2.1 : Affectation des canaux du module PCA9685 aux organes de dosage	46
Tableau 2.2 : Pages de l'interface web et fonctions associées	52
Tableau 2.3 : Données agronomiques de référence du prototype, extraites et adaptées du Crop Recommendation Dataset	55
Tableau 2.4 : Coefficients de correction des besoins NPK selon le stade de croissance	56
Tableau 2.5 : Décisions d'irrigation et durées associées en sortie du module flou.....	57
Tableau 2.6 : Base de règles du module d'irrigation flou	58
Tableau 3.1 : Éléments électroniques intégrés au prototype et leur rôle.....	78
Tableau 3.2 : Composants logiciels du système et technologies utilisées.....	79
Tableau 3.3 : Structure de la base de données SQLite du prototype	79
Tableau 3.4 : Fonctions testées lors de la validation du prototype.....	83

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'agriculture moderne fait face à des défis majeurs liés à la raréfaction de l'eau, à l'augmentation des besoins alimentaires et à la nécessité de préserver les ressources naturelles. Dans les régions arides et semi-arides, comme l'Algérie, l'irrigation et la fertilisation doivent être gérées avec précision afin d'éviter le gaspillage de l'eau, la surconsommation des engrais et la dégradation progressive des sols.

Les méthodes traditionnelles d'irrigation et de fertilisation reposent souvent sur l'expérience de l'agriculteur et sur des interventions manuelles. Cette approche peut conduire à des apports approximatifs, parfois insuffisants ou excessifs. L'intégration des systèmes embarqués, de l'Internet des Objets et des interfaces web permet aujourd'hui de développer des solutions intelligentes capables de mesurer l'état réel de la parcelle et d'agir automatiquement selon les besoins de la culture.

Dans ce contexte, ce mémoire porte sur la conception et la réalisation d'un système intelligent d'irrigation et de fertigation. Le système proposé s'appuie sur une architecture distribuée composée d'un Raspberry Pi 3 B+ chargé de la supervision, de la prise de décision et de la gestion de l'interface utilisateur, ainsi que d'un ESP32 responsable de l'acquisition des données issues des capteurs et de la commande des actionneurs.

L'objectif principal de ce travail est de réaliser un prototype fonctionnel, à faible coût et facilement exploitable, permettant d'optimiser l'utilisation de l'eau et des fertilisants. Le système exploite les mesures d'humidité du sol, de température, de niveau d'eau et de paramètres chimiques du sol afin d'améliorer la gestion de l'irrigation et du dosage des engrais.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente les notions fondamentales relatives à l'irrigation, à la fertilisation et aux systèmes intelligents appliqués à l'agriculture. Le deuxième chapitre décrit la conception matérielle, logicielle et mécanique du système proposé. Le troisième chapitre est consacré à la réalisation pratique du prototype, à l'intégration des composants, aux interfaces utilisateur et à la validation fonctionnelle.

CHAPITRE 1

NOTIONS SUR LES SYSTÈMES D'IRRIGATION

1.1. Introduction

L'irrigation et la fertilisation constituent deux piliers fondamentaux de la production agricole moderne. Si leurs principes de base sont connus depuis l'Antiquité, leur mise en œuvre rationnelle et leur automatisation représentent aujourd'hui un enjeu majeur face à la raréfaction des ressources en eau et à la dégradation progressive des sols agricoles par une utilisation excessive et non contrôlée des intrants chimiques.

Dans ce chapitre, nous proposons une revue bibliographique des travaux scientifiques et des réalisations techniques les plus pertinents en rapport avec notre sujet. Cette revue porte sur quatre axes principaux. Le premier axe concerne l'irrigation agricole, où nous présentons les différentes méthodes existantes, à savoir l'irrigation de surface, l'irrigation par goutte à goutte et l'irrigation par aspersion, en analysant pour chacune ses principes de fonctionnement, son efficacité hydrique, ses avantages et ses inconvénients. Le deuxième axe traite des sels minéraux et de leur rôle essentiel dans la nutrition des plantes, en mettant l'accent sur les macronutriments azote, phosphore et potassium, ainsi que sur les paramètres physico-chimiques associés tels que le pH et la conductivité électrique. Le troisième axe est consacré à l'automatisation de l'arrosage, à travers une analyse critique des systèmes d'irrigation intelligents préexistants recensés dans la littérature. Enfin, le quatrième axe présente une synthèse comparative de ces travaux, permettant d'identifier les lacunes des solutions actuelles et de justifier l'approche adoptée dans ce mémoire.

1.2. Irrigation

1.2.1. Définition et importance

L'irrigation est l'opération qui consiste à apporter artificiellement de l'eau aux cultures afin de compenser les déficits hydriques du sol et d'assurer à la plante les conditions optimales de croissance. Elle constitue un complément indispensable aux précipitations naturelles dans de nombreuses régions du monde, en particulier dans les zones semi-arides et arides comme le bassin méditerranéen et le nord de l'Afrique [1, 3].

L'objectif de l'irrigation n'est pas simplement d'humidifier le sol, mais de maintenir son humidité dans une plage optimale : suffisamment élevée pour que la plante dispose de l'eau dont elle a besoin, mais pas excessive pour éviter l'asphyxie racinaire, la lixiviation des nutriments et le développement de maladies fongiques [4, 5].

La quantité d'eau à apporter dépend de plusieurs facteurs interdépendants, notamment le type de sol et sa capacité de rétention hydrique, le stade phénologique de la culture, les conditions climatiques locales telles que la température et l'évapotranspiration, ainsi que la méthode d'irrigation adoptée [3]. Une gestion rationnelle de ces paramètres permet de réduire significativement les pertes en eau tout en maintenant des rendements agricoles satisfaisants.

1.2.2. Types d'irrigation

Les techniques d'irrigation peuvent être classées en deux grandes familles selon le mode de distribution de l'eau. La première regroupe les méthodes à écoulement libre, dans lesquelles l'eau est acheminée par gravité sans mise sous pression. La seconde regroupe les méthodes sous pression, où l'eau est distribuée par des conduites alimentées par une pompe [1]. Le choix entre ces deux familles dépend de paramètres agronomiques, topographiques et économiques propres à chaque exploitation.

La figure 1.1 représente les principaux types de systèmes d'irrigation.

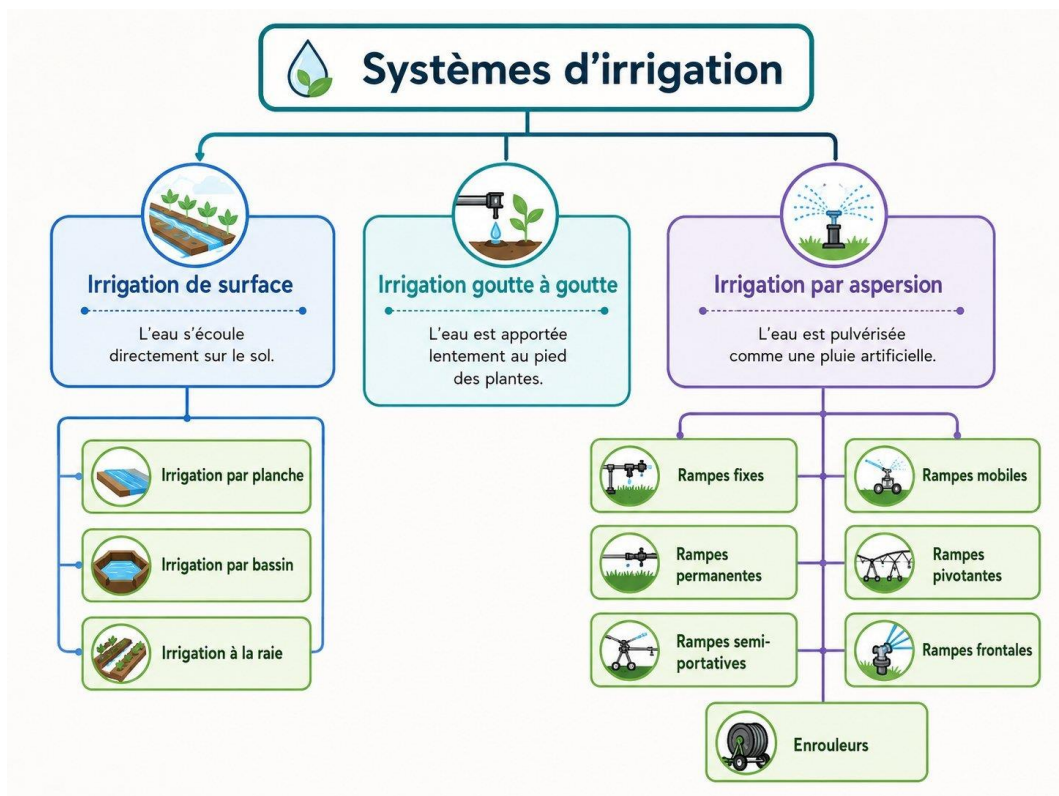


Figure 1.1 : Les principaux types de systèmes d'irrigation.

1.2.2.1. Irrigation de surface

L'irrigation de surface désigne l'ensemble des méthodes où l'eau est distribuée à la parcelle par écoulement à la surface du sol, sans confinement sous pression. La progression de l'eau dépend de la pente du terrain, de la texture du sol et de la présence éventuelle de sillons ou de diguettes orientant son écoulement [1].

La Figure 1.2 illustre un exemple de système d'irrigation de surface par écoulement gravitaire.



Figure 1.2 : Exemple d'irrigation de surface par écoulement [1].

Parmi les variantes les plus répandues, on distingue :

- Irrigation par bassin : les bassins sont formés par des cuvettes en terre entourées de diguettes de faible hauteur empêchant l'eau de s'écouler vers les champs voisins. Cette méthode est principalement utilisée pour les rizières sur terrain plat et pour certains arbres fruitiers [1].

La Figure 1.3 montre un exemple de système d'irrigation par bassin.



Figure 1.3 : Exemple d'irrigation par bassin [1].

- Irrigation par planches : les planches sont des parcelles de terrain aménagées avec une légère pente et séparées par des levées basses. L'eau s'écoule en nappe mince sur la surface dans la direction de la pente.
- Irrigation à la raie : les sillons sont de petites rigoles creusées dans le sol dans le sens de la pente, facilitant le transport de l'eau entre les rangées de cultures. L'eau s'infiltre dans le sol principalement par les côtés du sillon [1].

La Figure 1.4 illustre la technique d'irrigation à la raie, caractérisée par la circulation de l'eau dans des sillons.

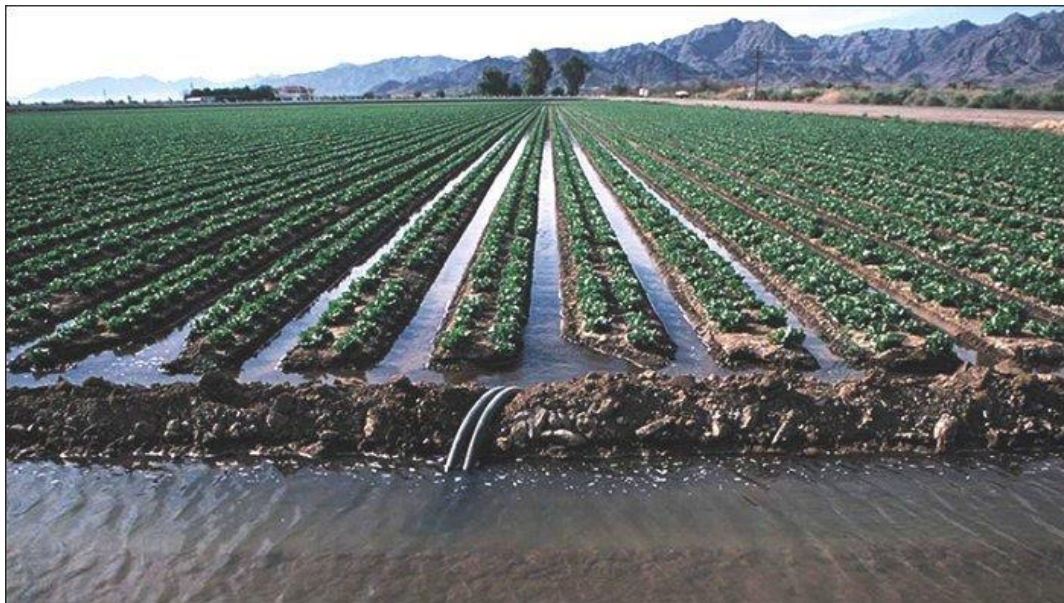


Figure 1.4 : Irrigation à la raie par circulation de l'eau dans les sillons [1].

Avantages :

- Installation et fonctionnement économiques ne nécessitant pas d'équipements sophistiqués.
- Simplicité de mise en œuvre, accessible aux petits agriculteurs.
- Ne requiert pas de source d'énergie externe dans le cas gravitaire.

Inconvénients :

- Des volumes considérables d'eau sont perdus par évaporation et ruissellement.
- Elle favorise l'érosion et la salinisation des sols.
- Son efficacité hydrique est faible, généralement comprise entre 30 et 60 % [1].
- Elle est difficilement compatible avec un système de contrôle automatique précis.

1.2.2.2. Irrigation par goutte à goutte

L'irrigation goutte à goutte, également appelée irrigation localisée, consiste à apporter l'eau directement à la zone racinaire de chaque plant à un débit faible et contrôlé de 2 à 20 litres par heure, via des tuyaux en polyéthylène équipés d'émetteurs appelés goutteurs [6]. Ce mode de fonctionnement maintient en permanence un niveau d'humidité stable dans la zone racinaire, sans mouiller le feuillage ni les espaces inter-rangs.

La Figure 1.5 illustre un système d'irrigation goutte à goutte.



Figure 1.5 : Système d'irrigation goutte à goutte au niveau des lignes de culture [6].

On distingue deux variantes principales :

Système souterrain : les conduites et les goutteurs sont enfouis à une profondeur de 20 à 40 cm sous la surface du sol. Ce système réduit les pertes par évaporation et protège les conduites contre les dommages mécaniques [6].

Système de surface : les lignes de goutteurs sont disposées à la surface du sol à proximité de chaque plant. Ce système offre l'avantage d'une installation, d'une inspection et d'un entretien aisés.

Avantages :

- Efficience hydrique élevée, pouvant dépasser 90 % [6].
- Réduction significative de la consommation d'eau par rapport aux méthodes conventionnelles.
- Parfaitement compatible avec la fertigation, permettant l'injection directe des engrais dans l'eau d'irrigation.
- Adaptée à la plupart des légumes, fruits et grandes cultures.
- Préservation de l'environnement en réduisant le lessivage des engrais vers les nappes phréatiques.

Inconvénients :

- Coût d'installation et de maintenance relativement élevé.
- Risque fréquent de colmatage des goutteurs nécessitant une filtration soignée de l'eau.
- Nécessite l'intervention de techniciens qualifiés pour l'installation et le suivi.

1.2.2.3. Irrigation par aspersion

L'irrigation par aspersion est une méthode d'irrigation sous pression consistant à reproduire artificiellement le phénomène naturel de la pluie. Dans ce système, l'eau est projetée dans l'atmosphère sous forme de fines gouttelettes grâce à des asperseurs alimentés par un réseau hydraulique pressurisé [5]. Cette technique est largement utilisée dans l'agriculture moderne en raison de sa capacité à assurer une distribution relativement homogène de l'eau sur l'ensemble de la surface cultivée.

Le principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'une pompe hydraulique qui met l'eau sous pression avant son acheminement à travers un réseau de conduites principales et secondaires. L'eau arrive ensuite vers des buses ou des têtes d'asperseurs

chargées de pulvériser l'eau sous forme de pluie artificielle. La portée et le débit des asperseurs dépendent principalement de la pression hydraulique, du diamètre des buses ainsi que des conditions climatiques environnantes.

Cette méthode d'irrigation s'adapte à différents types de cultures, notamment les cultures maraîchères, céréalières et fourragères. Elle convient également aux terrains présentant des reliefs irréguliers ou des sols à forte perméabilité, puisque l'eau est distribuée de manière contrôlée sans nécessiter un nivellement précis du terrain [1].

On distingue généralement deux principales configurations des systèmes d'aspersion :

Réseau fixe : Dans cette configuration, l'ensemble des conduites et des asperseurs est installé de manière permanente dans la parcelle agricole. Les asperseurs restent positionnés à des emplacements prédéfinis afin d'assurer une couverture homogène des cultures. Cette solution est particulièrement utilisée dans les grandes exploitations agricoles nécessitant une automatisation importante des opérations d'irrigation.

La figure 1.6 représente une rampe mobile d'irrigation par aspersion.



Figure 1.6 : Rampe mobile d'irrigation par aspersion [1].

Réseau mobile : Le réseau mobile repose sur des conduites et des asperseurs pouvant être déplacés manuellement ou mécaniquement d'une zone à une autre. Cette configuration permet de couvrir de grandes surfaces agricoles avec un nombre réduit d'équipements, ce qui diminue les coûts d'installation. Cependant, elle nécessite davantage d'intervention humaine pour le déplacement et la gestion des équipements.

L'irrigation par aspersion présente plusieurs avantages importants. Elle permet notamment une répartition relativement uniforme de l'eau sur l'ensemble de la parcelle et

s'adapte facilement à différents types de sols et de cultures. De plus, cette méthode offre la possibilité d'injecter des fertilisants solubles directement dans le réseau hydraulique, ce qui facilite les opérations de fertigation et améliore l'efficacité de l'utilisation des nutriments [6].

Cependant, malgré ses performances, cette technique présente également certaines limites. Les pertes d'eau par évaporation peuvent devenir importantes dans les régions chaudes et venteuses. En présence de vents forts, la distribution de l'eau devient moins homogène, ce qui peut réduire l'efficacité de l'irrigation. Par ailleurs, le coût énergétique reste relativement élevé en raison de la nécessité d'utiliser des pompes fonctionnant sous pression. La maintenance des buses et des équipements hydrauliques constitue également une contrainte importante pour assurer un fonctionnement optimal du système.

Avantages :

- Répartition relativement homogène de l'eau.
- Adaptation à différents types de cultures et de sols.
- Possibilité de fertigation.
- Aucune nécessité de nivellement précis du terrain.
- Adaptation aux terrains accidentés.

Inconvénients :

- Consommation énergétique relativement importante.
- Sensibilité aux conditions climatiques, notamment au vent.
- Pertes d'eau par évaporation.
- Coût d'installation et de maintenance élevé.
- Rendement hydrique inférieur au goutte-à-goutte.

1.2.3. Bilan hydrique et les besoins en eau des cultures

La quantité d'eau à apporter ne peut pas être fixée arbitrairement. Elle dépend de plusieurs facteurs : le type de culture et son stade phénologique, le type de sol (sableux, limoneux, argileux), les conditions climatiques (température, humidité relative) et l'humidité actuelle du sol mesurée par le capteur [4, 5].

Le bilan hydrique est exprimé par l'équation fondamentale :

$$E_{eau} = \frac{ET_0 \times K_c \times A \times (H_{cible} - H_{actuelle})}{\eta_{irrigation}} \quad (1.1)$$

Où ET_0 est l'évapotranspiration de référence, K_c le coefficient cultural, A la surface de la parcelle, H_{cible} l'humidité cible du sol, $H_{actuelle}$ l'humidité mesurée par le capteur, et $\eta_{irrigation}$ l'efficacité de la méthode d'irrigation choisie [5].

Notre système implémente ce calcul sur le Raspberry Pi à partir des mesures des capteurs DHT22 (température, humidité) et du capteur d'humidité du sol, en tenant compte des seuils spécifiques à chaque culture recommandée par le module d'intelligence artificielle.

1.3. Fertilisation

1.3.1. Définition et importance

La fertilisation constitue une pratique essentielle en agriculture, car elle permet d'assurer l'alimentation minérale des plantes et de maintenir la fertilité du sol. Une plante, comme tout organisme vivant, a besoin d'éléments nutritifs pour assurer sa croissance, son développement et sa production. Ces éléments sont principalement absorbés par les racines sous forme ionique dissoute dans l'eau du sol.

De même qu'un être humain ne peut pas vivre et se développer normalement sans une alimentation équilibrée apportant les nutriments nécessaires à son organisme, une plante ne peut pas atteindre son potentiel de croissance sans un apport suffisant en éléments minéraux. Ces nutriments interviennent dans plusieurs fonctions biologiques importantes, telles que la photosynthèse, la respiration, la formation des tissus végétaux, le développement racinaire, la floraison et la fructification.

Le sol représente naturellement une réserve de nutriments. Cependant, cette réserve n'est pas toujours suffisante pour répondre aux besoins des cultures, surtout dans les systèmes agricoles intensifs. À chaque récolte, une partie des éléments minéraux est exportée avec les grains, les fruits, les feuilles ou les tubercules. Si ces éléments ne sont pas remplacés, la fertilité du sol diminue progressivement, ce qui peut entraîner une baisse du rendement et une dégradation de la qualité de la production.

La fertilisation peut donc être définie comme l'apport volontaire, raisonné et contrôlé de substances nutritives au sol ou directement aux plantes, dans le but de compenser les carences et d'assurer les conditions optimales de croissance. Elle peut être

réalisée sous différentes formes : engrais solides, engrais liquides, amendements organiques ou solutions nutritives injectées dans l'eau d'irrigation.

Une fertilisation efficace doit être adaptée au type de culture, au stade de développement de la plante, aux caractéristiques du sol et aux objectifs de production. Elle ne consiste pas seulement à augmenter la quantité d'engrais appliquée, mais à fournir le bon élément, à la bonne dose, au bon moment et au bon endroit. Cette approche correspond au principe de la fertilisation raisonnée et de la fertilisation de précision [12, 13].

Une fertilisation mal maîtrisée peut provoquer plusieurs problèmes. Un apport insuffisant entraîne des carences nutritionnelles, un ralentissement de la croissance, une diminution de la surface foliaire et une baisse du rendement. À l'inverse, un apport excessif peut provoquer une accumulation de sels dans le sol, une toxicité pour la plante et une pollution des eaux souterraines par lixiviation, notamment dans le cas des nitrates [14, 15].

