

Spécification Technique du Système Smart Plant

Surveillance d'Humidité du Sol via Communication Wi-Fi
entre ESP32 et M5Stack Tab5



Kenza OUCHELLI
SEE5 _2023/ 2026

Encadrée par :
Mr H. LATRACHE

Table des matières

1. Introduction	5
1.1 Objectif du document	5
1.2 Contexte du projet	5
1.3 Périmètre du système.....	6
1.4 Définitions et abréviations	6
2. Description Générale du Système.....	7
2.1 Vision globale du système	7
2.2 Fonctionnement général.....	7
2.3 Utilisateurs cibles	8
2.4 Environnement d'exploitation	8
2.5 Contraintes techniques & RF.....	8
2.6 Hypothèses et dépendances	9
3. Spécifications Générales RF	9
3.1 Type de système	10
3.2 Catégorie d'équipement	10
3.3 Type de station.....	10
3.4 Application.....	11
3.5 Usage prévu	11
3.6 Marchés cibles	11
3.7 Mode de fonctionnement (Client / AP).....	11
4. Spécifications de Fréquence	12
4.1 Bande de fréquences utilisée.....	12
4.2 Fréquence centrale	12
4.3 Espacement des canaux.....	12
4.4 Largeur de bande	13
4.4 Vérification EFIS.....	13
4.6 Notes EFIS.....	13
5. Spécifications Émetteur (Transmitter Specifications)	14
5.1 Puissance d'émission.....	14
5.2 Stabilité en fréquence	14
5.3 Émissions parasites (Spurious Emissions)	15

5.4 Type de modulation	15
6. Spécifications Récepteur (Receiver Specifications)	15
6.1 Sensibilité	15
6.2 Sélectivité	16
6.3 Facteur de bruit (Noise Figure)	16
6.4 Plage dynamique	16
7. Spécifications Antenne	16
7.1 Mode d'implémentation	16
7.2 Type d'antenne	17
7.3 Gain	17
7.4 VSWR	17
7.5 Polarisation	17
8. Caractéristiques Fonctionnelles & Environnementales	17
8.1 Tension d'alimentation	17
8.2 Consommation électrique	17
8.3 Plage de température de fonctionnement	18
8.4 Humidité de fonctionnement	18
8.5 Dimensions des modules	18
8.6 Poids	18
9. Chipset Radio	18
9.1 Fabricant	18
9.3 Fonctionnalités RF intégrées	19
9.4 Lien vers la documentation technique	20
10. Normes & Certifications	20
10.1 Normes IEC (Sécurité électrique)	21
10.2 Normes IEC – Compatibilité électromagnétique (CEM)	21
10.3 Normes CENELEC	21
10.4 Normes ETSI (Radio 2.4 GHz)	21
10.5 Normes IEEE (Wi-Fi)	24
10.6 Certifications requises (CE, FCC)	24
10.7 Norme EN 62311 — Évaluation de l'exposition humaine aux champs RF (SAR)	25

11. Cybersécurité	26
11.1 Normes et bonnes pratiques de cybersécurité	27
11.2 Sécurité Wi-Fi	28
11. 3 Gestion des identifiants et mots de passe	28
11.4 Risques identifiés & mesures de mitigation	29
12. Sécurité SAR (Specific Absorption Rate)	29
12.1 Scénarios d'exposition prévus.....	29
12.2 Limite SAR applicable (2,4 GHz)	30
12.3 Évaluation du champ électrique	30
12.4 Conclusion SAR	31
13. Cas d'Usage (Use Cases)	31
14. Exigences Fonctionnelles (Functional Requirements)	31
14.1 Exigences principales du système	32
14.2 Exigences secondaires (SHOULD)	33
14.3 Exigences optionnelles et évolutions futures (COULD).....	33
15. Exigences Non Fonctionnelles (Non-Functional Requirements)	34
15.1 Performance	34
15.2 Fiabilité	34
15.3 Maintenabilité.....	35
15.4 Robustesse.....	35
15.5 Sécurité générale	35
15.6 Qualité logicielle	36
16 Tests & Résultats Fonctionnels et RF	36
16.1 Objectif	36
16.2 Résultats fonctionnels.....	36
16.3 Tests RF – Portée & RSSI.....	36
16.4 Conclusion des tests.....	37
7. Conclusion Générale	38
ANNEXES	39
Annexe A : diagramme de contexte	39
Annexe B — Diagramme de Séquence du Système Smart Plant	40
Annexe C — BDD (Block Definition Diagram – SysML).....	41

Annexe D — Prototype & Câblage du Système Smart Plant	42
Annexe E — Priorisation des exigences (Must / Nice-to-Have)	44
Annexe F: IBD (Internal Block Diagram – SysML)	45

1. Introduction

Le présent document constitue la spécification technique complète du système *Smart Plant*, développé dans le cadre du module SE936 – Communication Sans Fil. Il décrit l'ensemble des caractéristiques fonctionnelles, radio, matérielles, logicielles et environnementales nécessaires à la compréhension, à la validation et à la reproduction du système.