Ainsi, la fertilisation joue un double rôle. D'une part, elle permet d'améliorer la productivité agricole en fournissant aux plantes les éléments nécessaires à leur développement. D'autre part, elle doit être gérée de manière raisonnée afin de préserver la fertilité du sol, limiter les pertes d'engrais et réduire les impacts environnementaux.

1.3.2. Besoins nutritionnels des plantes

Les plantes absorbent leurs nutriments principalement à partir de la solution du sol. Cette solution contient des éléments minéraux dissous dans l'eau sous forme d'ions. L'eau joue donc un rôle fondamental dans la nutrition végétale, car elle permet la dissolution, le transport et l'absorption des éléments nutritifs par les racines.

Les éléments nutritifs nécessaires aux plantes sont généralement classés en deux grandes catégories : les macronutriments et les micronutriments. Les macronutriments sont nécessaires en quantités relativement importantes, tandis que les micronutriments sont requis en faibles quantités, mais restent indispensables au bon fonctionnement physiologique de la plante [12, 16].

1.3.2.1. Macronutriments primaires : NPK

Les macronutriments primaires regroupent l'azote, le phosphore et le potassium. Ces trois éléments sont consommés en grande quantité par les plantes et jouent un rôle majeur dans leur croissance et leur production.

La figure 1.7 représente le rôle des principaux éléments nutritifs dans le développement des plantes.

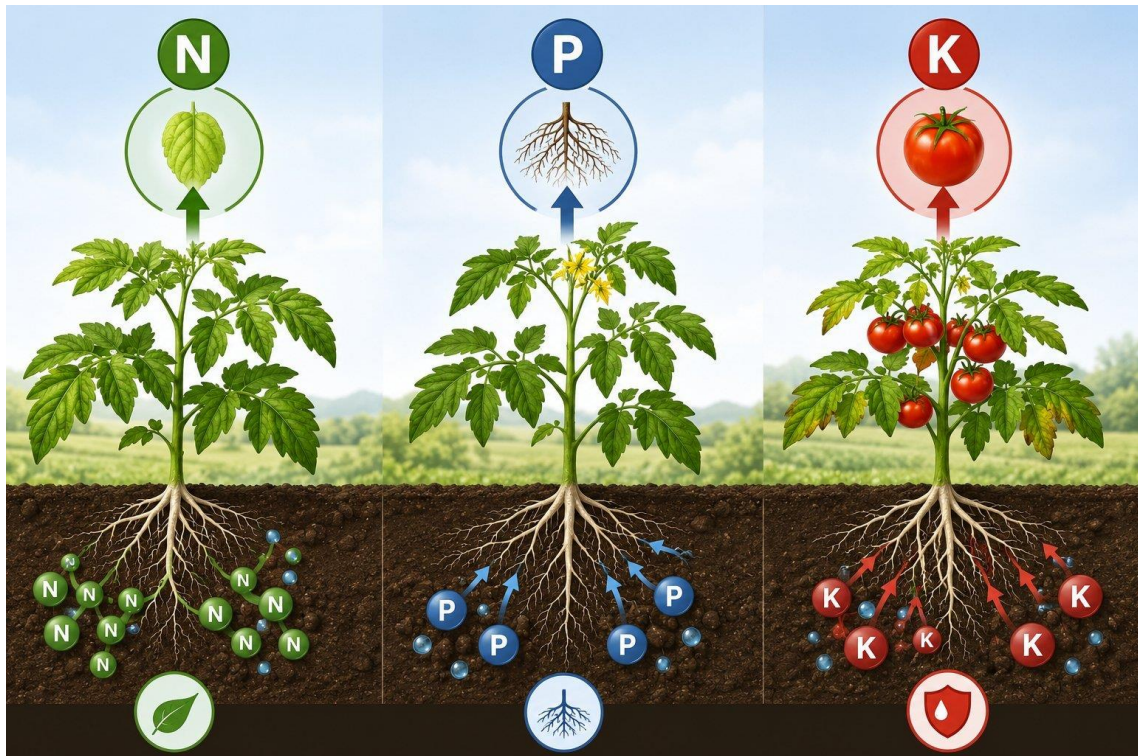


Figure 1.7 : Rôle des principaux éléments nutritifs dans le développement des plantes.

a) Azote

L'azote est l'un des éléments les plus importants pour la croissance végétative. Il entre dans la composition des acides aminés, des protéines, des enzymes et de la chlorophylle. La chlorophylle étant essentielle à la photosynthèse, l'azote favorise directement la production de biomasse et le développement des feuilles.

Une carence en azote se manifeste généralement par un jaunissement des feuilles, appelé chlorose, surtout au niveau des feuilles âgées. Elle provoque également un ralentissement de la croissance, une diminution de la surface foliaire et une baisse du rendement. Les cultures comme le blé, le maïs, le riz et certaines cultures maraîchères sont particulièrement exigeantes en azote. Dans certains cas, les besoins peuvent dépasser 120 kg/ha selon la culture, le rendement visé et la fertilité du sol [13, 14].

Cependant, l'azote est aussi un élément très mobile dans le sol, notamment sous forme nitrate. Lorsqu'il est apporté en excès ou au mauvais moment, il peut être entraîné vers les couches profondes du sol par l'eau d'infiltration. Ce phénomène de lixiviation représente une perte économique pour l'agriculteur et un risque de pollution pour les nappes phréatiques.

b) Phosphore

Le phosphore joue un rôle fondamental dans le transfert d'énergie au sein de la plante, notamment à travers l'ATP. Il intervient également dans le développement du système racinaire, la floraison, la fructification et la maturation. Le phosphore est particulièrement important au début du cycle de croissance, car il favorise l'installation des jeunes racines.

Une carence en phosphore peut entraîner une croissance lente, un faible développement racinaire et parfois une coloration violacée des feuilles. Contrairement à l'azote, le phosphore est peu mobile dans le sol. Il doit donc être disponible à proximité des racines pour être efficacement absorbé par la plante [12, 15].

c) Potassium

Le potassium intervient dans plusieurs fonctions physiologiques. Il régule l'ouverture et la fermeture des stomates, participe à l'équilibre hydrique de la plante, active de nombreuses enzymes et améliore le transport des sucres. Il contribue également à renforcer la tolérance des plantes aux stress hydriques, thermiques et salins.

Le potassium joue aussi un rôle important dans la qualité des productions agricoles. Il améliore la taille, la fermeté, la teneur en sucre, la conservation des fruits et le grossissement des tubercules. Certaines cultures comme la pomme de terre, la tomate, la banane et plusieurs cultures fruitières présentent des besoins élevés en potassium. Dans le cas de la pomme de terre, cet élément est particulièrement important pendant la phase de tubérisation et de grossissement des tubercules [12].

Une carence en potassium peut provoquer une sensibilité accrue au stress hydrique, une diminution de la résistance aux maladies, un dessèchement des bords des feuilles et une baisse de la qualité de la récolte.

1.3.2.2. Macronutriments secondaires et les micronutriments

En plus des éléments NPK, les plantes ont besoin d'autres éléments nutritifs essentiels. Les macronutriments secondaires comprennent principalement le calcium, le magnésium et le soufre. Même s'ils sont absorbés en quantités inférieures aux macronutriments primaires, leur rôle reste indispensable.

La figure 1.8 représente les rôles des macronutriments secondaires et des micronutriments dans la nutrition végétale.

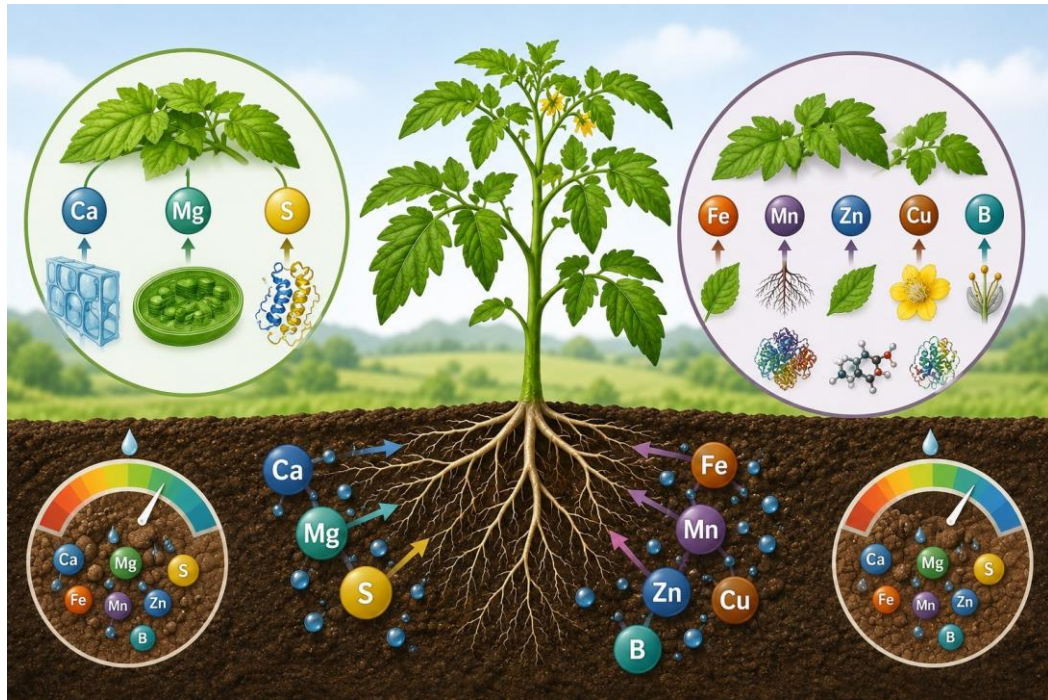


Figure 1.8 : Rôle des macronutriments secondaires et des micronutriments dans la nutrition végétale.

a) Calcium

Le calcium participe à la formation et à la stabilité des parois cellulaires. Il intervient dans la croissance des jeunes tissus, le développement racinaire et la qualité des fruits. Une carence en calcium peut entraîner des troubles physiologiques, notamment des nécroses sur les jeunes feuilles ou les fruits.

b) Magnésium

Le magnésium est un constituant central de la chlorophylle. Il joue donc un rôle direct dans la photosynthèse. Une carence en magnésium se manifeste souvent par un jaunissement entre les nervures des feuilles, principalement sur les feuilles âgées.

c) Soufre

Le soufre intervient dans la formation de certains acides aminés, des protéines et de plusieurs enzymes. Il participe également au métabolisme de l'azote. Une carence en soufre peut provoquer un jaunissement général des feuilles et une réduction de la croissance.

Les micronutriments, comme le fer, le manganèse, le zinc, le cuivre, le bore et le molybdène, sont nécessaires en très faibles quantités. Malgré cela, ils sont indispensables à de nombreuses réactions enzymatiques et physiologiques. Par exemple, le fer intervient dans la formation de la chlorophylle, le zinc participe à la croissance et à la régulation

hormonale, tandis que le bore joue un rôle important dans la floraison et la formation des fruits.

La disponibilité des nutriments dépend fortement du pH du sol. Un sol trop acide ou trop alcalin peut rendre certains éléments moins disponibles, même s'ils sont présents dans le sol. Par exemple, dans les sols alcalins, le fer, le zinc et le manganèse peuvent devenir moins assimilables, ce qui peut provoquer des carences visibles sur la plante. À l'inverse, dans les sols très acides, certains éléments peuvent devenir toxiques ou déséquilibrer l'absorption d'autres nutriments [17, 18].

Ainsi, la nutrition végétale ne dépend pas seulement de la quantité d'engrais apportée, mais aussi de la disponibilité réelle des éléments dans le sol. Cette disponibilité est influencée par le pH, l'humidité, la température, la texture du sol, la matière organique et l'activité biologique.

1.3.3. Formes d'engrais NPK

Les engrais NPK sont des fertilisants contenant un ou plusieurs des trois éléments nutritifs principaux : l'azote, le phosphore et le potassium. Ils peuvent se présenter sous différentes formes selon leur composition, leur solubilité, leur mode d'application et leur objectif agronomique [14, 15].

La figure 1.9 présente les principales formes d'engrais NPK utilisées en agriculture.

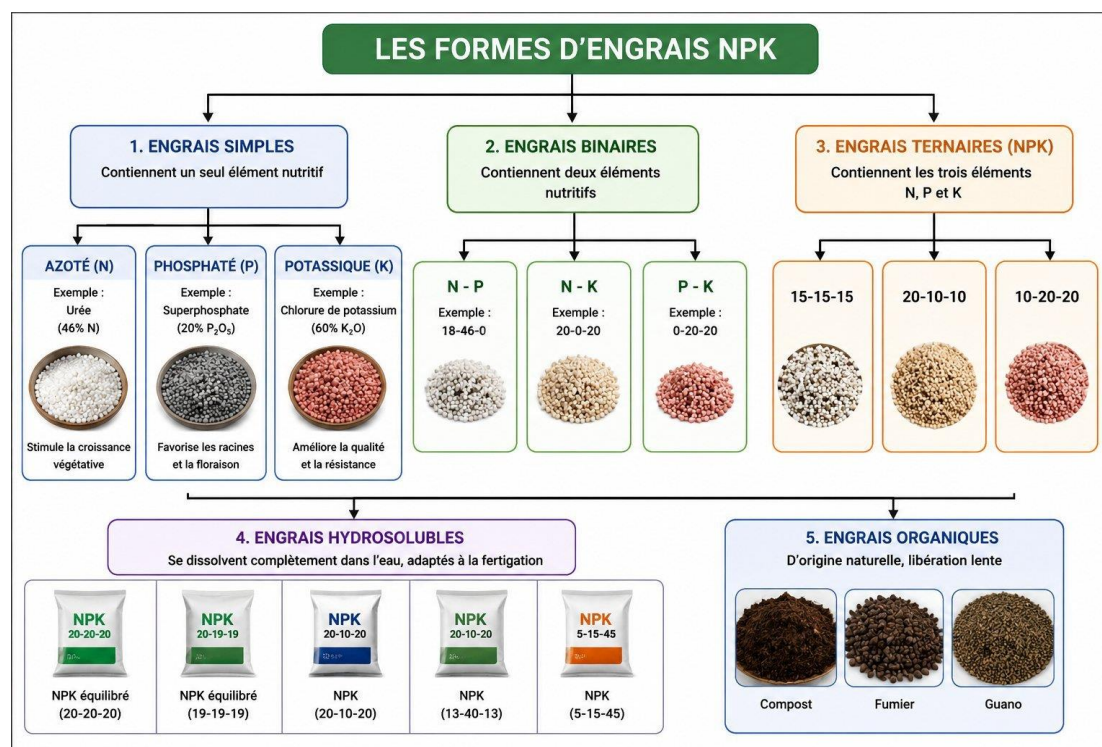


Figure 1.9 : Les principales formes d'engrais NPK utilisées en agriculture.

1.3.3.1. Engrais simples

Les engrais simples contiennent principalement un seul élément nutritif majeur. Ils sont utilisés lorsqu'une culture présente un besoin particulier pour un élément donné ou lorsqu'une analyse du sol montre une carence spécifique.

L'urée est un exemple d'engrais azoté très utilisé en agriculture. Elle contient environ 46 % d'azote et sert principalement à stimuler la croissance végétative. Le superphosphate est une source de phosphore, utilisée pour favoriser l'enracinement et le développement énergétique de la plante. Le chlorure de potassium est une source importante de potassium, souvent utilisé pour améliorer la qualité des fruits, la résistance au stress et le grossissement des organes de réserve.

Les engrais simples permettent de corriger précisément une carence, mais ils exigent une bonne connaissance des besoins de la culture. Un mauvais dosage peut créer un déséquilibre entre les éléments nutritifs et réduire l'efficacité globale de la fertilisation.

1.3.3.2. Engrais binaires et ternaires

Les engrais binaires contiennent deux éléments nutritifs principaux, tandis que les engrais ternaires contiennent les trois éléments NPK. Ces formulations sont largement utilisées, car elles permettent d'apporter plusieurs nutriments en une seule application [14, 15].

La notation NPK indique les pourcentages respectifs d'azote, de phosphore exprimé sous forme P_2O_5 et de potassium exprimé sous forme K_2O . Par exemple, un engrais noté 15-15-15 contient 15 % d'azote, 15 % de P_2O_5 et 15 % de K_2O [12].

Le choix de la formulation dépend du type de culture et de son stade de développement. Une formulation riche en azote peut être privilégiée pendant la phase de croissance végétative. Une formulation plus riche en phosphore peut être utilisée au début du cycle pour favoriser le développement racinaire. Une formulation riche en potassium peut être recommandée pendant la phase de floraison, de fructification ou de tubérisation [13, 15].

Les engrais composés présentent l'avantage d'être simples à utiliser. Cependant, leur composition fixe peut parfois ne pas correspondre exactement aux besoins réels de la plante. C'est pourquoi leur utilisation doit être raisonnée en fonction de l'analyse du sol, du cycle de culture et des objectifs de rendement [13].

1.3.3.3. Engrais hydrosolubles

Les engrais hydrosolubles sont des engrais capables de se dissoudre complètement dans l'eau. Ils sont particulièrement adaptés aux systèmes de fertigation. Leur solubilité permet une distribution plus homogène des nutriments et une meilleure disponibilité au niveau de la zone racinaire [6, 14].

Ces engrais sont souvent utilisés dans les systèmes d'irrigation localisée, notamment le goutte-à-goutte. Ils permettent de fractionner les apports nutritifs en petites doses régulières, ce qui améliore l'efficacité d'utilisation des nutriments et limite les pertes par lixiviation [6, 10].

La qualité des engrais hydrosolubles est importante. Ils doivent présenter une bonne solubilité, une faible teneur en impuretés et une compatibilité avec l'eau utilisée. Certains engrais peuvent précipiter lorsqu'ils sont mélangés à une eau très calcaire ou à d'autres produits incompatibles. Ces précipitations peuvent réduire l'efficacité de la fertilisation et provoquer le colmatage du réseau d'irrigation [14].

Les engrais hydrosolubles occupent donc une place importante dans les systèmes modernes de fertilisation, car ils permettent une application précise, rapide et contrôlée des éléments nutritifs [6].

1.3.4. Fertigation

Fertigation est une technique qui consiste à injecter les engrais directement dans l'eau d'irrigation afin d'apporter simultanément l'eau et les éléments nutritifs à la zone racinaire. Elle est particulièrement utilisée avec les systèmes d'irrigation localisée, notamment le goutte-à-goutte, car elle permet de distribuer les nutriments de manière précise au voisinage des racines [6, 8].

Le principe de la fertigation repose sur la dissolution des engrais dans l'eau, puis leur transport à travers le réseau d'irrigation. Contrairement à l'épandage classique au sol, cette méthode permet une meilleure maîtrise de la dose appliquée, de la fréquence d'apport et de la répartition des éléments fertilisants [6].

La fertigation présente plusieurs avantages agronomiques. Elle améliore l'efficacité d'utilisation des engrais, réduit les pertes par lixiviation et favorise une meilleure homogénéité de distribution dans la zone racinaire. Selon Incrocci et al. [10], la

fertigation par goutte-à-goutte peut améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais de 30 à 50 % par rapport aux méthodes classiques d'épandage au sol. Elle contribue également à limiter les pertes d'éléments nutritifs vers les couches profondes du sol [11].

Le fractionnement des apports constitue l'un des principaux intérêts de la fertigation. Les besoins nutritionnels d'une plante ne sont pas constants pendant tout son cycle. Ils varient selon la phase de croissance, le développement racinaire, la formation des feuilles, la floraison, la fructification ou la maturation [12].

Cette technique permet aussi d'améliorer l'uniformité de distribution des engrais. Lorsque le réseau d'irrigation est bien conçu, les nutriments sont apportés de manière régulière sur l'ensemble de la parcelle. Cela limite les zones de sur-fertilisation ou de sous-fertilisation et favorise une croissance plus homogène des cultures [7].

Cependant, la fertigation nécessite une bonne maîtrise technique. La concentration de la solution nutritive doit être correctement ajustée afin d'éviter les risques de salinité excessive, de toxicité ou de déséquilibre nutritionnel. Un excès de sels dissous peut gêner l'absorption de l'eau par les racines et provoquer un stress osmotique [18].

De plus, certains engrais peuvent provoquer des précipitations chimiques lorsqu'ils sont mélangés avec une eau de mauvaise qualité ou avec des produits incompatibles. Ces précipitations peuvent réduire la disponibilité des nutriments et provoquer le colmatage des conduites ou des goutteurs. Pour cette raison, le contrôle du pH, de la conductivité électrique, de la solubilité des engrais et de la qualité de l'eau est essentiel pour assurer une fertigation efficace [17, 18].

La fertigation constitue ainsi une méthode moderne permettant de combiner l'irrigation et la fertilisation dans une même opération. Elle s'inscrit dans une logique d'agriculture de précision, car elle permet d'apporter les nutriments au bon moment, en quantité adaptée et directement dans la zone exploitée par les racines [6, 9].

1.3.5. Fertilisation de précision

Fertilisation de précision consiste à adapter les apports nutritifs aux besoins réels de la culture, au lieu d'appliquer des doses fixes et identiques pour toutes les parcelles. Elle vise à fournir le bon nutriment, à la bonne dose, au bon moment et au bon endroit [13].

Dans les méthodes traditionnelles, les apports d'engrais sont souvent réalisés selon des recommandations générales ou selon l'expérience de l'agriculteur. Cependant, les besoins nutritionnels des plantes varient selon plusieurs paramètres, tels que le type de culture, le stade de développement, la fertilité du sol, les conditions climatiques, la disponibilité en eau et les objectifs de rendement [12].

La fertilisation de précision repose aujourd'hui sur l'utilisation de capteurs, de systèmes embarqués, de réseaux IoT et d'outils d'aide à la décision permettant d'ajuster les apports aux besoins réels des cultures [19, 20, 21, 22].

Cette approche permet d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais, de réduire les pertes par lixiviation et de limiter les impacts environnementaux tout en maintenant des niveaux de production élevés [13, 19].

La fertilisation de précision représente ainsi une évolution importante vers une agriculture plus durable. Elle permet de concilier les objectifs de rendement, d'économie d'intrants, de protection de l'environnement et de préservation de la fertilité des sols [9, 19].

1.3.6. Risques liés à une fertilisation mal maîtrisée

Malgré ses avantages, la fertilisation peut devenir une source de problèmes lorsqu'elle n'est pas correctement maîtrisée. Les risques peuvent être agronomiques, économiques et environnementaux [14].

Sur le plan agronomique, une fertilisation insuffisante entraîne des carences nutritionnelles qui affectent directement la croissance et le rendement des cultures. Chaque élément nutritif présente des symptômes spécifiques de carence [12, 16].

À l'inverse, une fertilisation excessive peut provoquer une accumulation de sels dans le sol, augmenter les risques de toxicité et réduire la capacité d'absorption de l'eau par les racines [18].

Sur le plan économique, l'utilisation excessive d'engrais représente une perte financière pour l'agriculteur, car une partie importante des éléments nutritifs apportés n'est pas utilisée par les plantes [13].

Sur le plan environnemental, les pertes d'engrais peuvent provoquer la contamination des nappes phréatiques et des eaux de surface. Les nitrates issus des

engrais azotés sont particulièrement mobiles dans le sol et constituent l'une des principales sources de pollution diffuse en agriculture [14, 18].

Ces risques montrent l'importance d'une fertilisation raisonnée. L'objectif n'est pas d'augmenter systématiquement les apports, mais de les ajuster avec précision aux besoins réels des plantes et aux caractéristiques du sol [13].

1.4. Systèmes d'irrigation intelligents

1.4.1. Définition et contexte

Face aux défis croissants liés à la raréfaction des ressources en eau et à la nécessité d'améliorer la productivité agricole, les systèmes d'irrigation traditionnels ont progressivement cédé la place à des solutions automatisées et intelligentes. Un système d'irrigation intelligent est un dispositif capable d'acquérir des données environnementales en temps réel, de les analyser et de prendre des décisions d'arrosage de manière autonome, sans intervention humaine constante [19].

Ces systèmes reposent sur l'intégration de plusieurs technologies : les capteurs pour la mesure des paramètres physiques et chimiques du sol et de l'environnement, les microcontrôleurs ou ordinateurs embarqués pour le traitement des données, les actionneurs tels que les électrovannes et les pompes pour l'exécution des décisions, et enfin les algorithmes de commande pour la prise de décision automatisée [20].

L'objectif d'un tel système est d'apporter la juste quantité d'eau au bon moment, en tenant compte de l'état réel du sol et des besoins spécifiques de chaque culture, tout en minimisant les pertes en eau et en énergie.

1.4.2. Architecture générale d'un système d'irrigation automatisé

Un système d'irrigation automatisé repose généralement sur une architecture en trois couches fonctionnelles.

La couche de perception regroupe l'ensemble des capteurs chargés de mesurer les paramètres pertinents : humidité du sol, température et humidité de l'air, pH de la solution nutritive, conductivité électrique, ainsi que les capteurs de nutriments NPK. Ces capteurs fournissent une image quantitative et objective de l'état du milieu cultural.

La couche de traitement constitue le cœur du système. Elle est assurée par un microcontrôleur ou un ordinateur embarqué, tel que le Raspberry Pi, qui reçoit les

données des capteurs, les traite à l'aide d'algorithmes de décision et génère les commandes appropriées vers les actionneurs.

La couche d'action regroupe les actionneurs : électrovannes, pompes, injecteurs d'engrais et dispositifs de signalisation. Elle exécute les décisions prises par la couche de traitement en ouvrant ou fermant les circuits d'eau et d'engrais selon les besoins calculés.

1.5. Intelligence Artificielle dans les systèmes d'irrigation

1.5.1. Définition et apport de l'IA en agriculture

L'intelligence artificielle désigne l'ensemble des techniques permettant à une machine d'imiter certaines facultés cognitives humaines, telles que l'apprentissage, le raisonnement, la reconnaissance de formes et la prise de décision. Dans le domaine agricole, l'IA offre des perspectives considérables pour optimiser la gestion de l'eau, des engrais et des cultures [21].

L'application de l'IA à l'irrigation permet notamment de traiter de grandes quantités de données hétérogènes issues de multiples capteurs, d'identifier des corrélations complexes entre les paramètres du sol, du climat et de la plante, et de fournir des recommandations personnalisées adaptées à chaque type de culture et à chaque stade phénologique.

Parmi les approches d'IA les plus couramment utilisées dans les systèmes d'irrigation intelligents, on distingue les réseaux de neurones artificiels, les algorithmes d'apprentissage automatique (Machine Learning), les systèmes à base de règles expertes, et la logique floue.

1.5.2. Logique Floue dans les systèmes d'irrigation

1.5.2.1. Principes fondamentaux de la logique floue

La logique floue (Fuzzy Logic) est une extension de la logique booléenne classique introduite par Lotfi Zadeh en 1965. Contrairement à la logique binaire qui n'admet que deux valeurs (vrai ou faux, 0 ou 1), la logique floue permet de modéliser des degrés d'appartenance intermédiaires, ce qui la rend particulièrement adaptée à la représentation de concepts vagues ou imprécis présents dans les phénomènes naturels [24].

Le principe fondamental repose sur les ensembles flous. Pour un ensemble flou A , chaque élément x de l'univers du discours se voit attribuer un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ compris entre 0 et 1. Un degré de 0 signifie que l'élément n'appartient pas du tout à

l'ensemble, un degré de 1 indique une appartenance totale, et une valeur intermédiaire reflète une appartenance partielle.

Dans le contexte de l'irrigation, des concepts tels que « humidité faible », « température élevée » ou « besoin en eau important » ne peuvent pas être représentés de manière précise par des valeurs seuils binaires. La logique floue permet de modéliser ces concepts de façon naturelle et progressive, en s'approchant du raisonnement humain expert.

1.5.2.2. Architecture d'un contrôleur flou

Un contrôleur à logique floue comprend quatre composants principaux qui fonctionnent de manière séquentielle.

La fuzzification est la première étape. Elle consiste à transformer les valeurs numériques mesurées par les capteurs (valeurs nettes) en degrés d'appartenance aux ensembles flous. Par exemple, une humidité du sol mesurée à 28 % peut appartenir à 70 % à l'ensemble « faible » et à 30 % à l'ensemble « moyenne ».

La base de règles constitue le cœur du contrôleur. Elle regroupe un ensemble de règles floues de type « SI-ALORS » (IF-THEN) qui traduisent l'expertise agronomique.

Exemple :

SI (humidité_sol = FAIBLE) ET (température = ÉLEVÉE) ALORS (débit_irrigation = ÉLEVÉ).

Le moteur d'inférence est responsable de l'activation et de la combinaison des règles. Il évalue le degré de vérité de chaque condition et calcule la contribution de chaque règle à la conclusion finale, en utilisant des méthodes telles que l'inférence de Mamdani ou de Takagi-Sugeno.

La défuzzification est la dernière étape. Elle consiste à convertir la conclusion floue en une valeur numérique exploitable par les actionneurs. La méthode du centre de gravité (centroïde) est la plus utilisée en pratique.

1.5.3. Application de la logique floue à l'irrigation automatisée

La logique floue s'est imposée comme l'une des approches les plus efficaces pour le contrôle des systèmes d'irrigation, en raison de sa capacité à gérer l'incertitude inhérente aux mesures agricoles et à intégrer l'expertise humaine sous forme de règles linguistiques [25].

1.6. Systèmes d'irrigation intelligents préexistants

1.6.1. Travaux antérieurs recensés dans la littérature

De nombreux travaux scientifiques ont été consacrés au développement de systèmes d'irrigation automatisés. Nous présentons ici une sélection des réalisations les plus pertinentes par rapport à notre sujet, en analysant leurs architectures, leurs algorithmes de commande et leurs résultats.

a) Système d'aide à la décision pour la gestion de l'irrigation de Navarro-Hellín et al. [19]

Navarro-Hellín et al. Ont développé un système d'aide à la décision pour la gestion automatisée de l'irrigation en milieu agricole. Le système intègre un réseau de capteurs mesurant l'humidité du sol et les conditions climatiques ambiantes, couplé à un algorithme de décision basé sur la logique floue. Les variables d'entrée incluent l'humidité du sol et la température, tandis que la sortie pilote l'ouverture d'électrovannes de manière proportionnelle et continue. Les résultats expérimentaux démontrent une réduction significative de la consommation d'eau par rapport aux méthodes d'irrigation conventionnelles, avec maintien de rendements agricoles équivalents. Cependant, ce système se concentre exclusivement sur la gestion de l'eau et ne prend pas en charge la fertigation ni l'adaptation dynamique au type de culture.

b) Système IoT + Machine Learning pour la surveillance des nutriments du sol de Chaganti et al. [20]

Chaganti et al. Ont proposé une architecture IoT intégrant des capteurs de pH, de conductivité électrique, de NPK, de température et d'humidité du sol, connectés à une plateforme de traitement via un module WiFi. Un modèle de classification par Random Forest, entraîné sur des données collectées en conditions réelles de terrain, est utilisé pour prédire les besoins nutritifs de la culture et générer des recommandations de fertigation. Le système affiche ces recommandations sur une interface accessible à distance. Bien que ce système soit innovant dans son intégration de données multi-capteurs et dans sa

capacité de recommandation nutritionnelle, il présente l'inconvénient d'une dépendance à une connexion Internet et à une infrastructure cloud, ce qui le rend vulnérable aux interruptions de réseau fréquentes en milieu rural.

c) Système embarqué Raspberry Pi + Arduino de Patil et Kale [21]

Patil et Kale ont réalisé un système de contrôle de serre basé sur un Raspberry Pi couplé à un Arduino. Des capteurs DHT11 pour la température et l'humidité de l'air, un capteur d'humidité du sol et un capteur de lumière LDR permettent de surveiller les conditions de culture en temps réel. Le système applique des règles de décision à seuils fixes pour déclencher automatiquement l'arrosage, la ventilation et l'éclairage artificiel. Bien que ce système démontre la faisabilité d'une implémentation embarquée locale à faible coût, l'utilisation de seuils fixes limite son adaptation à différents types de cultures et le rend peu réactif aux variations saisonnières.

d) Système de surveillance agricole IoT de Gondchawar et Kawitkar [22]

Gondchawar et Kawitkar ont proposé une architecture complète de surveillance agricole intelligente basée sur l'IoT. Le système intègre des capteurs d'humidité du sol, de température, d'humidité de l'air et un pluviomètre. La communication s'effectue via un module GSM permettant d'envoyer des alertes SMS à l'agriculteur et de recevoir des commandes à distance. Ce travail est particulièrement pertinent pour les zones rurales sans accès Wifi stable. En revanche, le système est limité à la gestion de l'irrigation uniquement, sans prise en charge de la fertigation ni de recommandations nutritionnelles.

1.6.2. Tableau comparatif des systèmes existants

Le Tableau 1.1 représente une comparaison entre plusieurs systèmes d'irrigation intelligents existants, en tenant compte des capteurs utilisés, des algorithmes de contrôle adoptés, des points forts et des limites identifiées.

Tableau 1.1 : Comparaison des systèmes d'irrigation intelligents préexistants.

Système / Référence	Capteurs utilisés	Algorithme de contrôle	Points forts	Limites identifiées
Navarro-Hellín et al. [19] – Système d'aide à la décision pour l'irrigation	Humidité sol, température	Logique floue	Réduction de la consommation d'eau, réponse continue	Pas de fertigation, pas d'adaptation au type de culture
Chaganti et al. [20] – IoT + ML pour surveillance des nutriments	NPK, pH, EC, température	Random Forest	Prédiction des besoins nutritifs	Connexion cloud obligatoire, vulnérabilité réseau
Patil et al. [21] – Raspberry Pi + Arduino pour serre	Humidité sol, DHT11, LDR	Seuils fixes	Contrôle local, faible coût	Pas d'adaptation au type de culture
Gondchawar & Kawitkar [22] – Agriculture intelligente IoT	Humidité, température, pluie	Règles expertes	Surveillance à distance via GSM	Irrigation uniquement, pas de fertigation

1.6.3. Analyse critique et lacunes identifiées

L'analyse comparative des systèmes préexistants permet de dégager plusieurs observations importantes.

Premièrement, la grande majorité des systèmes recensés se concentre exclusivement sur l'irrigation, sans intégration de la fertigation. Or, l'eau et les nutriments constituent deux facteurs complémentaires et indissociables de la croissance des plantes. Un système de gestion intégré eau-nutriments représente donc une valeur ajoutée significative.

Deuxièmement, les systèmes utilisant des seuils fixes de décision présentent une rigidité qui limite leur adaptabilité à différentes cultures et à différentes saisons. Une tomate et une laitue n'ont pas les mêmes besoins en eau, et ces besoins évoluent au cours du cycle de croissance. Un système intelligent doit pouvoir s'adapter dynamiquement à ces variations.

Troisièmement, peu de systèmes proposent des recommandations compréhensibles et explicites à destination des agriculteurs. L'intégration d'un module d'IA capable de formuler des conseils en langage naturel représente un apport important pour l'adoption de ces technologies par les praticiens.

Enfin, les systèmes dépendant d'une infrastructure cloud présentent une vulnérabilité en cas de coupure de connexion. La combinaison d'un traitement local par logique floue pour les décisions temps réel et d'un module IA distant pour les recommandations stratégiques constitue une architecture hybride robuste.

1.7. Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions essentielles liées à l'irrigation, à la fertilisation et aux systèmes agricoles intelligents. Les différentes méthodes d'irrigation, les besoins nutritionnels des plantes, ainsi que le rôle des éléments NPK ont été abordés. Nous avons également présenté la fertigation, la fertilisation de précision et l'apport des technologies modernes telles que l'IoT, les capteurs et la logique floue dans l'automatisation agricole.

L'analyse des systèmes existants a permis de mettre en évidence plusieurs limites importantes. La plupart des solutions étudiées se concentrent principalement sur l'irrigation, sans intégrer de manière complète la gestion des nutriments. De plus, les systèmes basés sur des seuils fixes restent peu flexibles face aux variations des cultures, des saisons et des stades de croissance. Certaines solutions dépendent également fortement du cloud, ce qui peut poser un problème en cas de coupure de connexion.

Ces observations montrent l'intérêt de développer un système plus complet, capable de gérer à la fois l'eau et les nutriments, tout en assurant une prise de décision locale, rapide et adaptée aux conditions réelles. Cette étude permet donc de mieux comprendre les besoins du système proposé. Le chapitre suivant sera consacré à la conception matérielle et logicielle de notre solution.

CHAPITRE 2

CONCEPTION MATÉRIELLE ET LOGICIELLE

2.1. Introduction

Le présent chapitre constitue le cœur de la phase de conception : il a pour objectif de décrire de manière détaillée l'architecture retenue, les composants matériels qui la constituent, l'environnement logiciel qui l'anime, ainsi que le modèle de données et la logique de décision sur lesquels reposent l'irrigation et la fertilisation automatiques.

L'architecture proposée s'organise autour de deux unités complémentaires. Une unité de décision, le nano-ordinateur Raspberry Pi 3 B+, héberge le serveur local, l'interface utilisateur, la base de données et les algorithmes de décision. Une unité d'exécution, le microcontrôleur ESP32, se charge de la lecture de certains capteurs et de la commande physique des actionneurs.

2.2. Architecture générale du système

Le système adopte une architecture en couches qui distingue clairement l'interface utilisateur, le traitement décisionnel et l'exécution matérielle. L'organisation générale repose sur trois couches fonctionnelles :

La figure 2.1 représente l'architecture générale du système en couches.

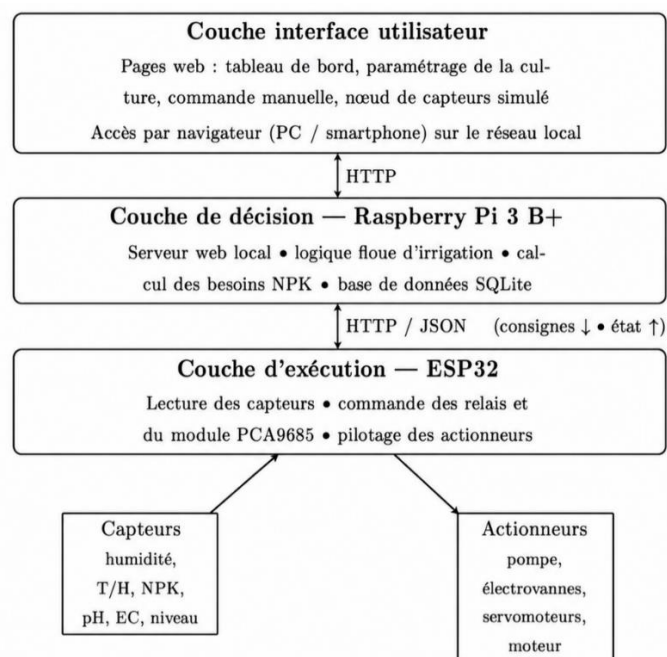


Figure 2.1 : Architecture générale du système en couches.

–La couche interface utilisateur expose des pages web accessibles par navigateur (PC ou smartphone) sur le réseau local. Elle regroupe le tableau de bord, le paramétrage de la culture, la commande manuelle et le nœud de capteurs simulé.

–La couche de décision, hébergée sur le Raspberry Pi 3 B+, comprend le serveur web local, la logique floue d'irrigation, le calcul des besoins NPK et la base de données SQLite. Elle reçoit les saisies de l'utilisateur et les données de capteurs, calcule les consignes et les transmet à la couche inférieure via HTTP/JSON.

–La couche d'exécution, assurée par l'ESP32, lit les capteurs, commande les relais et le module PCA9685, et pilote l'ensemble des actionneurs.

La figure 2.2 représente l'organigramme fonctionnel illustrant la répartition des rôles entre le Raspberry Pi et l'ESP32.

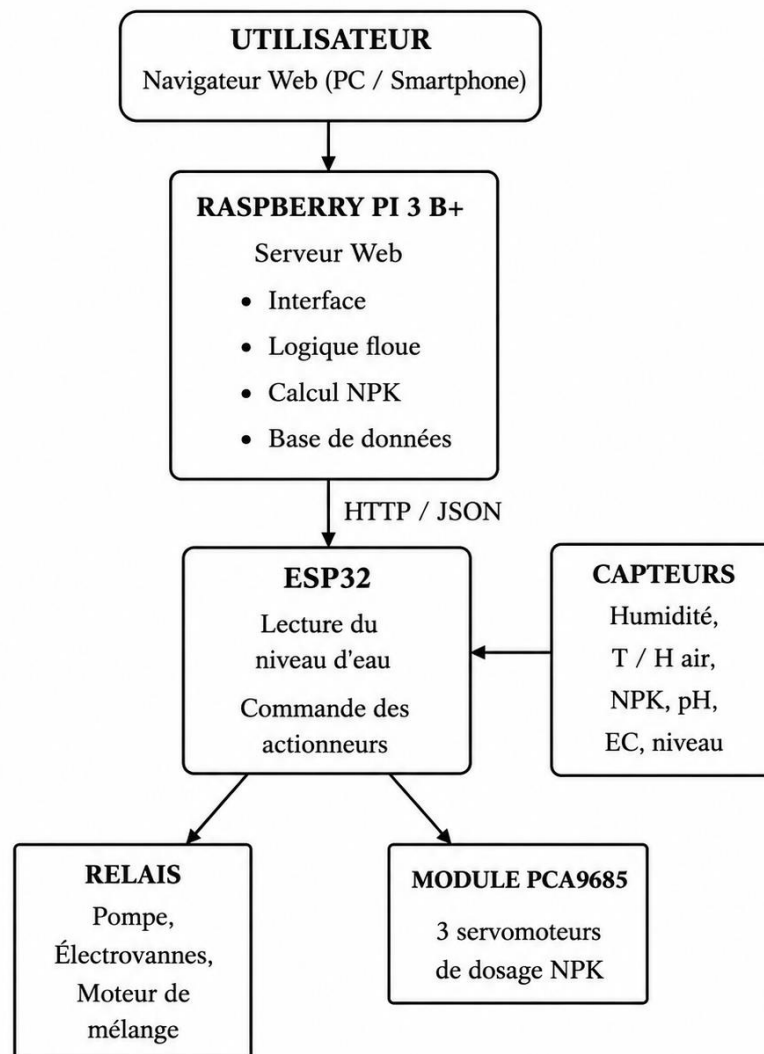


Figure 2.2 : Organigramme fonctionnel illustrant la répartition des rôles entre le Raspberry Pi et l'ESP32.

L'organigramme fonctionnel met en évidence la répartition des rôles entre l'unité de décision et l'unité d'exécution ainsi que les flux d'information entre les différents organes.

2.3. Description du matériel

2.3.1. Unité de décision : Raspberry Pi 3 B+

Le Raspberry Pi 3 B+ est une carte nano-ordinateur qui se distingue d'un microcontrôleur classique par sa capacité à exécuter un véritable système d'exploitation. Cette propriété est déterminante pour notre application, qui requiert simultanément une interface utilisateur, des traitements de décision et un stockage persistant des données.

Dans le système, le Raspberry Pi assure le rôle d'unité de décision et de supervision. Il héberge le serveur web et les pages de commande, reçoit et valide les saisies de l'utilisateur, gère la bascule entre les modes automatique et manuel, calcule la durée d'irrigation par logique floue, détermine les besoins et les déficits en NPK, vérifie les conditions de sécurité liées au pH, à la conductivité électrique et au niveau d'eau, transmet ensuite les consignes à l'ESP32 et enregistre l'ensemble des informations dans une base de données locale.

Le Raspberry Pi constitue ainsi le cerveau logiciel du dispositif. Il ne pilote pas directement les actionneurs : il élabore les décisions et les délègue à l'unité d'exécution, ce qui préserve la cohérence de l'architecture en couches décrite précédemment [26].

La figure 2.3 représente la carte Raspberry Pi 3 B+.



Figure 2.3 : Carte Raspberry Pi 3 B+.

2.3.2. Contrôleur embarqué : ESP32

ESP32 est un microcontrôleur intégrant nativement une connectivité sans fil, propriété qui le rend particulièrement adapté aux applications de l'Internet des objets.