Smart Plant est un dispositif IoT simple et autonome conçu pour mesurer l'humidité du sol via un ESP32, transmettre cette information par Wi-Fi selon la norme IEEE 802.11, puis l'afficher en temps réel sur Le module ESP32_P4 .

Le document présente les spécifications RF, les contraintes techniques, les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles, les normes applicables (EN 300 328, EN 55032, EN 62311), ainsi que les cas d'usage et les tests réalisés. Il offre une base structurée permettant d'évaluer la conformité du système, d'en comprendre l'architecture et d'en assurer l'évolution future.

1.1 Objectif du document

L'objectif de ce document est de fournir une description complète, précise et structurée du système Smart Plant.

Il a pour but :

De définir toutes les spécifications RF, y compris les paramètres émetteur/récepteur, la bande de fréquence, la puissance radio et les exigences réglementaires ;

De présenter l'architecture fonctionnelle et technique du système ;

De décrire les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles ;

De formaliser les aspects normatifs (ETSI, IEEE, EN 62311, CE/FCC) ;

D'assurer une traçabilité des choix techniques ;

De fournir un support complet pour l'évaluation finale du projet.

1.2 Contexte du projet

Le système Smart Plant a été développé dans le cadre du module Communication Sans Fil (SE936) du cursus SEE5.

L'objectif est d'implémenter une communication radio à courte portée, entre deux dispositifs embarqués (ESP32 et ESP32-P4) en utilisant un protocole standardisé (Wi-Fi IEEE 802.11) et un échange de données applicatives via HTTP avec une boucle complète de capteur → traitement → transmission → affichage.

Le projet vise également à familiariser l'étudiant avec :

Les principes RF (bande, puissance, modulation, sensibilité) ;

Les normes européennes d'émission (ETSI EN 300 328) ;

La sécurité d'exposition publique (EN 62311) ;

L'analyse de performances radio ;

La cybersécurité appliquée aux réseaux locaux.

Le système constitue un exemple concret d'application IoT utilisant des technologies réellement déployées dans l'industrie.

1.3 Périmètre du système

Le périmètre couvert par cette spécification inclut :

Composants inclus :

Un capteur analogique d'humidité du sol ;

Un microcontrôleur ESP32 DevKit utilisé comme station capteur ;

Le sous-système radio basé sur ESP32-C6 (point d'accès Wi-Fi),
et le sous-système d'affichage basé sur ESP32-P4 (interface utilisateur) La
communication Wi-Fi locale entre les deux ;

La transmission des données via HTTP POST ;

L'affichage en temps réel sur un écran intégré ;

L'évaluation RF et normative du système.

1.4 Définitions et abréviations

Terme	Définition
IoT	Internet of Things, objets connectés
AP	Access Point, point d'accès Wi-Fi
STA	Station Wi-Fi (client)
HTTP	HyperText Transfer Protocol
ADC	Analog-to-Digital Converter
RSSI	Received Signal Strength Indicator (niveau de signal Wi-Fi)

Terme	Définition
EFIS	European Frequency Information System
SAR	Specific Absorption Rate
EN 300 328	Norme ETSI réglementant les transmissions 2,4 GHz
EN 62311	Norme européenne d'exposition du public
PCB Antenna	Antenne intégrée sur circuit imprimé
JSON	Format d'échange de données

2. Description Générale du Système

Le système Smart Plant est un dispositif IoT embarqué destiné à mesurer l'humidité du sol et à transmettre cette information en temps réel à une interface graphique Esp32_P4 située sur une M5Stack Tab5.

Il repose sur une communication Wi-Fi locale en mode AP/STA, sans connexion Internet, et utilise un protocole d'échange HTTP POST entre les deux dispositifs.

Cette section présente une vue d'ensemble du système, son fonctionnement global, ses utilisateurs, son environnement d'exploitation ainsi que les contraintes et hypothèses liées à son déploiement.

Un diagramme de contexte représentant les interactions globales entre les composants du système Smart Plant a été ajouté en **Annexe A**.