Dans notre conception, il joue le rôle de contrôleur de terrain : il reçoit les consignes émises par le Raspberry Pi, lit le capteur de niveau du réservoir, actionne les relais commandant la pompe, les électrovannes et le moteur mélangeur, pilote les servomoteurs de dosage par l'intermédiaire du module PCA9685, les informations retournent à l'unité de décision l'état des actionneurs et le niveau d'eau mesuré.

En isolant la commande physique du traitement logiciel, l'ESP32 améliore la robustesse de l'ensemble : même lorsque le serveur traite une décision, l'exécution électrique demeure assurée par une carte embarquée spécialisée (figure 2.4) [27].

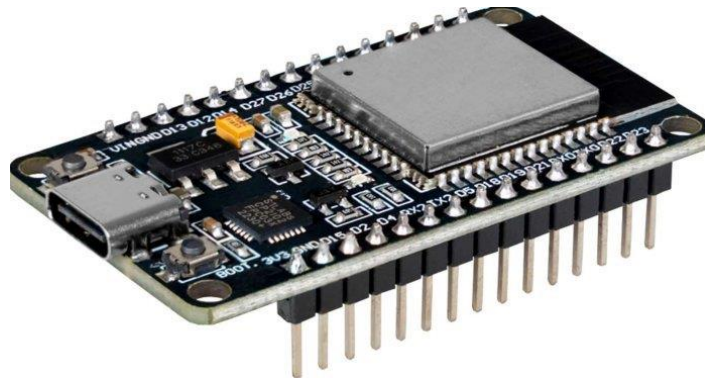


Figure 2.4 : Carte ESP32 utilisée comme unité d'exécution et de commande.

2.3.3. Interface d'affichage local : écran LCD tactile 7 pouces

Un écran LCD tactile de 7 pouces, d'une résolution de 1024×600 pixels est utilisé comme interface d'affichage locale du système. Connecté au Raspberry Pi via l'interface HDMI, il permet d'afficher directement l'interface utilisateur développée pour le pilotage et la supervision du système d'irrigation et de fertigation intelligentes.

Dans la version actuelle du prototype, cet écran affiche les différentes pages de l'application web, notamment les informations relatives à la culture sélectionnée, à la surface cultivée, au stade de croissance, à l'humidité du sol, à la température, aux valeurs de N, P et K, au pH, à la conductivité électrique, à la durée d'irrigation calculée, aux recommandations de fertilisation, au niveau d'eau du réservoir ainsi qu'à l'état des différents actionneurs.

Grâce à sa fonction tactile, l'écran permet également à l'utilisateur d'interagir directement avec le système sans nécessiter un ordinateur ou un smartphone externe. Il constitue ainsi une véritable interface homme-machine, assurant à la fois la visualisation des données, la saisie des paramètres et le contrôle du dispositif. Cette solution améliore l'autonomie du prototype et facilite son utilisation sur le terrain (Figure 2.5) [28].

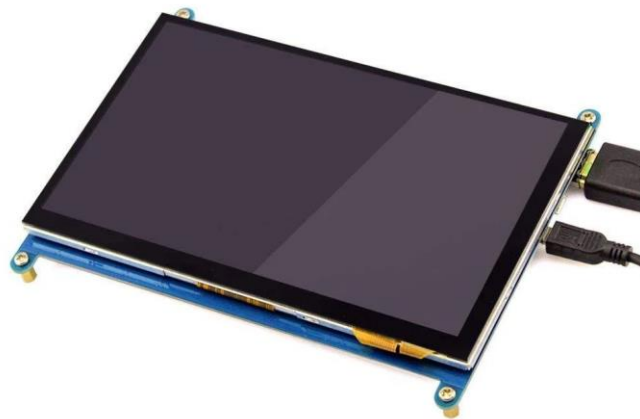


Figure 2.5 : Écran tactile LCD tactile 7 pouces pour l'interface locale.

2.3.4. Capteurs

2.3.4.1. Capteur d'humidité du sol

Le capteur capacitif d'humidité du sol estime la quantité d'eau présente dans le substrat. Il constitue l'entrée principale du module d'irrigation, sa valeur étant exprimée en pourcentage après étalonnage. Un sol sec déclenche un besoin d'irrigation, un sol moyennement humide entraîne une irrigation courte ou moyenne selon la température, tandis qu'un sol humide conduit à l'arrêt de l'arrosage [29].

La figure 2.6 représente le capteur capacitif d'humidité du sol.



Figure 2.6 : Capteur capacitif d'humidité du sol.

2.3.4.2. Capteur de température et d'humidité de l'air DHT22

Le DHT22 est un capteur numérique permettant de mesurer la température et l'humidité relative de l'air.

La température constitue, avec l'humidité du sol, l'une des deux entrées de la logique floue d'irrigation. Lorsque la température augmente, l'évaporation s'intensifie et les besoins hydriques de la plante peuvent croître. Le système peut alors prolonger la durée d'irrigation pour une même valeur d'humidité du sol.

La combinaison de ces deux grandeurs permet ainsi d'obtenir une décision plus progressive et plus adaptée qu'un raisonnement basé uniquement sur l'humidité du sol [30].

La figure 2.7 représente le capteur de température et d'humidité DHT22.

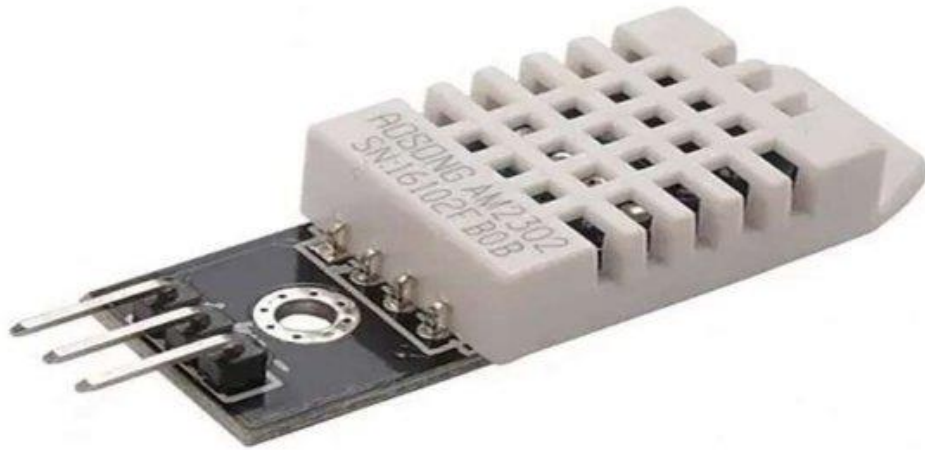


Figure 2.7 : Capteur de température et d'humidité DHT22.

2.3.4.3. Capteur NPK du sol

Capteur NPK fournit une estimation de la disponibilité des trois macronutriments essentiels à la croissance végétale : l'azote, le phosphore et le potassium. Les valeurs issues du capteur servent à estimer la fraction déjà présente dans le sol, fraction qui est ensuite confrontée aux besoins théoriques de la culture afin d'en déduire un déficit pour chaque élément [31].

2.3.4.4. Capteur de pH

Le pH conditionne directement la disponibilité des éléments nutritifs pour la plante. Dans notre conception, le pH est utilisé comme paramètre de sécurité de la fertilisation. À chaque culture est associée une plage de pH acceptable ; si la mesure sort de cette plage, le système émet un avertissement ou bloque la fertilisation [32].

2.3.4.5. Capteur de conductivité électrique EC

Le capteur de conductivité électrique renseigne indirectement sur la concentration en sels dissous de la solution du sol. Une valeur de conductivité trop élevée traduit un risque de salinité susceptible de stresser la plante. Lorsqu'elle dépasse la limite maximale fixée pour la culture, la fertilisation est interrompue [33].

La figure 2.8 représente le capteur multifonction 5 en 1 NPK–pH–EC pour l'analyse nutritionnelle et physico-chimique du sol.



Figure 2.8 : Capteur multifonction 5 en 1 NPK–pH–EC pour l'analyse nutritionnelle et physico-chimique du sol.

2.3.4.6. Capteur de distance à ultrasons HC-SR04

Le niveau d'eau du réservoir est mesuré au moyen d'un capteur à ultrasons HC-SR04. Ce capteur émet une onde ultrasonore vers la surface de l'eau et mesure le temps de retour de l'écho, dont se déduit la distance entre le capteur et la surface. La hauteur d'eau disponible et le taux de remplissage du réservoir s'obtiennent alors par [34] :

$$h_{eau} = h_r - d ; \quad \tau_{eau} = \frac{(h_r - d)}{h_r} \times 100 \quad (2.1)$$

Où h_r désigne la hauteur totale du réservoir et d la distance mesurée [34] :

Le taux de remplissage $\tau(\text{eau})$ intervient dans trois décisions : le déclenchement du remplissage automatique s'actionne lorsque le niveau devient faible, l'arrêt du remplissage s'actionne lorsque le niveau est suffisant, et le blocage de la pompe de sortie se déclenchera dès que le niveau est trop bas, protégeant ainsi la pompe contre tout fonctionnement à sec (à vide).

La figure 2.9 représente le principe de fonctionnement du capteur ultrasonique HC-SR04 par l'émission et la réception d'une onde sonore.

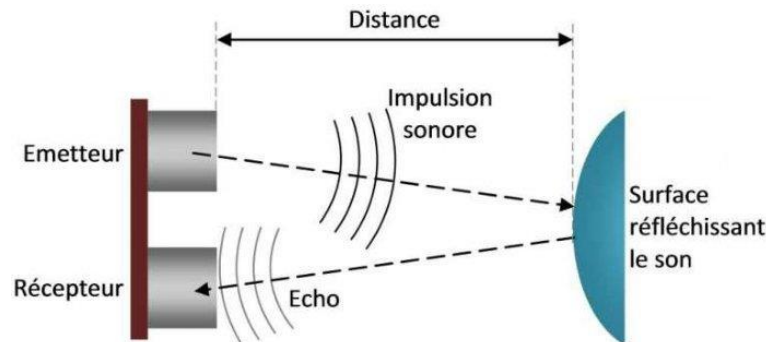


Figure 2.9 : Principe de fonctionnement du capteur ultrasonique HC-SR04 par l'émission et la réception d'une onde sonore [34].

La figure 2.10 représente le capteur ultrasonique HC-SR04 utilisé pour la mesure du niveau d'eau dans le réservoir.



Figure 2.10 : Capteur ultrasonique HC-SR04 utilisé pour la mesure du niveau d'eau dans le réservoir.

2.3.5. Organes de dosage et de commande

2.3.5.1. Module PCA9685 et servomoteurs de dosage

Le PCA9685 est un module générateur de signaux de modulation de largeur d'impulsion, piloté par l'ESP32 via le bus I²C. Il commande les trois servomoteurs chargés du dosage des fertilisants. Chaque servomoteur est associé à un compartiment de fertilisant et à un canal du module, comme le récapitule le tableau 2.1 [35].

Tableau 2.1 : Affectation des canaux du module PCA9685 aux organes de dosage.

Canal	Servomoteur	Rôle
0	Servo N	Dosage de l'azote
1	Servo P	Dosage du phosphore
2	Servo K	Dosage du potassium

Le principe consiste à convertir le déficit nutritif calculé en une durée d'ouverture, à partir d'un débit massique déterminé expérimentalement. L'ouverture peut être réalisée par impulsions successives plutôt qu'en une seule ouverture prolongée, afin d'améliorer la régularité du dosage.

$$t_{\text{ouverture}} = \frac{m_{\text{déficit}}}{q_m} \quad (2.2)$$

Équation de dosage massique utilisée pour convertir une masse d'engrais à distribuer en temps d'ouverture, avec q_m le débit massique expérimental du doseur.

La figure 2.11 représente le module PCA9685 à 16 canaux utilisé pour le pilotage des servomoteurs de dosage des engrais NPK.

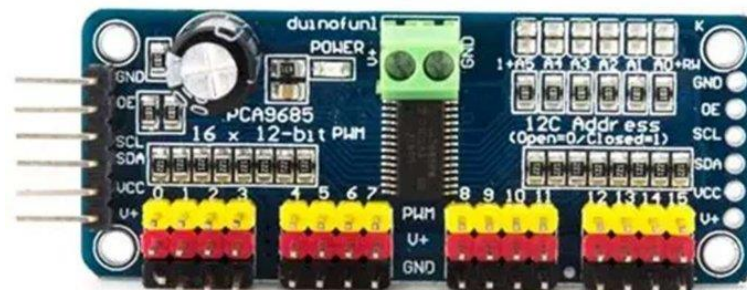


Figure 2.11 : Module PCA9685 à 16 canaux utilisé pour le pilotage des servomoteurs de dosage des engrais NPK.

2.3.6. Actionneurs de puissance et organes de commutation

Les sorties de l'ESP32 fournissent uniquement des signaux de commande de faible puissance. Pour cette raison, un module relais est nécessaire afin de commander les charges électriques du système, telles que la pompe, les électrovannes et le moteur mélangeur.

Les relais assurent l'interface entre la partie commande, fonctionnant en basse tension, et la partie puissance, chargée d'alimenter les actionneurs.

Dans notre système, ces actionneurs permettent de gérer le remplissage du réservoir, le mélange des fertilisants avant leur distribution., et enfin l'acheminement de l'eau ou de la solution nutritive vers la plante.

2.3.6.1. Relais

Le module relais est un interrupteur commandé à l'aide de l'électricité. Il permet à l'ESP32 de commander les actionneurs qui consomment plus de l'électricité, comme la pompe, les électrovannes ou le moteur mélangeur, tout en séparant la partie commande de la partie puissance [36].

La figure 2.12 représente le module relais utilisé pour la commande des actionneurs du système.



Figure 2.12 : Module relais utilisé pour la commande des actionneurs du système.

2.3.6.2. Pompe immergée IP68

La pompe immergée IP68 est placée directement dans l'eau ou dans la solution nutritive. Elle sert à transférer le liquide du réservoir vers la plante ou vers le circuit d'irrigation. Son indice de protection IP68 indique qu'elle est adaptée à une utilisation en immersion [37].

La figure 2.13 représente la pompe immergée IP68 utilisée pour l'acheminement de l'eau ou de la solution nutritive vers la plante.



Figure 2.13 : Pompe immergée IP68 utilisée pour l'acheminement de l'eau ou de la solution nutritive vers la plante.

2.3.6.3. Électrovannes

Les électrovannes sont des vannes commandées électriquement permettant d'autoriser ou de bloquer le passage de l'eau dans le circuit hydraulique. L'électrovanne d'entrée permet de contrôler le remplissage automatique du réservoir selon le niveau d'eau mesuré. L'électrovanne de sortie contrôle le passage de l'eau ou de la solution nutritive vers la zone de culture [38].

La figure 2.14 représente l'électrovanne utilisées pour le contrôle de l'entrée et de la sortie d'eau dans le système.



Figure 2.14 : Électrovannes utilisées pour le contrôle de l'entrée et de la sortie d'eau dans le système.

2.3.6.4. Moteur mélangeur

Le moteur mélangeur est un moteur à courant continu utilisé pour homogénéiser l'eau et les fertilisants dans le réservoir de mélange. Après l'ajout des engrais, il actionne l'hélice afin d'obtenir une solution nutritive uniforme avant son acheminement vers la plante. [39] La figure 2.15 représente le moteur à courant continu utilisé pour le mélange de la solution nutritive.

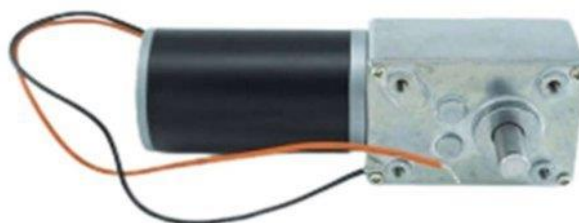


Figure 2.15 : Moteur à courant continu utilisé pour le mélange de la solution nutritive.

2.3.6.5. Servomoteurs MG996R

Les mouvements mécaniques du système, notamment l'ouverture et le positionnement des mécanismes de dosage, sont assurés par des servomoteurs MG996R. Ces servomoteurs ont été retenus pour leur couple élevé et leur robustesse, grâce à leur train d'engrenages métalliques.

Le MG996R fonctionne généralement sous une tension comprise entre 4,8 V et 7,2 V, avec une alimentation courante de 5 V à 6 V. Sa consommation peut augmenter fortement lors du démarrage ou en cas de blocage mécanique, ce qui justifie l'utilisation d'une alimentation séparée pour les servomoteurs, fournie par le convertisseur XL4015. L'ajout d'un condensateur de découplage sur le rail d'alimentation permet également de limiter les chutes de tension [40].

La commande des servomoteurs s'effectue par modulation de largeur d'impulsion, ou PWM, à une fréquence d'environ 50 Hz. Dans notre système, ces signaux PWM sont générés par le module PCA9685, relié à l'ESP32 par le bus I2C. Ce module permet de piloter plusieurs servomoteurs simultanément tout en réduisant la charge de commande de l'ESP32.

Chaque servomoteur MG996R est donc connecté au PCA9685 par son fil de signal, tandis que son alimentation est reliée à la borne V+ issue du XL4015. La masse des servomoteurs est connectée au plan de masse commun du montage, condition indispensable pour assurer une référence électrique partagée avec l'ESP32 et garantir une commande fiable.

La figure 2.16 représente le servomoteur MG996R.



Figure 2.16 : Servomoteur MG996R.

2.3.7. Alimentation et câblage

Les composants du système ne fonctionnent pas tous sous la même tension ni au même courant, ce qui impose une alimentation structurée. Le montage est alimenté par une batterie plomb-acide étanche de 12 V / 7 Ah, choisie pour sa faible résistance interne et sa capacité à fournir les pointes de courant des actionneurs.

À partir de cette source unique, deux convertisseurs continu-continu de type abaisseur dérivent les tensions régulées nécessaires : un module XL4015, capable de débiter jusqu'à environ 5 A, fournit la puissance des servomoteurs via la borne V+ du PCA9685, tandis qu'un module LM2596 délivre une tension stable de 5 V destinée à l'alimentation de l'ESP32 [41, 42].

La figure 2.17 représente les convertisseurs DC-DC utilisés dans le système.

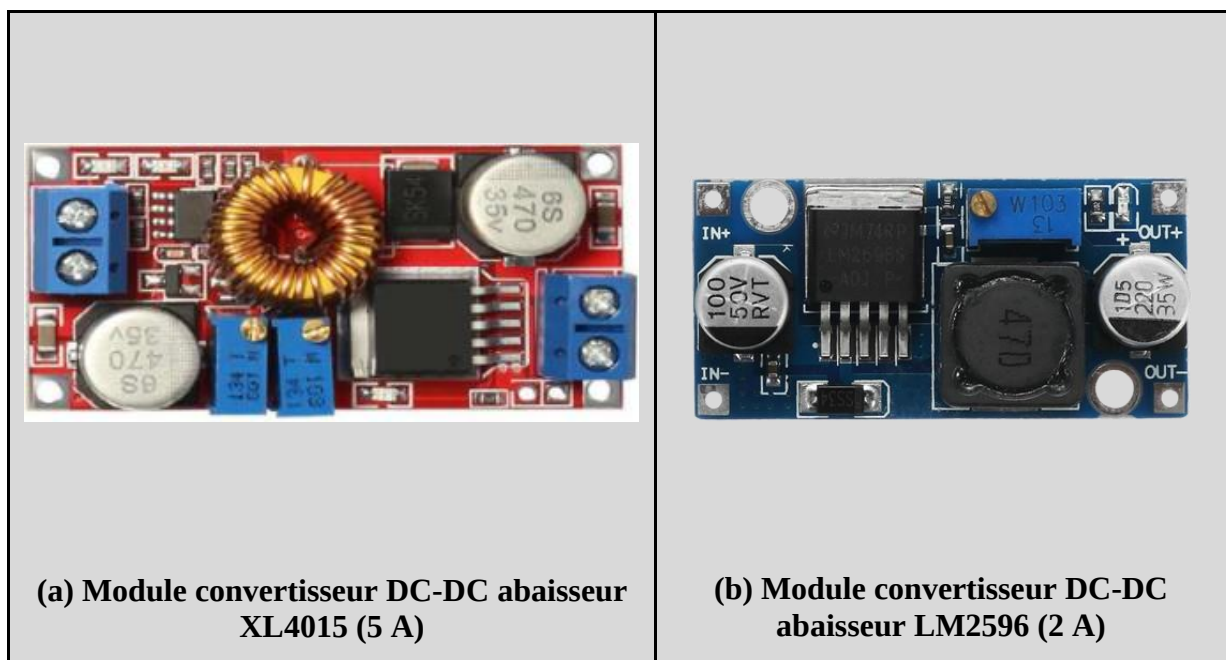


Figure 2.17 : Convertisseurs DC-DC utilisés dans le système.

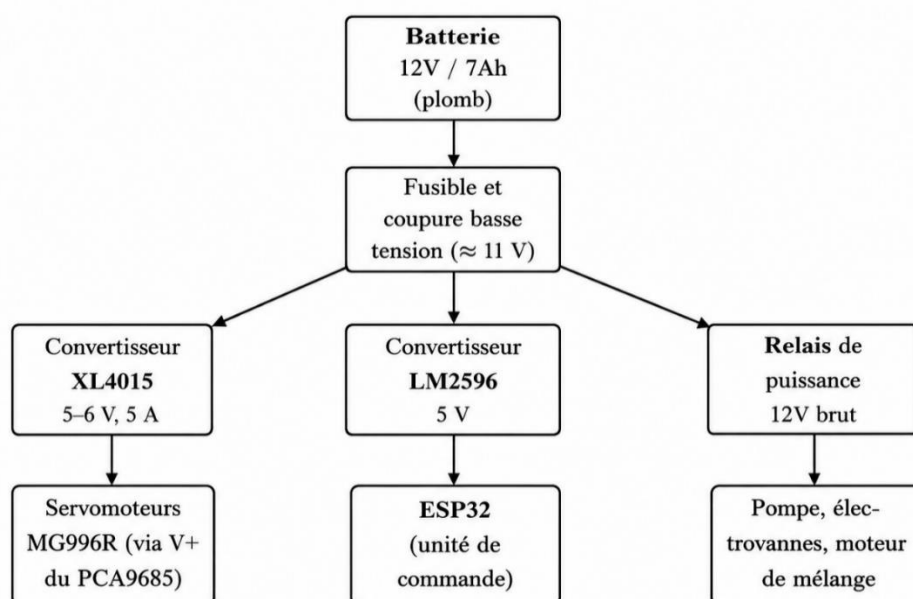
Les charges de forte consommation : pompe, électrovannes et moteur mélangeur ne sont pas tirées des rails régulés mais commutées par les relais directement sur la tension brute de la batterie.

Plusieurs précautions sont nécessaires pour garantir la fiabilité de l'ensemble. Il est d'abord indispensable de régler la tension de sortie de chaque convertisseur à vide, à l'aide d'un multimètre, avant tout raccordement des composants, afin d'éviter toute détérioration des charges.

L'ESP32 doit être alimenté par une tension stable et séparée de celle des servomoteurs. Les masses de la batterie, des convertisseurs, de l'ESP32 et du PCA9685 doivent être reliées entre elles, car une masse commune constitue la référence électrique partagée par tous les signaux de commande.

Il est également recommandé de placer un condensateur de découplage de forte capacité au plus près du rail d'alimentation des servomoteurs, afin d'absorber les pics de courant. Les charges de forte consommation, telles que la pompe, les électrovannes et le moteur mélangeur, doivent être commandées par relais directement à partir de la tension de la batterie, et non depuis les rails régulés.

Cette séparation entre la partie commande et la partie puissance permet de limiter les perturbations électriques. Une alimentation insuffisante ou instable pourrait provoquer des redémarrages intempestifs de l'ESP32, des mouvements erratiques des servomoteurs ou un mauvais fonctionnement des relais (Figure 2.18).



Masse commune reliant batterie, convertisseurs, ESP32 et PCA9685

Figure 2.18 : Schéma de câblage de la partie puissance et commande.

2.4. Aspect logiciel du système

2.4.1. Environnement de développement du microcontrôleur

Le programme de l'ESP32 est développé sous l'environnement Arduino IDE, qui permet d'écrire, de compiler et de téléverser le code vers la carte. Ce programme assure la connexion au réseau sans fil, la réception des requêtes HTTP, la lecture du capteur à ultrasons, la commande des relais, le pilotage du module PCA9685, la gestion des servomoteurs et le renvoi de l'état du système vers le Raspberry Pi [43].

2.4.2. Serveur local et interface web

Le Raspberry Pi héberge un serveur local accessible depuis tout terminal connecté au même réseau. Ce serveur affiche le tableau de bord, enregistre les paramètres de culture, reçoit les données de capteurs, exécute la logique floue et le calcul des besoins NPK, puis transmet les consignes à l'ESP32. L'interface se compose de plusieurs pages décrites dans le tableau 2.2 [44, 45].

Tableau 2.2 : Pages de l'interface web et fonctions associées.

Page	Fonction principale
Tableau de bord	Vue d'ensemble de l'état du système : mesures courantes, durée d'irrigation et décision de fertilisation, niveau d'eau et état des actionneurs.
Paramétrage de la culture	Sélection de la culture, du stade de croissance et de la surface cultivée, ainsi que du mode de fonctionnement.
Commande manuelle	Activation directe des actionneurs (pompe, électrovannes, doseurs, moteur de mélange), sous réserve des sécurités.
Nœud de capteurs simulé	Injection manuelle de valeurs de capteurs afin de valider les algorithmes de décision avant l'intégration du matériel réel.

2.4.3. Communication HTTP/JSON

L'échange entre le Raspberry Pi et l'ESP32 repose sur le protocole HTTP et le format JSON. Un message représentatif est donné ci-après [46] :

```
{  
  "mode": "AUTO",  
  "crop": "Pomme de terre",  
  "surface_m2": 20,  
  "soil_moisture": 25,  
  "temperature": 31,  
  "irrigation_time_sec": 60,  
  "N_deficit_g": 0,  
  "P_deficit_g": 210,  
  "K_deficit_g": 432,  
  "tank_water_percent": 70,  
  "pump_out_status": "OFF"  
}
```

2.4.4. Base de données

Une base de données locale, de type SQLite, conserve les informations significatives du système : date et heure, culture, surface, stade de croissance, humidité du sol, température, valeurs de N, P et K, pH, conductivité électrique, niveau d'eau, durée d'irrigation, déficits calculés et état des actionneurs.

2.4.5. Modes de fonctionnement automatique et manuel

Le système distingue deux modes de fonctionnement. En mode automatique, l'utilisateur ne saisit que les informations de base ; le Raspberry Pi calcule ensuite l'ensemble des décisions et l'ESP32 exécute les commandes correspondantes. En mode manuel, l'utilisateur agit directement sur chaque actionneur depuis l'interface web. Certaines sécurités demeurent toutefois actives quel que soit le mode : ainsi, lorsque le niveau d'eau est trop faible, la pompe de sortie reste bloquée même en commande manuelle.

2.5. Modélisation des données et logique de décision

L'organigramme ci-dessous résume l'enchaînement du cycle de décision exécuté périodiquement par le Raspberry Pi. Ce cycle comprend successivement : la lecture des capteurs et des paramètres de culture, le calcul des besoins NPK et des déficits, la vérification des conditions de sécurité (pH et EC), le dosage NPK par les servomoteurs, le calcul de la durée d'irrigation par logique floue, la vérification du niveau d'eau, l'exécution de l'irrigation et l'enregistrement des données en base.

La figure 2.19 représente l'organigramme du cycle de décision du Raspberry Pi.

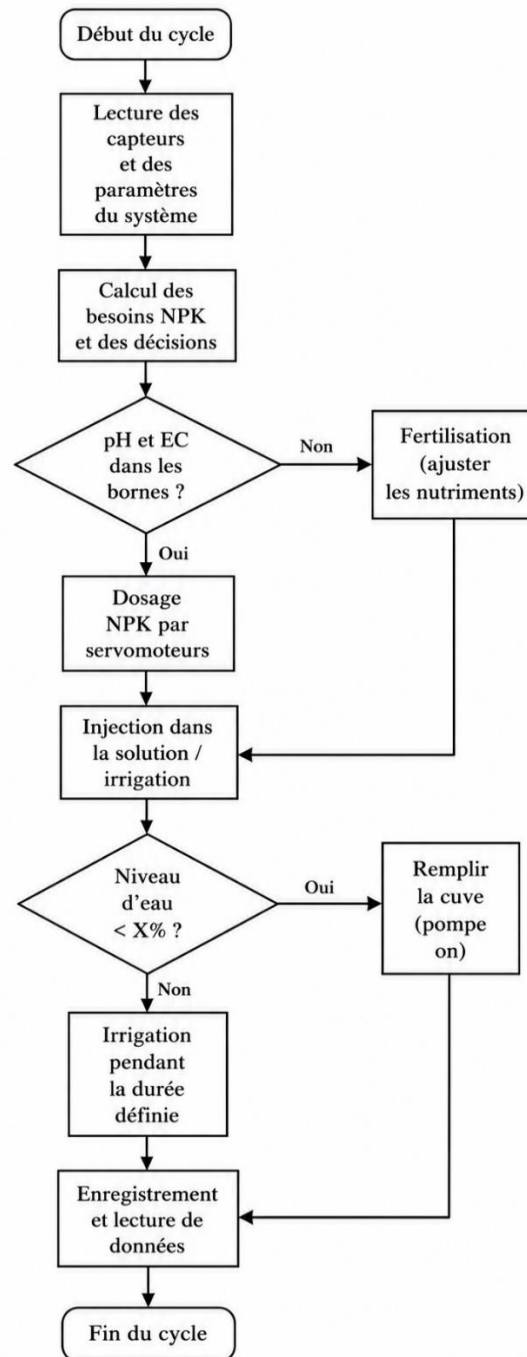


Figure 2.19 : Organigramme du cycle de décision du Raspberry Pi.

2.5.1. Catégories de données

Les données manipulées par le système se répartissent en quatre catégories. La première regroupe les saisies de l'utilisateur : la culture, la surface cultivée exprimée en mètres carrés, le stade de croissance et le mode de fonctionnement. La deuxième rassemble les mesures de sol et d'environnement. La troisième catégorie concerne les données du réservoir. La quatrième, enfin, correspond aux données de référence agronomiques [47].

2.5.2. Données de référence agronomiques

Les valeurs de référence agronomiques intégrées dans le prototype notamment les besoins en NPK, les plages de pH acceptables, les seuils de conductivité électrique maximale et les cibles d'humidité du sol ont été extraites et adaptées du dataset Crop Recommendation Dataset publié sur Kaggle par Ingle [55]. Ce dataset regroupe des mesures réelles de sol (N, P, K, pH, humidité, température, pluviométrie) associées à 22 cultures différentes. Les valeurs médianes par culture ont été utilisées comme valeurs cibles de référence dans le système.

Il est important de préciser que ces valeurs servent uniquement de base de configuration initiale du prototype. La commande temps réel des actionneurs repose sur les mesures effectuées par les capteurs locaux et sur les règles de décision intégrées dans l'application, et non sur une interrogation directe du dataset.

Les données sont rassemblées dans le tableau 2.3. Trois cultures sont retenues dans le prototype : la pomme de terre, la tomate et le blé.

Tableau 2.3 : Données agronomiques de référence du prototype, extraites et adaptées du Crop Recommendation Dataset [55].

Culture	N (kg/ha)	P (kg/ha)	K (kg/ha)	pH min	pH max	EC max
Pomme de terre	30	150	180	5,5	6,5	2,0
Tomate	298	107	114	6,0	7,0	2,5
Blé	60	40	20	6,0	7,5	3,0

Les besoins nutritionnels d'une plante varient au cours de son cycle. Pour en tenir compte, les valeurs de référence sont pondérées par des coefficients de correction propres à chaque stade de croissance, présentés dans le tableau 2.4 [12,13,16].

Tableau 2.4 : Coefficients de correction des besoins NPK selon le stade de croissance [12,13,16].

Stade	Coef. N	Coef. P	Coef. K	Justification agronomique
Semis / germination	0,5	1,2	0,5	Le développement racinaire requiert plus de phosphore
Végétatif	1,2	0,8	0,8	La croissance des feuilles et tiges requiert plus d'azote
Floraison	0,8	1,0	1,0	Nutrition équilibrée
Fructification	0,6	0,8	1,3	La formation des fruits et tubercules requiert plus de potassium
Récolte	0,0	0,0	0,0	La fertilisation est arrêtée

2.5.3. Calcul des besoins en NPK

Les besoins de référence étant exprimés en kilogrammes par hectare, le système les convertit en grammes pour la surface réellement cultivée. En notant $Q(\text{kg/ha})$ le besoin de référence d'un élément et S la surface exprimée en mètres carrés, et en rappelant qu'un hectare correspond à 10 000 m² et qu'un kilogramme vaut 1 000 g, le besoin de base $Q(\text{base})$ s'écrit : [12, 13]

$$Q_{base} = \frac{(B_{ref} \times S)}{10\,000} \quad (2.3)$$

Ce besoin de base est ensuite corrigé par le coefficient $k(\text{stade})$ correspondant au stade de croissance, ce qui donne le besoin requis [12, 13]

$$Q(\text{req}) = Q(\text{base}) \times k(\text{stade}) \quad (2.4)$$

Exemple : Besoins NPK d'une culture de pomme de terre : Pour une surface de 20 m² au stade de fructification, à partir des valeurs de référence (30, 150 et 180 kg/ha),

Les besoins de base sont $N(\text{base}) = 60 \text{ g}$, $P(\text{base}) = 300 \text{ g}$, $K(\text{base}) = 360 \text{ g}$.

En appliquant les coefficients du stade de fructification (0,6 ; 0,8 ; 1,3) :

$$N(\text{req}) = 36 \text{ g}, P(\text{req}) = 240 \text{ g}, K(\text{req}) = 468 \text{ g}.$$

2.5.4. Estimation des disponibilités et calcul du déficit

Les valeurs fournies par le capteur NPK n'étant pas directement exprimées en grammes, un facteur de conversion expérimental $k_{\text{conversion}}$ est introduit. Ce coefficient dépend du mode de lecture du capteur et doit être calibré expérimentalement [31] :

$$Q_{\text{disponible}} = C_{\text{capteur}} \times S \times k_{\text{conversion}} \quad (2.5)$$

Le déficit de chaque élément correspond alors à la différence entre le besoin requis et la quantité disponible, bornée à zéro afin d'éviter toute commande négative de fertilisation :

$$\text{Déficit} = \max(0, Q_{\{\text{requis}\}} - Q_{\{\text{disponible}\}}) \quad (2.6)$$

2.5.5. Conversion du déficit en commande de dosage

Une fois le déficit connu, il est converti en durée d'ouverture du servomoteur à partir du débit massique du doseur, déterminé expérimentalement par pesée pendant un temps d'ouverture connu :

$$t_{\{\text{servo}\}} = \frac{\text{Déficit}}{D} \quad (2.7)$$

Où D est le débit massique en grammes par seconde. Pour un débit étalonné à 5 g/s, la délivrance de 240 g de phosphore requiert $t(\text{servo}) = 240/5 = 48$ s [35, 40].

2.5.6. Contrôle de l'irrigation par logique floue

L'irrigation est pilotée par une logique floue. Le module flou prend en entrée l'humidité du sol et la température de l'air, chacune est décrite par des ensembles linguistiques. La sortie est une décision d'irrigation associée à une durée [48].

Comme l'indique le tableau 2.5.

Tableau 2.5 : Décisions d'irrigation et durées associées en sortie du module flou.

Décision d'irrigation	Durée
Pas d'irrigation	0 s
Irrigation courte	20 s
Irrigation moyenne	40 s
Irrigation longue	60 s

La base de règles, présentée dans le tableau 2.6, traduit un comportement intuitif : plus le sol est sec et la température élevée, plus l'irrigation est longue.

Tableau 2.6 : Base de règles du module d'irrigation flou.

Humidité du sol	Température	Décision
Sec	Chaude	Irrigation longue
Sec	Normale	Irrigation moyenne
Sec	Froide	Irrigation moyenne
Moyen	Chaude	Irrigation moyenne
Moyen	Normale	Irrigation courte
Moyen	Froide	Irrigation courte
Humide	Toutes	Pas d'irrigation

2.5.7. Sécurité de la fertilisation

La fertilisation n'est exécutée que si plusieurs conditions de sécurité sont réunies, vérifiées par le Raspberry Pi avant toute commande de dosage. La fertilisation est interrompue au stade de récolte, lorsque les besoins sont nuls, lorsque la conductivité électrique dépasse la limite maximale de la culture, ou lorsque le pH sort de la plage acceptable.

2.6. Conception mécanique du prototype sous SolidWorks

Au-delà du choix des composants électroniques et de l'architecture logicielle, la réalisation du prototype a nécessité une étude mécanique préalable visant à organiser dans l'espace les différents organes du système : les réservoirs de fertilisant, les doseurs, l'entonnoir de collecte, le moteur de mélange et le réservoir de la solution nutritive. Cette étude a été menée à l'aide du logiciel de conception assistée par l'ordinateur SolidWorks [49], qui permet de modéliser chaque pièce en trois dimensions, de vérifier les contraintes d'encombrement et d'assemblage, puis d'exporter les pièces en vue de leur fabrication par l'impression 3D.

La modélisation préalable représente l'avantage de détecter les interférences mécaniques et de valider la cinématique de l'ensemble avant toute fabrication, ce qui réduit sensiblement les retouches sur le prototype physique.

La conception a suivi une démarche itérative : une première version de l'ensemble a été modélisée, puis analysée et corrigée pour aboutir à la version finale retenue pour la fabrication.

L'organisation générale, commune aux deux versions, est verticale et gravitaire : les trois réservoirs de fertilisant occupent la partie haute, l'entonnoir rassemble en partie médiane les doses délivrées par les doseurs, et le réservoir de mélange, équipé de son moteur agitateur, occupe la partie basse.

2.6.1 Plateau support des doseurs

Le plateau support, représenté ci-après, constitue la pièce sur laquelle reposent les trois ensembles de dosage. Il s'agit d'un disque percé de trois ouvertures circulaires de grand diamètre, situées à l'aplomb de chaque doseur. Ces ouvertures permettent au fertilisant délivré, de tomber vers l'entonnoir placé en dessous. Les perçages de plus petit diamètre, répartis sur le disque, assurent la fixation des boîtiers doseurs ainsi que celle du plateau sur la structure. La disposition régulière des trois orifices permet de répartir les doseurs autour de l'axe central et garantit que chaque fertilisant rejoint l'entonnoir sans interférer avec les deux autres. La figure 2.20 présente le plateau support des trois ensembles de dosage.

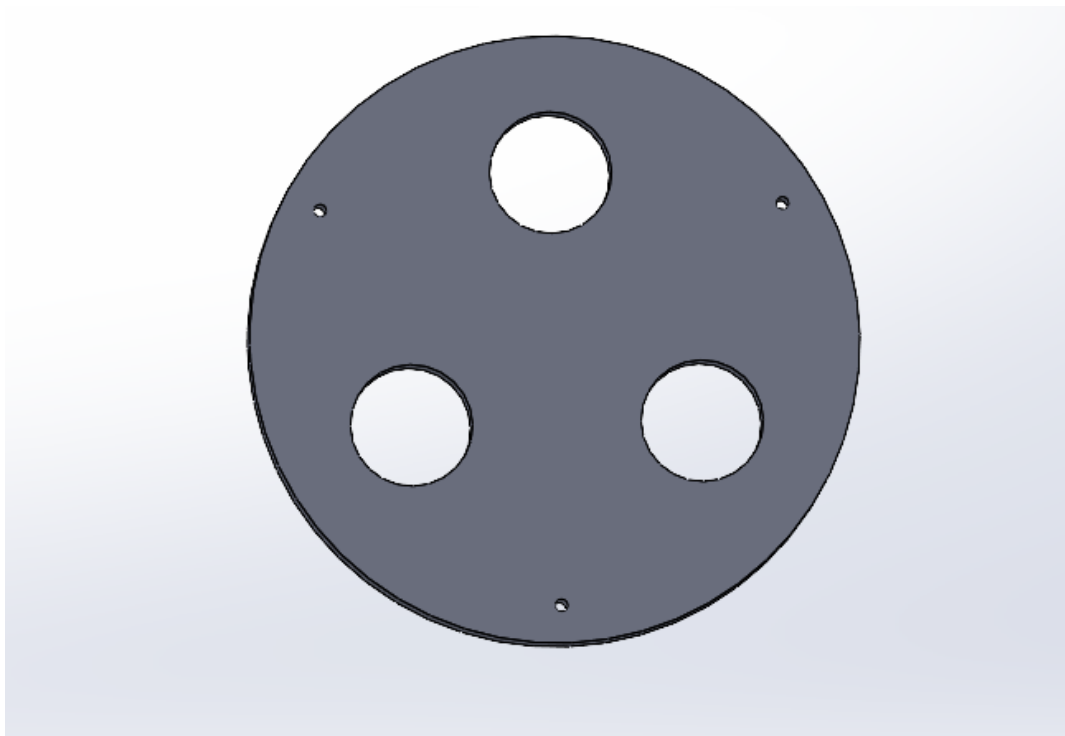


Figure 2.20 : Plateau support des trois ensembles de dosage.

2.6.2 Boîtier doseur

Chaque réservoir de fertilisant est associé à un boîtier doseur, présenté ci-après. Cette pièce regroupe le logement du réservoir, le support du servomoteur et l'orifice de sortie. La platine, de forme carrée, comporte quatre perçages d'angle destinés à la fixation sur le plateau. Elle intègre également un bras latéral servant de support au servomoteur MG996R. La partie cylindrique reçoit la base du réservoir de fertilisant, tandis que l'orifice décentré, visible en partie basse, constitue la sortie par laquelle les granulés s'écoulent vers l'entonnoir. Cette intégration, en une seule pièce, du logement, du support moteur et de la sortie de dosage simplifie le montage et garantit un alignement précis entre l'organe d'obturation et l'orifice de sortie. Trois boîtiers identiques équipent respectivement les réservoirs d'azote, de phosphore et de potassium. Les figures 2.22 et 2.23 présentent les vues principales du boîtier doseur.

La figure 2.21 représente les vues du boîtier doseur en perspective et de face.

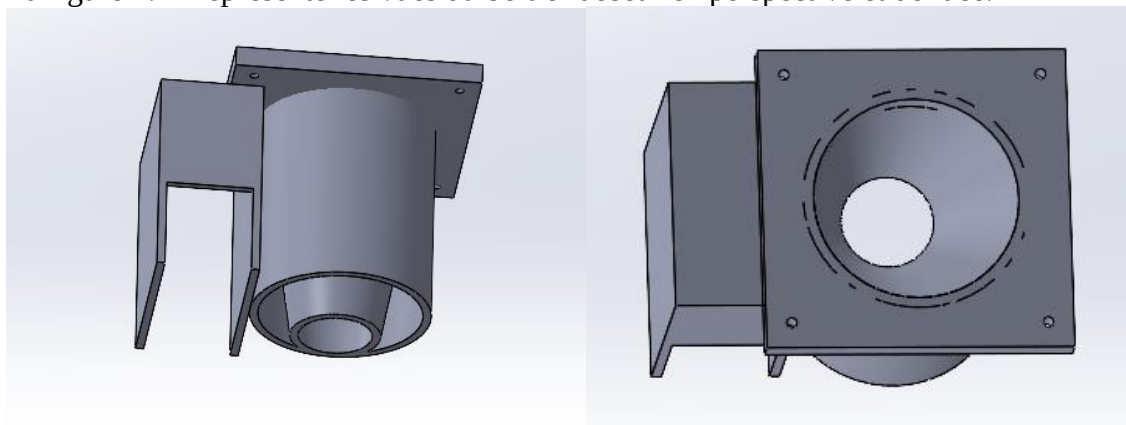


Figure 2.21 : Vues du boîtier doseur en perspective et de face.