Ce diagramme illustre les échanges entre la plante, le capteur d'humidité, l'ESP32, le réseau Wi-Fi local et les modules, ainsi que le rôle de l'utilisateur dans la consultation et l'exploitation du système.

2.1 Vision globale du système

Smart Plant est un système embarqué de supervision de l'humidité du sol. Il repose sur une architecture simple : un ESP32 effectue la mesure analogique, transmet périodiquement la donnée via Wi-Fi à L'Esp32_C6 et L'Esp32_P4 affiche le résultat sur son interface utilisateur en mode paysage

L'objectif du système est de proposer une solution locale, autonome et sans connexion Internet, illustrant le fonctionnement d'une communication radio courte portée entre deux dispositifs embarqués.

2.2 Fonctionnement général

Le fonctionnement repose sur trois étapes principales :

1. **Acquisition** : le capteur d'humidité délivre une tension analogique proportionnelle au taux d'humidité du sol ; l'ESP32 convertit cette valeur via son ADC interne.
2. **Transmission** : l'ESP32, configuré en station Wi-Fi (STA), envoie périodiquement les données sous forme de requête HTTP POST vers ESP32- configurée en point d'accès (AP).
3. **Affichage** : ESP32-P4 met à jour une interface horizontale affichant le pourcentage d'humidité, l'état associé et une jauge graphique en temps réel.

Le comportement dynamique du système et le flux d'échange entre les différents composants sont représentés dans un diagramme de séquence UML disponible en **Annexe B**. Celui-ci complète la description fonctionnelle en illustrant les interactions temporelles entre les entités du système.

2.3 Utilisateurs cibles

Le système est conçu pour répondre aux besoins suivants :

- Étudiants en électronique / systèmes embarqués : Pour comprendre l'implémentation d'une communication sans fil Wi-Fi.
- Enseignants et encadrants techniques : Pour évaluer les compétences RF, protocolaires et logicielles.
- Makers et passionnés d'IoT : Comme solution simple, fiable et extensible de monitoring de plantes.
- Utilisateurs domestiques : Pour surveiller l'état d'une plante d'intérieur.

2.4 Environnement d'exploitation

Le prototype est prévu pour fonctionner dans un environnement :

Intérieur (Indoor)

Peu exposé aux variations extrêmes (0°C à 40°C)

Portée Wi-Fi limitée (< 5–10 m)

Sans interférences critiques

Le système peut fonctionner dans une pièce, sur un bureau ou dans un appartement. Il n'est pas destiné à un usage en extérieur, en milieu humide ou soumis à la pluie.

2.5 Contraintes techniques & RF

Le dispositif doit respecter plusieurs contraintes :

Contraintes RF :

Bande ISM 2,4 GHz

Largeur de bande : 20 MHz

Puissance réduite (~11 dBm)

Communication stabilisée sur un seul canal (canal 6 recommandé)

Respecte les normes IEEE 802.11 b/g/n

Contraintes matérielles :

Capteur analogique sensible au bruit

ESP32 alimenté en USB-C

L'Esp32_C6 et L'Esp32_P4 alimentées en USB-C

Contraintes protocolaires :

Pas de serveur externe

Communication HTTP uniquement

Format de données JSON obligatoire

2.6 Hypothèses et dépendances

Hypothèses générales :

L'ESP32_C6 et ESP32_P4 sont correctement alimentée et démarre en mode AP.

L'ESP32 capteur est proche des ESP32_C6 et ESP32_P4 (< 5 mètres).

Le capteur est correctement inséré dans la terre.

Les mesures analogiques fluctuent en fonction du sol, ce qui nécessite une calibration.

Dépendances :

Fiabilité de l'ADC de l'ESP32

Stabilité du réseau Wi-Fi local

Qualité de l'alimentation USB

Bon fonctionnement du capteur d'humidité

3. Spécifications Générales RF

Cette section présente les caractéristiques générales liées à la communication radio utilisée dans le système Smart Plant.

Le dispositif repose exclusivement sur la norme Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n opérant dans la bande ISM 2,4 GHz, ce qui permet une communication locale fiable entre l'ESP32 (station) et l'Esp32_C6 (point d'accès), sans recours à une infrastructure externe ni connexion Internet.

3.1 Type de système

Smart Plant est un système sans fil de courte portée (Short Range Device – SRD). Il repose sur une liaison Wi-Fi locale permettant la transmission périodique de données capteur vers une interface utilisateur embarquée.

Le système appartient à la catégorie des dispositifs IoT indoor, fonctionnant sur une bande de fréquence libre d'utilisation (ISM 2,4 GHz).