2.6.3 Volet rotatif d'ouverture et de fermeture

L'ouverture et la fermeture de chaque doseur sont assurées par un volet rotatif entraîné directement par le servomoteur. Ce volet, de forme oblongue, est monté sur l'axe de sortie du servomoteur et balaie le fond du logement du réservoir. En position fermée, il recouvre l'orifice de sortie et retient les granulés. Lorsque le servomoteur le fait pivoter, il dégage l'orifice et laisse-le fertilisant s'écouler par gravité vers l'entonnoir situé en dessous. La forme allongée du volet et le faible débattement angulaire nécessaire permettent une obturation fiable avec le couple disponible du servomoteur MG996R. La figure 2.22 représente le volet rotatif d'ouverture et de fermeture du doseur.

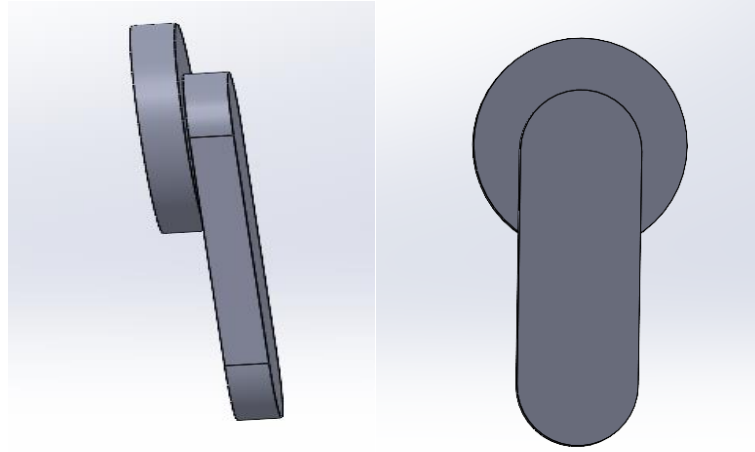


Figure 2.22 : Volet rotatif d'ouverture et de fermeture du doseur, vue de face à gauche et vue de profil à droite.

Ce dispositif constitue la traduction mécanique du principe de dosage décrit à la section 2.5.5. La quantité délivrée est fixée par la durée d'ouverture du volet, calculée à partir du déficit de l'élément nutritif et du débit massique du doseur. Afin d'améliorer la régularité de l'écoulement et d'éviter le blocage des granulés, l'ouverture est réalisée par impulsions successives. Le volet oscille alors entre ses positions fermée et ouverte jusqu'à atteindre la dose visée. Les trois doseurs étant identiques, ce même mécanisme équipe les réservoirs d'azote, de phosphore et de potassium.

2.6.4 Entonnoir de collecte

L'entonnoir, montré ci-après, a pour fonction de rassembler les doses de fertilisant délivrées par les trois doseurs et de les acheminer vers le réservoir de mélange situé en dessous. Sa surface intérieure inclinée canalise les granulés vers la sortie par simple effet de gravité, ce qui évite l'utilisation d'un organe mécanique supplémentaire à ce niveau. La large ouverture supérieure recouvre l'ensemble des trois orifices du plateau, de sorte qu'aucune dose ne soit perdue lors de la collecte. Les figures 2.25 et 2.26 présentent l'entonnoir de collecte des fertilisants

La figure 2.23 représente les vues de l'entonnoir de collecte (dessus et profil).

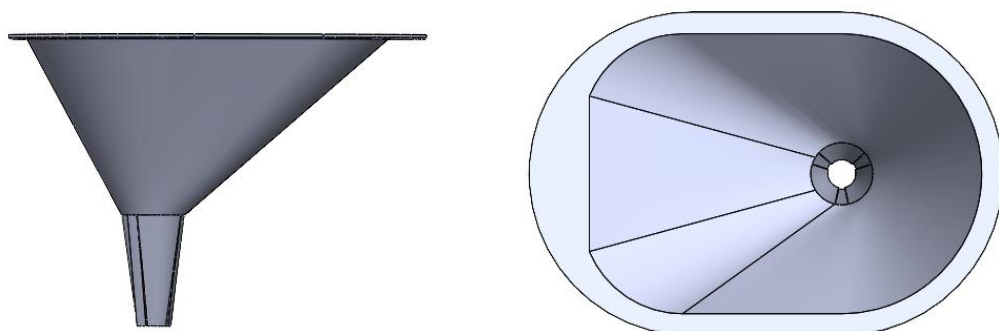


Figure 2.23 : Vues de l'entonnoir de collecte (dessus et profil).

La particularité de cette pièce réside dans le positionnement de sa sortie. Le moteur d'agitation étant fixé au centre du réservoir de mélange, il n'était pas possible de placer l'orifice de sortie sur l'axe central, afin d'éviter toute interférence avec l'arbre du moteur. La sortie a donc été volontairement décentrée. Les pans inclinés de l'entonnoir convergent vers un orifice déporté qui contourne l'emplacement réservé au moteur.

Cette contrainte explique également la forme allongée du contour supérieur de l'entonnoir, adaptée à l'encombrement du moteur central et de la structure environnante.

2.6.5 Bâti et plaque de base

Le bâti, illustré ci-après, forme la structure porteuse de l'ensemble. Conçu comme un caisson à parois rigides, il loge et protège le réservoir cylindrique dans lequel s'effectue le mélange de l'eau et des fertilisants. Les ouvertures latérales ménagées dans les parois facilitent l'accès au réservoir pour son remplissage, son nettoyage et sa maintenance, tout en allégeant la structure. La géométrie du caisson a été pensée pour accueillir le réservoir de manière ajustée et pour recevoir, sur sa face supérieure, l'entonnoir ainsi que les organes de dosage décrits précédemment. La figure 2.24 représente le bâti porteur logeant le réservoir de mélange.

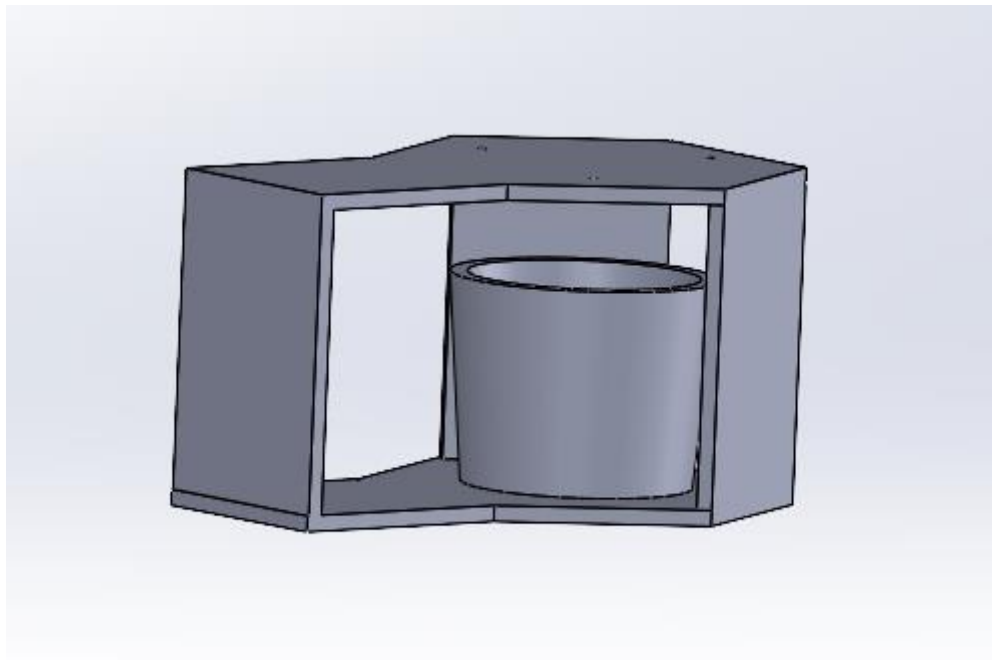


Figure 2.24 : Bâti porteur logeant le réservoir de mélange.

La plaque de base, représentée ci-après, ferme la partie inférieure du bâti et assure la stabilité de l'ensemble sur son support. Sa forme polygonale reprend l'empreinte au sol de la structure. Les trois perçages qu'elle comporte permettent sa fixation. L'ensemble de ces pièces, une fois assemblées, constitue le squelette mécanique sur lequel s'appuient les

organes hydrauliques et électroniques du système décrits dans les sections précédentes. La figure 2.25 présente la plaque de base de la structure et ses perçages de fixation.

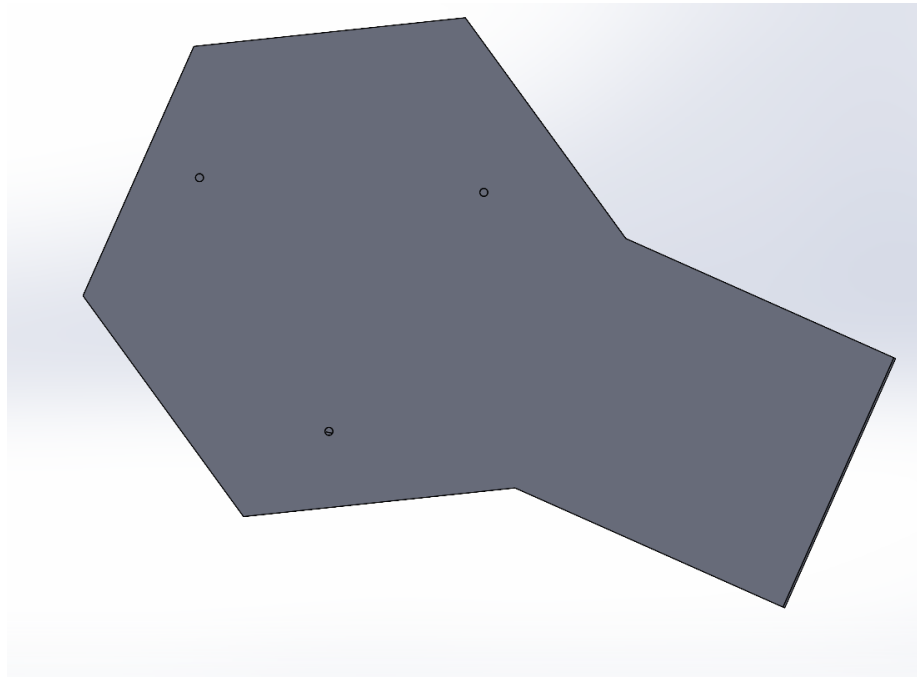


Figure 2.25 : Plaque de base de la structure et ses perçages de fixation.

Une fois les différentes pièces définies, elles ont été assemblées afin de former l'ensemble du prototype. La conception de cet assemblage a suivi une démarche itérative, depuis une première version jusqu'à la version finale retenue pour la fabrication.

2.6.6 Assemblage d'ensemble et évolution du design

La première version de l'assemblage, illustrée ci-après, reposait sur une structure ouverte constituée de montants verticaux supportant un plateau supérieur, un entonnoir ainsi qu'un réservoir de mélange cylindrique. Les trois réservoirs de fertilisant correspondant à l'azote, au phosphore et au potassium étaient représentés par des couleurs distinctes afin de faciliter l'identification des différents compartiments. Cette première configuration a permis de valider le principe général de fonctionnement du système ainsi que l'agencement vertical des différents organes. Toutefois, elle présentait deux limitations majeures. D'une part, la rigidité mécanique de la structure était insuffisante pour garantir une stabilité optimale de l'ensemble. D'autre part, la sortie de l'entonnoir était positionnée au centre du réservoir de mélange, ce qui créait une interférence avec l'emplacement prévu pour le moteur d'agitation. La figure 2.26 représente la première version de l'assemblage du système.

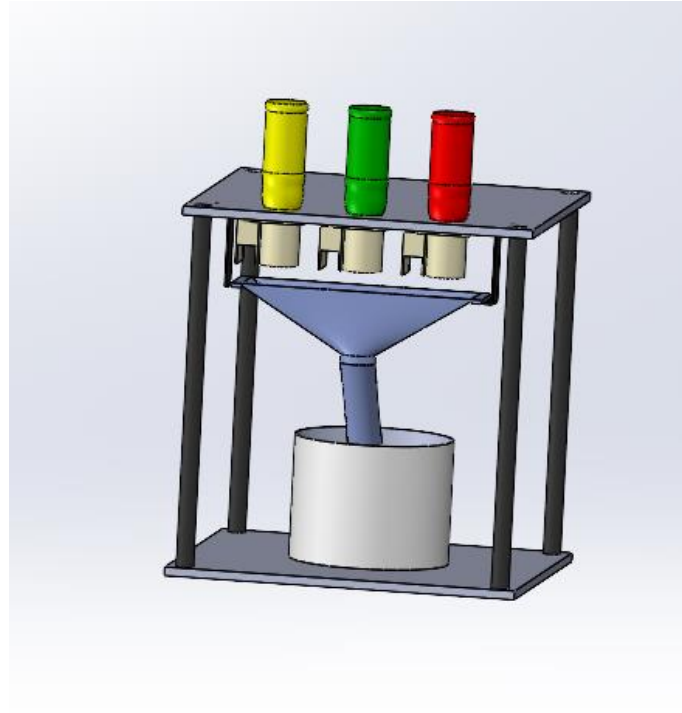


Figure 2.26 : Première version de l'assemblage du système : structure à montants et réservoirs N, P et K.

La version finale, présentée ci-après selon deux vues différentes, conserve le même principe fonctionnel tout en intégrant plusieurs améliorations mécaniques. La structure ouverte a été remplacée par une structure fermée à parois rigides, offrant une meilleure résistance mécanique et un maintien plus efficace des différents composants. Afin de permettre l'intégration du moteur d'agitation sur l'axe central du réservoir de mélange, l'entonnoir a été redessiné. Sa sortie a été décentrée de manière à contourner l'espace occupé par le moteur et à éviter toute interférence mécanique. Cette nouvelle conception améliore la robustesse de l'ensemble, facilite l'intégration des composants et garantit un fonctionnement plus fiable du système. Pour ces raisons, cette version a été retenue pour la fabrication du prototype final. La figure 2.27 illustre l'assemblage final du système.



Figure 2.27 : Version finale de l'assemblage du système.

2.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception détaillée du système intelligent d'irrigation et de fertilisation. L'architecture retenue repose sur une répartition claire des rôles entre une unité de décision, le Raspberry Pi 3 B+, qui héberge le serveur, l'interface, la base de données et les algorithmes, et une unité d'exécution, l'ESP32, qui assure la lecture des capteurs et la commande des actionneurs.

Nous avons décrit les composants matériels du dispositif, de capteur d'humidité, de température, de NPK, de pH, de conductivité et de niveau jusqu'aux organes de dosage et de commande, ainsi que l'environnement logiciel qui les anime. Nous avons ensuite formalisé le modèle de données et la logique de décision : calcul des besoins et des déficits NPK, conversion en commande de dosage, contrôle de l'irrigation par logique floue et règles de sécurité fondées sur le pH, la conductivité et le niveau d'eau. Enfin, l'étude mécanique menée sous SolidWorks a permis de matérialiser cette architecture sous la forme d'un ensemble de pièces dont la conception itérative a conduit à une structure rigide et fonctionnelle. Cette conception, à la fois modulaire et évolutive, constitue le socle de la réalisation pratique du prototype, qui fait l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE 3

RÉALISATION DU DISPOSITIF

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation pratique du prototype. Il ne reprend pas les pièces de conception déjà détaillées au chapitre 2, il se limite aux étapes de fabrication, d'assemblage, d'intégration électronique, de développement logiciel et de validation fonctionnelle du système.

Le prototype a été réalisé en combinant des procédés de prototypage rapide et une architecture logicielle locale. Les pièces fonctionnelles ont été fabriquées par impression 3D, les éléments structurels plans ont été découpés au laser, puis l'ensemble a été assemblé autour d'un étage de dosage gravitaire, d'un réservoir de mélange et d'une interface de supervision accessible par navigateur.

L'objectif de cette réalisation est de vérifier que la solution proposée peut acquérir les données nécessaires, calculer les besoins d'irrigation et de fertigation, commander les actionneurs et présenter l'état du système à l'utilisateur de manière claire.

3.2. Moyens de fabrication utilisés

3.2.1. Impression 3D des pièces fonctionnelles

L'impression 3D par dépôt de fil fondu, a été utilisée pour fabriquer les éléments fonctionnels du prototype. Ce procédé consiste à déposer successivement des couches de filament thermoplastique fondu jusqu'à obtenir la géométrie finale de la pièce. Dans ce travail, le PLA a été retenu pour sa disponibilité, sa facilité d'impression et son coût réduit, ce qui le rend adapté à une réalisation de prototype.

Plusieurs machines ont été employées selon la disponibilité de l'atelier, la taille des pièces à fabriquer et la précision recherchée. Les imprimantes utilisées sont une Zortrax, une FlashForge, une Creality Ender-3 et une Creality CR-10. Les manuels techniques de ces fabricants constituent les références utilisées pour identifier correctement les machines et leurs conditions générales d'utilisation [48–51].

La figure 3.1 représente l'imprimante 3D Zortrax utilisée pour la fabrication de pièces fonctionnelles du prototype.

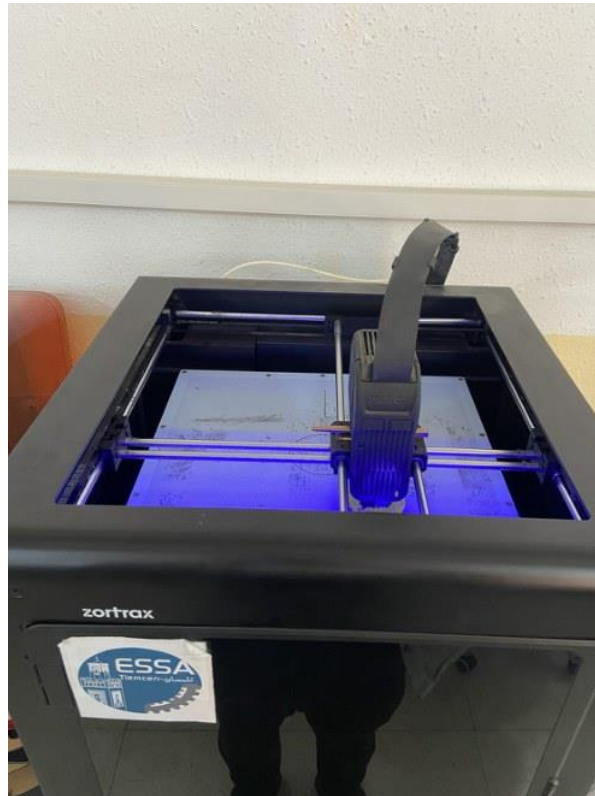


Figure 3.1 : Imprimante 3D Zortrax utilisée pour la fabrication de pièces fonctionnelles du prototype.

La figure 3.2 représente l'imprimante 3D FlashForge utilisée pour l'impression de composants mécaniques

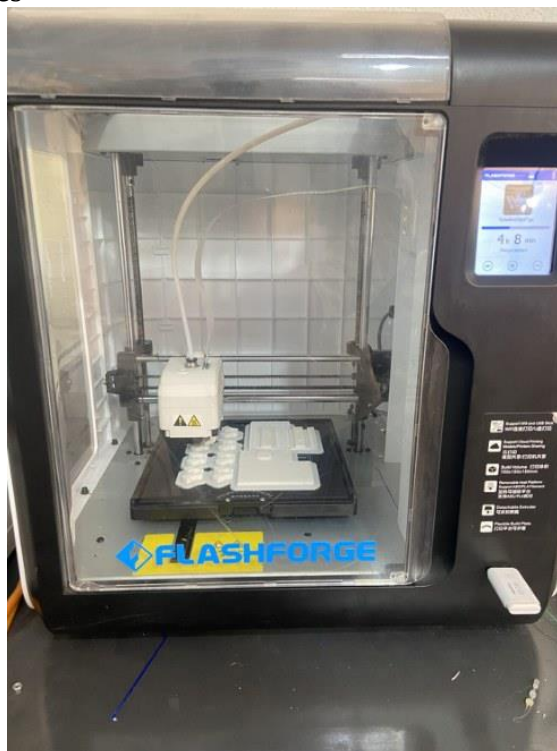


Figure 3.2 : Imprimante 3D FlashForge utilisée pour l'impression de composants mécaniques.

La figure 3.3 représente l'imprimante 3D Creality Ender-3 en cours de fabrication d'une pièce du prototype.

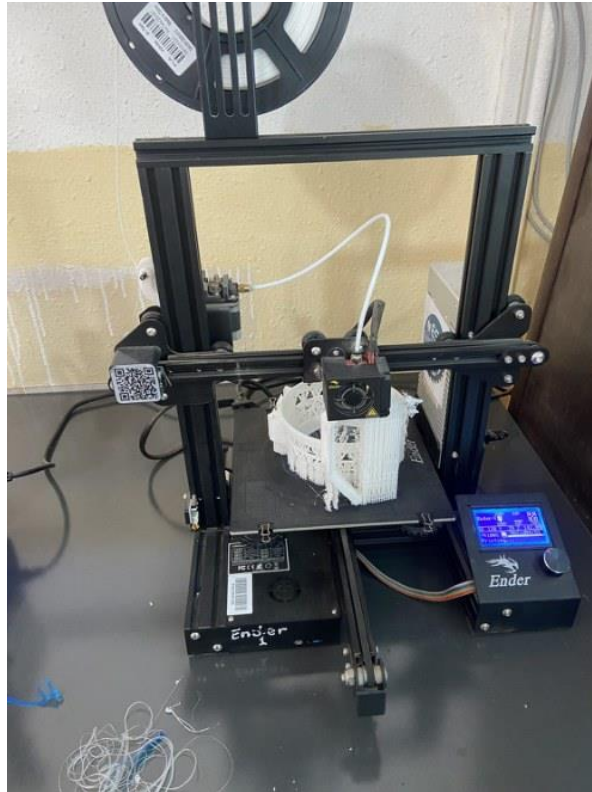


Figure 3.3 : Imprimante 3D Creality Ender-3 en cours de fabrication d'une pièce du prototype.

La figure 3.4 représente l'imprimante 3D Creality CR-10 utilisée pour les pièces de plus grand volume.

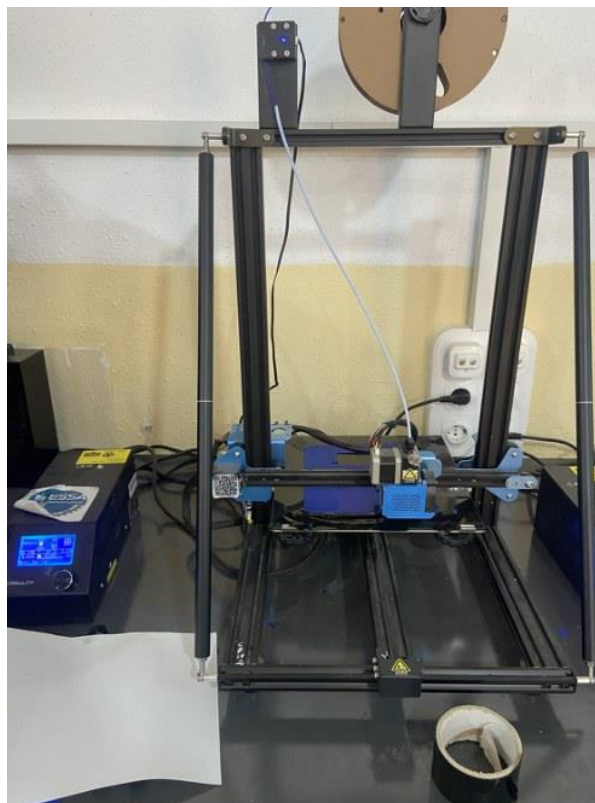


Figure 3.4 : Imprimante 3D Creality CR-10 utilisée pour les pièces de plus grand volume.

La figure 3.5 représente les pièces du prototype imprimées en PLA sur le plateau de la FlashForge.

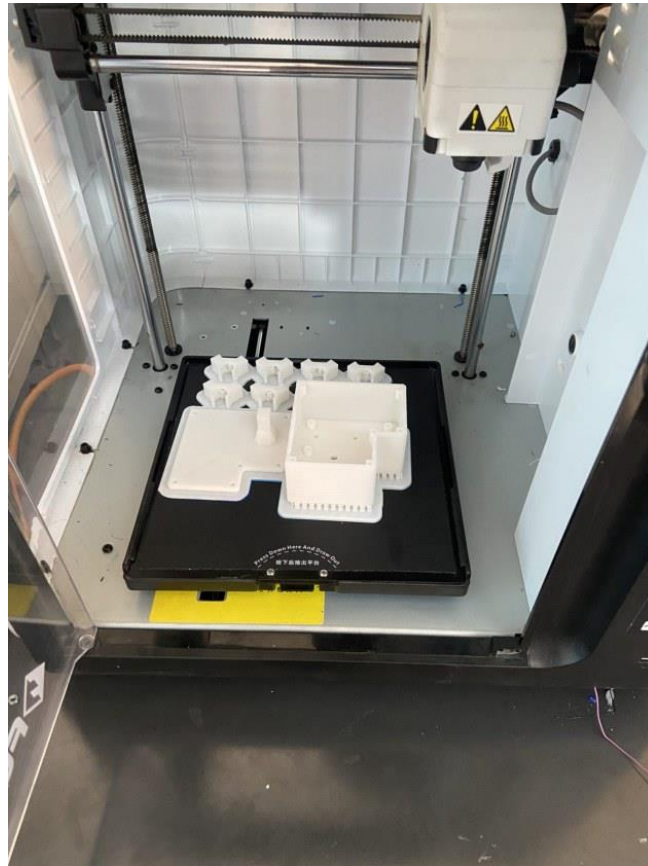


Figure 3.5 : Pièces du prototype imprimées en PLA sur le plateau de la FlashForge.

Après impression, les pièces ont été retirées du plateau, nettoyées puis ébavurées. Les supports d'impression ont été enlevés lorsque cela était nécessaire. Cette étape est importante, car les pièces destinées au dosage doivent conserver une mobilité suffisante pour éviter le blocage des volets et assurer un écoulement régulier des fertilisants.

3.2.2. Découpe laser des éléments structurels

La découpe laser CO₂ a été utilisée pour réaliser les éléments plans du prototype, notamment les plaques, les plateaux, le caisson et les supports de fixation. Ce procédé permet d'obtenir des contours réguliers, des ouvertures précises et une bonne répétabilité dimensionnelle. Les contours vectoriels préparés lors de la conception ont été exploités pour guider la machine de découpe.

La machine laser a été utilisée principalement pour les panneaux structurels, tandis que l'impression 3D a été réservée aux pièces volumétriques et fonctionnelles. Cette complémentarité a permis de réduire le temps de fabrication tout en améliorant la rigidité de l'assemblage.

La figure 3.6 représente la machine de découpe laser CO₂ utilisée pour la découpe des éléments structurels plans.



Figure 3.6 : Machine de découpe laser CO₂ utilisée pour la découpe des éléments structuraux plans.

La figure 3.7 représente une vue générale de la machine de découpe laser CO₂ utilisée dans l'atelier.



Figure 3.7 : Vue générale de la machine de découpe laser CO₂ utilisée dans l'atelier.

3.3. Assemblage mécanique du prototype

L'assemblage mécanique a été réalisé après la fabrication des pièces imprimées et découpées. Contrairement au chapitre de conception, cette section ne décrit pas la géométrie détaillée de chaque pièce ; elle présente uniquement la mise en place réelle des sous-ensembles et leur rôle dans le prototype final.

3.3.1. Étage de dosage des fertilisants

L'étage supérieur reçoit les réservoirs de fertilisants. Chaque réservoir correspond à un élément nutritif principal : azote, phosphore ou potassium. Le dosage repose sur l'ouverture commandée d'un volet par un servomoteur. L'engrais tombe ensuite par gravité vers l'entonnoir central.

La figure 3.8 représente les pièces du bloc de dosage fraîchement imprimées, encore fixées au plateau de la Creality Ender-3, avant le nettoyage et l'ébavurage

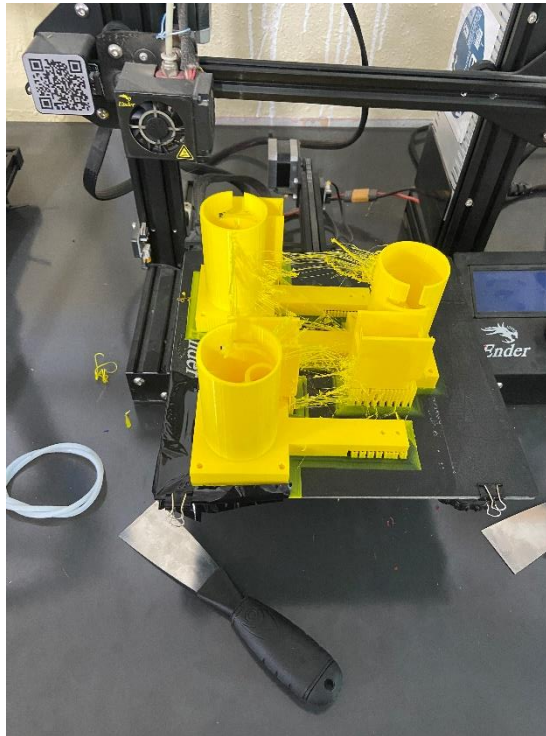


Figure 3.8 : Pièces du bloc de dosage des fertilisants imprimées en PLA jaune sur la Creality Ender-3, encore sur le plateau d'impression avant nettoyage.

La figure 3.9 représente une pièce du bloc de dosage fixée au plateau d'impression.



Figure 3.9 : Pièce du bloc de dosage fixée au plateau d'impression avant nettoyage et ébavurage.

Cette organisation permet de séparer physiquement les trois fertilisants et de commander indépendamment la quantité distribuée pour chaque élément. La quantité délivrée dépend du temps d'ouverture du doseur et du débit massique obtenu lors des essais de calibration.

3.3.2. Entonnoir et réservoir de mélange

L'entonnoir imprimé en 3D assure la collecte des fertilisants provenant de l'étage de dosage. Sa fonction principale est de guider les particules vers le réservoir de mélange en limitant les pertes et les dépôts sur les parois du prototype.

La figure 3.10 représente l'entonnoir de collecte fabriqué par impression 3D et destiné à guider les fertilisants vers le réservoir de mélange.

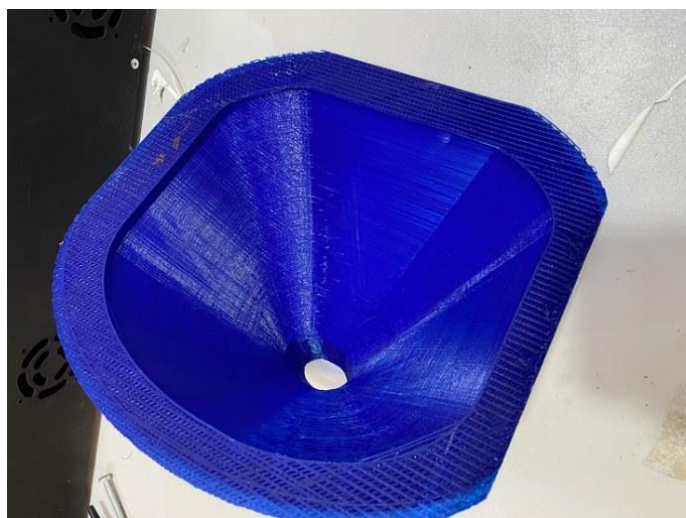


Figure 3.10 : Entonnoir de collecte fabriqué par impression 3D et destiné à guider les fertilisants vers le réservoir de mélange.

3.3.3. Pièce d'amortissement de la tige de mélange

Lors des premiers essais de fonctionnement, la tige métallique entraînant l'hélice de mélange a présenté des vibrations significatives dues au déséquilibre rotatif et à la longueur de la tige. Ces vibrations génèrent des bruits parasites et fragilisent les fixations.

Afin d'y remédier, une pièce d'amortissement a été conçue et imprimée en PLA bleu. Cette pièce de forme cubique, percée en son centre d'un alésage ajusté au diamètre de la tige, est montée sur le plateau du réservoir. Elle assure un guidage latéral rigide de la tige tout en absorbant partiellement les efforts transversaux, supprimant ainsi les oscillations indésirables.

La figure 3.11 illustre la pièce citée ci-après avant l'installation. L'alésage central est dimensionné avec un léger jeu pour permettre la rotation libre de la tige tout en assurant son maintien radial.

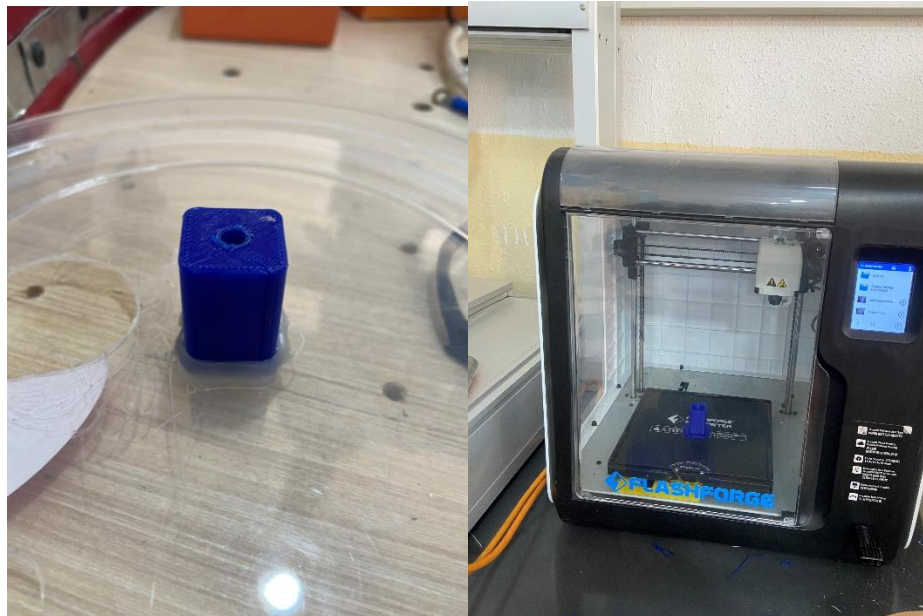


Figure 3.11 : Pièce d'amortissement et de guidage de la tige de mélange, imprimée en PLA bleu, positionnée sur le fond du réservoir pour supprimer les vibrations.

3.3.4. Hélice de mélange

L'hélice de mélange a été fabriquée par impression 3D en filament PLA jaune. Elle est montée à l'extrémité inférieure de la tige et entraînée par un moteur à courant continu placé au-dessus du réservoir. Sa géométrie à trois pales inclinées favorise la création de turbulences dans la solution fertilisante, assurant une homogénéisation rapide du mélange eau-engrais avant l'envoi vers le circuit d'irrigation.

L'hélice est fixée à la tige par un écrou et une contre-pièce imprimée qui garantissent la transmission du couple sans glissement.

La figure 3.12 représente l'hélice de mélange assemblée sur sa tige avant installation dans le réservoir. Le profil courbé des pales est visible, assurant un effet pompe lors de la rotation.



Figure 3.12 : Hélice de mélange à trois pales imprimées en PLA jaune, montée sur la tige d'entraînement avec son écrou de fixation.

3.3.5. Sous-système d'irrigation pour pépinière

En complément du système principal de fertigation, un sous-système dédié à l'irrigation en pépinière a été conçu et réalisé. Ce dispositif répond à une contrainte spécifique irriguer uniformément un plateau de semis ou de jeunes plants disposés en couronne, sans perturber mécaniquement le substrat ni les racines fragiles des jeunes pousses.

La structure porteuse a été fabriquée par impression 3D en PLA blanc. Elle se compose d'un socle ajouré à géométrie triangulaire assurant la stabilité et l'aération de la base, surmonté d'un bol de distribution à facettes polygonales. Cette forme allégée réduit la quantité de matière tout en maintenant une rigidité suffisante. Un col de serrage en deux

parties, maintenu par du ruban adhésif renforcé noir, assure l'étanchéité de la jonction entre le bol supérieur et le socle inférieur.

Le réseau d'irrigation est constitué de tuyaux souples transparents acheminant l'eau depuis la pompe vers une rampe de distribution intégrée au bord supérieur du bol. Des fils de connexion électrique correspondant aux capteurs d'humidité et de température sont également visibles. L'ensemble fonctionne en mode automatique, la pompe étant commandée par l'ESP32 en fonction du taux d'humidité mesuré.

La figure 3.13 illustre ce sous-système dans l'atelier, avant son intégration au banc d'essai. On distingue clairement la géométrie allégée du socle en treillis triangulaire, caractéristique de l'impression 3D optimisée.



Figure 3.13 : Sous-système d'irrigation pour pépinière réalisé par impression 3D.

3.3.6. Prototype assemblé

L'assemblage final suit une organisation verticale. Les réservoirs de fertilisants sont placés en haut, le bloc de dosage et l'entonnoir au niveau intermédiaire, et le réservoir de mélange dans le caisson inférieur. Cette organisation exploite la gravité pour le transfert des fertilisants et réduit la complexité mécanique du système.

La figure 3.14 représente le prototype assemblé.



Figure 3.14 : Prototype final assemblé, montrant l'intégration mécanique des réservoirs, du bloc de dosage, de l'entonnoir et du réservoir de mélange.

3.4. Intégration électronique

L'intégration électronique repose sur deux unités principales. Le Raspberry Pi 3 B+ assure le rôle d'unité de supervision et de décision, tandis que l'ESP32 assure la lecture des capteurs et la commande directe des actionneurs. Cette séparation permet de conserver une architecture simple : les traitements lourds et l'interface web restent sur le Raspberry Pi, tandis que l'ESP32 exécute les actions physiques.

Les actionneurs commandés sont la pompe, l'électrovanne d'entrée, le moteur de mélange et les trois servomoteurs de dosage. Les relais assurent la commutation des charges de puissance, tandis que le module PCA9685 génère les signaux PWM nécessaires au pilotage des servomoteurs. Le Tableau 3.1 récapitule les éléments intégrés et leur rôle dans le prototype.

Tableau 3.1 : Éléments électroniques intégrés au prototype et leur rôle.

Élément intégré	Rôle dans le prototype	Observation de réalisation
Raspberry Pi 3 B+	Serveur local, interface web, base de données, logique de décision	Fonctionne comme unité de supervision
ESP32	Acquisition et commande terrain	Communique avec le serveur par Wi-Fi
Module relais	Commutation pompe, électrovanne et mélangeur	Sépare commande et puissance
PCA9685	Génération PWM pour les servomoteurs	Permet le pilotage de plusieurs doseurs
Capteurs	Mesure humidité, température et niveau	Les valeurs NPK, pH, EC peuvent être simulées pour les essais

3.5. Réalisation logicielle

3.5.1. Architecture logicielle retenue

La réalisation logicielle est organisée autour d'un serveur Flask exécuté sur le Raspberry Pi et d'un firmware chargé dans l'ESP32. Le serveur Flask gère les pages web, les utilisateurs, les paramètres de culture, les données de capteurs, le calcul des consignes et la file de commandes. L'ESP32 consulte périodiquement le serveur afin de récupérer les consignes à exécuter.

Le choix d'une communication HTTP/JSON facilite le débogage et permet d'observer facilement les données échangées. Cette solution convient à un prototype local, car elle évite la dépendance obligatoire à une plateforme cloud et permet à l'utilisateur d'accéder au système depuis un ordinateur ou un smartphone connecté au même réseau. Le tableau 3.2 présente les composants logiciels retenus, leur rôle et la technologie utilisée.

Tableau 3.2 : Composants logiciels du système et technologies utilisées.

Composant logiciel	Rôle	Technologie utilisée
Serveur web	Pages utilisateur, calcul et supervision	Flask / Python
Base de données	Stockage des utilisateurs, mesures et paramètres	SQLite
Firmware	Lecture capteurs et commande actionneurs	Arduino C++ sur ESP32
Communication	Échange des mesures et des consignes	HTTP / JSON
Interface web	Connexion, configuration, tableau de bord et contrôle manuel	HTML, CSS, Jinja2

3.5.2. Base de données locale

Une base de données SQLite est utilisée pour stocker les informations nécessaires au fonctionnement du prototype. SQLite est adapté à ce type d'application embarquée locale, car il ne nécessite pas de serveur séparé et fonctionne directement avec un fichier de base de données [45].

Le tableau 3.3 décrit les tables de la base de données et leur contenu principal.

Tableau 3.3 : Structure de la base de données SQLite du prototype.

Table	Contenu principal
users	Comptes utilisateurs et informations d'authentification
user_setup	Culture sélectionnée, surface, stade de croissance et mode de fonctionnement
fake_sensor_data	Valeurs simulées de N, P, K, pH et EC utilisées pour les essais
fertilizer_stock	Stocks restants des fertilisants N, P et K
device_state	État courant des capteurs et des actionneurs
command_queue	File des commandes automatiques ou manuelles envoyées à l'ESP32
measurements	Historique des mesures et des cycles exécutés

3.6. Interfaces utilisateur réalisées

L'application web développée permet à l'utilisateur de configurer la parcelle, de suivre l'état du système et de lancer des commandes manuelles ou automatiques. Les interfaces ont été testées dans un navigateur web à partir de l'adresse locale du Raspberry Pi.

3.6.1. Connexion utilisateur

La première interface est la page de connexion. Elle limite l'accès au tableau de bord et aux commandes du système aux utilisateurs enregistrés.

La figure 3.15 présente l'interface de connexion de l'application web développée sous Flask.

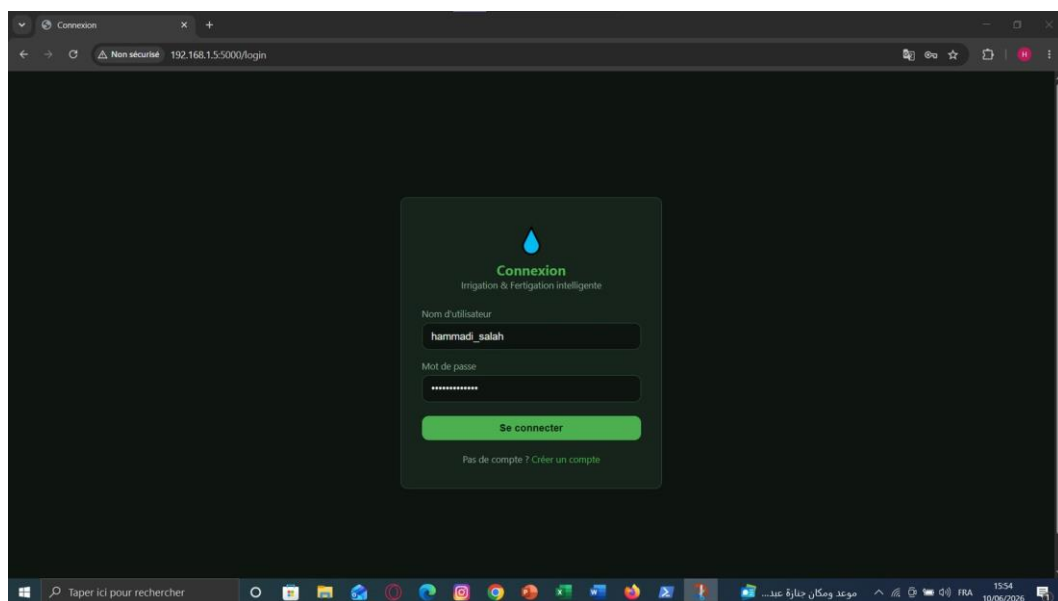


Figure 3.15 : Interface de connexion de l'application web développée sous Flask.

3.6.2. Configuration de la parcelle

La page de configuration permet de choisir la culture, la surface cultivée, le stade de croissance et le mode de fonctionnement. Elle affiche également les références agronomiques associées au choix effectué, notamment les besoins NPK, la plage de pH, la conductivité maximale et la cible d'humidité du sol.

La figure 3.16 présente l'interface de configuration de la parcelle pour la culture de pomme de terre.

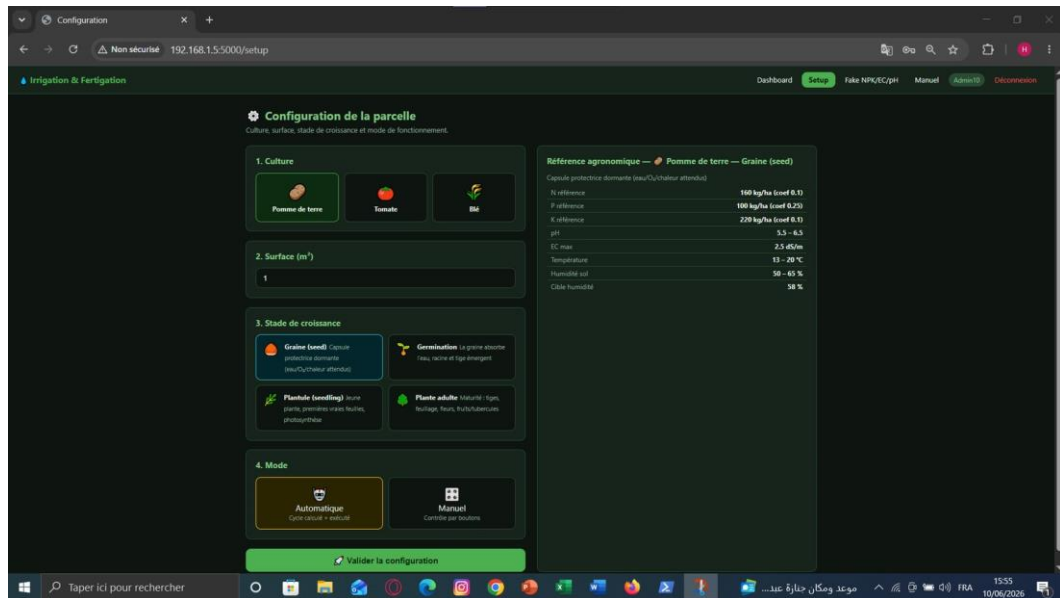


Figure 3.16 : Interface de configuration de la parcelle pour la culture de pomme de terre

La figure 3.17 présente l'interface de configuration de la parcelle pour la culture du blé.

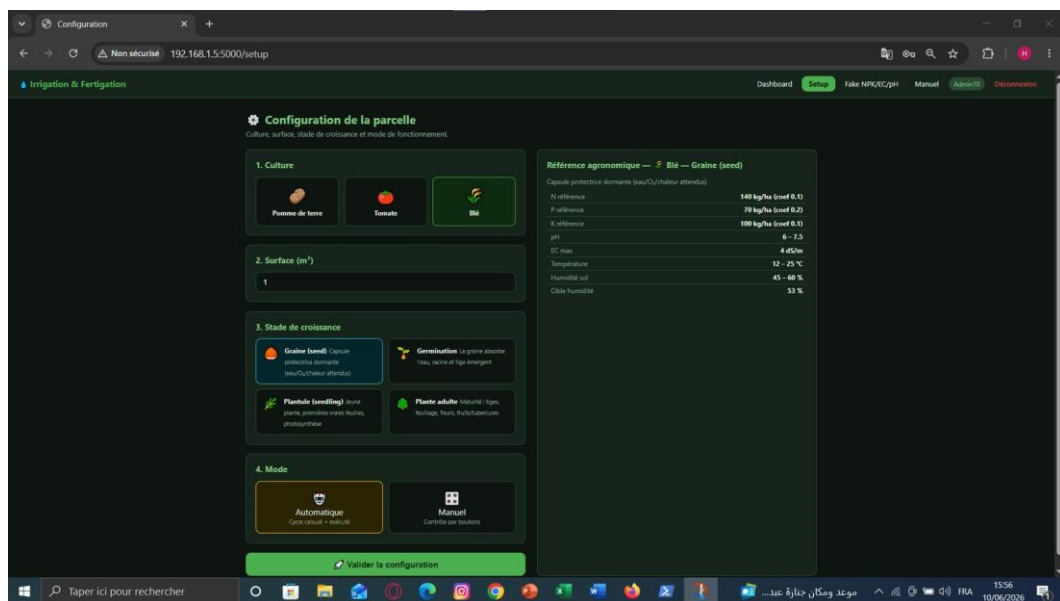


Figure 3.17 : Interface de configuration de la parcelle pour la culture du blé.

3.6.3. Tableau de bord

Le tableau de bord regroupe les valeurs de capteurs, les données NPK/pH/EC, les besoins calculés, les temps de dosage des servomoteurs, l'état des actionneurs et les stocks restants. Cette page constitue l'interface principale de supervision du prototype.

La figure 3.18 présente tableau de bord de supervision du système d'irrigation et de fertigation.

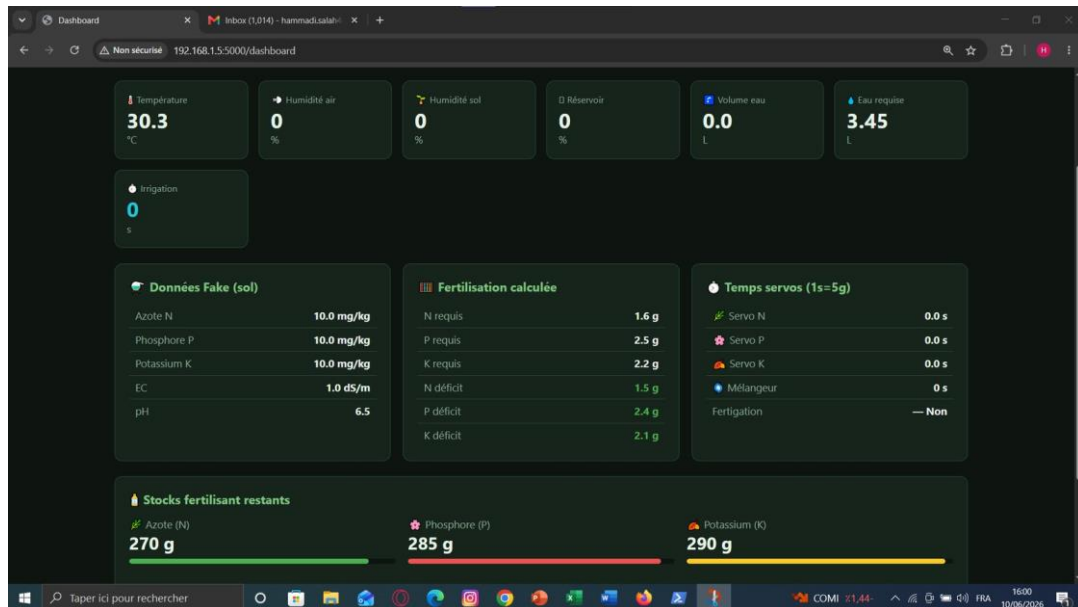


Figure 3.18 : Tableau de bord de supervision du système d'irrigation et de fertiligation.

3.6.4. Commande manuelle

La page de commande manuelle permet de tester séparément les actionneurs : pompe, électrovanne, mélangeur et doseurs NPK. Elle conserve les sécurités logicielles afin d'éviter certaines commandes dangereuses, par exemple lorsque le niveau du réservoir ou le stock de fertilisant est insuffisant.

La figure 3.19 présente l'interface de commande manuelle des actionneurs.

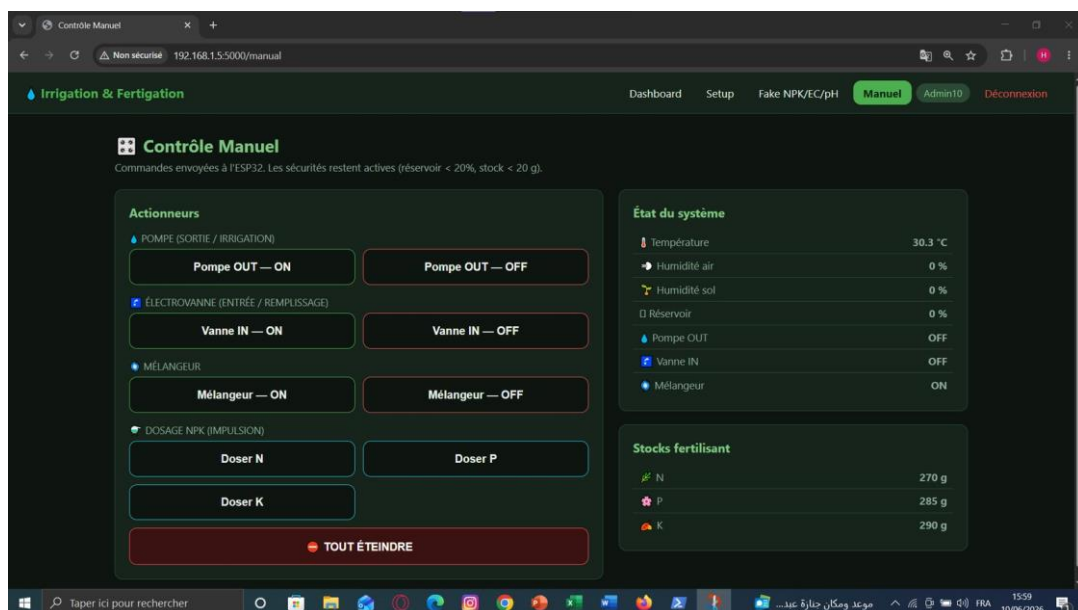


Figure 3.19 : Interface de commande manuelle des actionneurs.

3.7. Validation fonctionnelle

La validation du prototype a consisté à vérifier séparément chaque fonction puis à tester l'enchaînement global du système. Les essais ont porté sur la fabrication mécanique, l'ouverture des doseurs, la communication entre le Raspberry Pi et l'ESP32, la mise à jour de l'interface web et la commande des actionneurs.

Le tableau 3.4 résume les fonctions testées, les méthodes de validation employées et les résultats attendus.

Tableau 3.4 : Fonctions testées lors de la validation du prototype.

Fonction testée	Méthode de validation	Résultat attendu
Impression 3D	Observation des pièces imprimées et ajustement mécanique	Pièces exploitables après nettoyage et ébavurage
Découpe laser	Montage des panneaux découpés	Structure rigide et compatible avec l'assemblage
Dosage NPK	Commande séparée des servomoteurs	Ouverture et fermeture du doseur correspondant
Mélange	Activation du moteur à courant continu	Rotation de l'hélice dans le réservoir
Communication	Échange HTTP/JSON entre ESP32 et serveur Flask	Réception des mesures et envoi des consignes
Interface web	Test des pages login, setup, dashboard et manuel	Affichage correct des informations et commandes accessibles

Les essais ont montré que la structure mécanique permet l'intégration des différents sous-ensembles et que l'application web permet de suivre l'état du système. La commande manuelle facilite le test des actionneurs un par un, tandis que le mode automatique constitue la base de l'exécution complète d'un cycle d'irrigation et de fertigation.

3.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté la réalisation pratique du prototype sans répéter les détails de conception déjà développés au chapitre précédent. La fabrication a combiné l'impression 3D pour les pièces fonctionnelles et la découpe laser pour les éléments structurels. L'assemblage obtenu matérialise l'organisation verticale du système, avec un étage de dosage, un entonnoir de collecte et un réservoir de mélange.

La partie logicielle, basée sur Flask, SQLite et l'ESP32, assure la configuration, la supervision, la commande manuelle et la préparation des cycles automatiques. Les interfaces réalisées montrent que le système peut être utilisé localement à partir d'un navigateur. La validation fonctionnelle confirme ainsi la faisabilité technique du prototype et prépare les essais expérimentaux détaillés.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce mémoire a permis de concevoir et de réaliser un prototype de système intelligent d'irrigation et de fertigation destiné à améliorer la gestion de l'eau et des engrais dans un contexte d'agriculture de précision.

Le système réalisé repose sur une architecture distribuée combinant un Raspberry Pi 3 B+ pour la supervision, la prise de décision et l'interface web, avec un ESP32 dédié à l'acquisition des données et à la commande des actionneurs. Cette répartition des tâches permet d'assurer une meilleure organisation du fonctionnement global du prototype.

L'intégration des capteurs d'humidité du sol, de température, de niveau d'eau ainsi que des paramètres chimiques NPK, pH et EC permet d'obtenir les informations nécessaires à l'estimation des besoins hydriques et nutritifs des cultures. Le prototype intègre également un système de dosage automatique des fertilisants, un réservoir de mélange, une pompe, des électrovannes et une interface web accessible depuis un ordinateur ou un smartphone.

Les résultats obtenus montrent la faisabilité technique de la solution proposée. Le système permet de suivre les grandeurs mesurées, d'automatiser certaines opérations agricoles et de réduire les interventions manuelles. Il constitue ainsi une base pratique pour le développement de solutions agricoles plus économes, plus précises et plus adaptées aux contraintes locales.

Comme perspectives, il serait intéressant d'intégrer des capteurs industriels NPK, pH et EC avec communication directe, d'améliorer les modèles de décision par des méthodes d'intelligence artificielle avancées, d'ajouter une surveillance à distance via Internet et de tester le système sur une parcelle agricole réelle afin d'évaluer ses performances à grande échelle.

Références bibliographiques

- [1] M. Brouwer, K. Prins, M. Kay et M. Heibloem, *Irrigation Water Management: Irrigation Methods*, FAO Training Manual No. 5, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1988.
- [2] FAO, *Small-scale Irrigation for Arid Zones: Principles and Options*, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1997.
- [3] A. C. C. Savva et K. Frenken, *Irrigation Manual: Planning, Development, Monitoring and Evaluation of Irrigated Agriculture with Farmer Participation*, Rome: FAO, 2002.
- [4] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes et M. Smith, *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome: FAO, 1998.
- [5] R. G. Allen, L. S. Pereira, D. Raes et M. Smith, *FAO-56 Crop Evapotranspiration Method*, Rome: FAO, 1998.
- [6] FAO et International Fertilizer Industry Association, *Fertigation: A Tool for Efficient Fertilizer and Water Management*, Rome: FAO/IFA, 2000.
- [7] J. Keller et R. D. Bliesner, *Sprinkle and Trickle Irrigation*, New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.
- [8] A. Phocaides, *Handbook on Pressurized Irrigation Techniques*, 2e éd., Rome: FAO, 2007.
- [9] FAO, *Water for Sustainable Food and Agriculture*, Rome: FAO, 2017.
- [10] L. Incrocci, R. B. Thompson, M. D. Fernandez-Fernandez et al., *Irrigation management of European greenhouse vegetable crops*, Agricultural Water Management, 2019.
- [11] F. R. Lamm et T. P. Trooien, *Subsurface drip irrigation for corn production: a review*, Applied Engineering in Agriculture, 2003.
- [12] H. Marschner, *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*, 3e éd., Academic Press, 2012.
- [13] International Plant Nutrition Institute, *4R Plant Nutrition Manual*, 2012.
- [14] FAO, *Fertilizer and Plant Nutrition Guide*, Bulletin No. 9, 1984.
- [15] J. L. Havlin, S. L. Tisdale, W. L. Nelson et J. D. Beaton, *Soil Fertility and Fertilizers*, 8e éd., Pearson, 2014.
- [16] E. Epstein et A. J. Bloom, *Mineral Nutrition of Plants*, Sinauer Associates, 2005.

- [17] USDA-NRCS, *Soil pH and Plant Nutrient Availability*, 1998. URL: <https://www.nrcs.usda.gov/>. Consulté le 23/02/2026.
- [18] FAO, *Soil Salinity Management and Crop Production*, Rome: FAO, 2018.
- [19] H. Navarro-Hellín et al., *A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management*, Agricultural Water Management, 2015.
- [20] R. Chaganti et al., *Image processing and IoT-based soil nutrient monitoring for smart agriculture*, 2018.
- [21] K. A. Patil et N. R. Kale, *A model for smart agriculture using IoT*, 2016.
- [22] N. Gondchawar et R. S. Kawitkar, *IoT based smart agriculture*, 2016.
- [23] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic et M. Palaniswami, *Internet of Things (IoT): A vision*, Future Generation Computer Systems, 2013.
- [24] L. A. Zadeh, *Fuzzy sets*, Information and Control, 1965.
- [25] E. H. Mamdani, *Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plants*, 1974.
- [26] Raspberry Pi Ltd., Raspberry Pi 3 Model B+ Product Brief, 2025. URL : <https://pip.raspberrypi.com/documents/RP-008338-DS-raspberry-pi-3-b-plus-product-brief.pdf>. Consulté le 18/06/2026.<https://www.raspberrypi.com/documentation/>
- [27] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet, version 5.2, 2025. URL : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Consulté le 18/06/2026.<https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents>
- [28] Waveshare, 7inch HDMI LCD (C), écran tactile capacitif 1024×600, 2026. URL: [https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_\(C\)](https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_(C)). Consulté le 18/06/2026.[https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_\(C\)](https://www.waveshare.com/wiki/7inch_HDMI_LCD_(C))
- [29] DFRobot, Gravity: Analog Capacitive Soil Moisture Sensor, SEN0193, 2025. URL : <https://www.dfrobot.com/product-1385.html>. Consulté le 18/06/2026.<https://www.dfrobot.com/product-1385.html>
- [30] Aosong Electronics Co., Ltd., AM2302/DHT22 Digital Temperature and Humidity Sensor Datasheet, 2018. URL : <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/Digital+humidity+and+temperature+sensor+AM2302.pdf>. Consulté le 18/06/2026.https://components101.com/sites/default/files/component_datasheet/DHT22%20Sensor%20Datasheet.pdf

- [31] JXCT Electronics, *NPK Soil Sensor RS485 Modbus Technical Manual*, 2024. URL: <https://manuals.plus/jxct/rs485-modbusjxbs-3001-npk-rs-soil-npk-sensor-manual>. Consulté le 18/03/2026.
- [32] Atlas Scientific, *EZO-pH Circuit Documentation*, 2025. URL : <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-ph-circuit/>. Consulté le 16/03/2026.
- [33] Atlas Scientific, *EZO-EC Conductivity Circuit Documentation*, 2025. URL : <https://atlas-scientific.com/embedded-solutions/ezo-conductivity-circuit/>. Consulté le 20/05/2026.
- [34] ELECFreaks, *HC-SR04 Ultrasonic Ranging Module User Guide*, 2015. URL : <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>. Consulté le 18/06/2026.<https://www.electfreaks.com/wiki/hc-sr04-ultrasonic-sensor.html>
- [35] Adafruit Industries, *Adafruit 16-Channel 12-bit PWM/Servo Driver Guide*, 2026. URL : <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/16-channel-pwm-servo-driver.pdf>. Consulté le 18/06/2026.<https://learn.adafruit.com/16-channel-pwm-servo-driver>
- [36] Songle Relay, *SRD Series Relay Datasheet*, 2024. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/1132639/SONGLERELAY/SRD-12VDC-SL-C.html>. Consulté le 30/03/2026.
- [37] IEC, *IEC 60529: Degrees of Protection (IP Code)*, 2013.
- [38] TANA (Generic), *12 V DC Solenoid Valve Datasheet*, 2024.
- [39] Pololu, *12 V DC Gear Motor Technical Datasheet*, 2024. URL: <https://www.pololu.com/category/60/pololu-metal-gearmotors>. Consulté le 06/04/2026.
- [40] TowerPro, *MG996R High Torque Metal Gear Servo Motor Datasheet*, 2014. URL : https://www.electronicoscaldas.com/datasheet/MG996R_Tower-Pro.pdf. Consulté le 18/06/2026.<https://towerpro.com.tw/product/mg996r/>
- [41] XLSEMI, *XL4015 Buck Converter Datasheet*, 2022. URL: <https://www.xlsemi.com/XL4015.pdf>. Consulté le 28/03/2026.
- [42] Texas Instruments, *LM2596 Datasheet*, 2025. URL : <https://www.ti.com/product/LM2596>. Consulté le 02/04/2026.
- [43] Arduino, *Arduino IDE Documentation*, 2026. URL : <https://docs.arduino.cc/software/ide-v2>. Consulté le 21/04/2026.
- [44] Flask Project (Pallets), *Flask Documentation*, 2026. URL : <https://flask.palletsprojects.com/>. Consulté le 10/04/2026.
- [45] SQLite Consortium, *SQLite Documentation*, 2026. URL : <https://www.sqlite.org/docs.html>. Consulté le 14/04/2026.
- [46] IETF, *RFC 9110 : HTTP Semantics*, 2022.

- [47] Zortrax, Zortrax M Series Plus User Guide, 2021. URL : https://support.zortrax.com/wp-content/uploads/2021/03/user_guide_zortrax_m_series_plus.pdf. Consulté le 18/06/2026.
- [48] FlashForge, Adventurer 3 User Guide, 2021. URL: <https://en.fss.flashforge.com/10000/software/2ff1e48618315861cfee296866c0392a.pdf>. Consulté le 18/06/2026.
- [49] Creality, Ender-3 Series 3D Printer User Manual. URL: <https://www.creality.com/download/ender-3-3d-printer>. Consulté le 18/06/2026.
- [50] Creality, CR-10 Series 3D Printer User Manual. URL: <https://www.creality.com/download/creality-cr-10-smart-3d-printer>. Consulté le 18/06/2026.
- [51] LightBurn Software, LightBurn Documentation, 2026. URL : <https://docs.lightburnsoftware.com/>. Consulté le 18/06/2026.<https://docs.lightburnsoftware.com/>
- [52] Dassault Systèmes, SOLIDWORKS Help, 2024. URL: <https://help.solidworks.com/>. Consulté le 18/06/2026.
- [53] Python Software Foundation, Python Documentation, 2026. URL : <https://docs.python.org/>. Consulté le 18/06/2026.<https://docs.python.org/>
- [54] Pallets Projects, Jinja Documentation, 2026. URL : <https://jinja.palletsprojects.com/>. Consulté le 18/06/2026.<https://jinja.palletsprojects.com/>
- [55] A. Ingle, Crop Recommendation Dataset, Kaggle, 2020. URL : <https://www.kaggle.com/datasets/atharvaingle/crop-recommendation-dataset>. Consulté le 18/06/2026.<https://www.kaggle.com/datasets/atharvaingle/crop-recommendation-dataset>