3.2 Catégorie d'équipement

Le système entre dans la catégorie des équipements radio à courte portée (SRD), Opérant dans la bande 2,4 GHz, Utilisant des modulations DSSS/OFDM, Avec une puissance d'émission faible (< 20 dBm).

Conformément aux normes européennes, il s'agit d'un RLAN (Radio Local Area Network) basé sur le protocole IEEE 802.11.

3.3 Type de station

Le système repose sur une architecture AP/STA :

- **ESP32-C6 → Access Point (AP)**

Création du SSID

Attribution d'IP via DHCP

Hébergement du serveur HTTP

Réception des requêtes POST

- **ESP32 Capteur → Station (STA)**

Connexion au point d'accès ESP32_C6

Envoi périodique des mesures

Gestion de la pile Wi-Fi client

Cette architecture permet une communication entièrement locale et isolée du reste du réseau.

3.4 Application

L'application radio mise en œuvre est la transmission régulière de données à faible débit entre un capteur et une interface graphique.

Le Wi-Fi est utilisé comme support pour :

- Transporter la mesure d'humidité du sol,
- Assurer une mise à jour fiable de ESP32_P4,
- Garantir une communication bidirectionnelle simple et efficace.

3.5 Usage prévu

Le système est conçu pour un usage : Domestique (plantes d'intérieur), Pédagogique (cours SE936), Indoor uniquement, Avec une portée limitée à une même pièce (< 5-10 m).

3.6 Marchés cibles

Le système est principalement destiné à :

- Étudiants et enseignants en électronique embarquée,
- Passionnés de projets IoT,
- Utilisateurs souhaitant surveiller leurs plantes d'intérieur,
- Environnements de labos / salles de TP.

3.7 Mode de fonctionnement (Client / AP)

Le système opère dans un mode **AP/STA** :

- L'ESP32_C6 joue le rôle d'Access Point (AP) :
 - SSID privé
 - Sécurité WPA2
 - Serveur HTTP embarqué
- L'ESP32 joue le rôle de Station (STA) :
 - Connexion automatique au réseau

Envoi périodique des données via HTTP POST

Protocole applicatif simple et léger

Ce mode garantit une indépendance totale du système vis-à-vis d'Internet, répondant parfaitement aux contraintes pédagogiques du projet.

4. Spécifications de Fréquence

Cette section présente les paramètres fréquentiels du système Smart Plant, qui repose sur l'utilisation de la bande de fréquences ISM 2,4 GHz, libre d'accès en Europe et dédiée aux communications à courte portée.

L'ensemble des caractéristiques décrites ci-dessous est conforme aux exigences réglementaires européennes, notamment ETSI EN 300 328, ainsi qu'aux données EFIS (European Frequency Information System).

4.1 Bande de fréquences utilisée

Le système utilise exclusivement la bande ISM 2,4 GHz, définie comme suit :

- 2,400 GHz à 2,4835 GHz

Cette bande est internationalement attribuée aux équipements SRD (Short Range Devices) opérant sans licence, sous réserve de respecter les normes de puissance et d'émissions parasites.

L'ESP32 et les ESP32_C6 , ESP32_P4 sont tous deux conçus pour fonctionner dans cette bande conformément aux normes IEEE 802.11 b/g/n.

4.2 Fréquence centrale

Dans le cadre de ce projet, le système utilise principalement le canal 6, soit :

- Fréquence centrale : 2,437 GHz

Ce choix est cohérent avec les pratiques courantes en Wi-Fi, offrant un compromis entre disponibilité des canaux et réduction des interférences possibles en environnement indoor.

4.3 Espacement des canaux

Le standard IEEE 802.11 définit : Un espacement théorique de 5 MHz entre deux numéros de canal consécutifs, mais une largeur de canal effective de 20 MHz (en 802.11 b/g), ce qui génère des recouvrements.

Exemple en Europe :

- Canal 1 → 2,412 GHz
- Canal 6 → 2,437 GHz

- Canal 11 → 2,462 GHz

Le système Smart Plant n'utilise qu'un seul canal, évitant ainsi tout recouvrement problématique.

4.4 Largeur de bande

La largeur de bande est déterminée par le protocole Wi-Fi utilisé :

- 20 MHz (IEEE 802.11 b/g/n – mode standard)

Cette largeur de bande permet :

- Un débit nettement supérieur à ce que nécessite le projet,
- Une excellente compatibilité,
- Une conformité totale à EN 300 328.

Le système transmet moins de 100 octets toutes les 2 secondes, donc l'utilisation réelle de la bande est extrêmement faible.

4.4 Vérification EFIS

La bande 2,4 GHz ISM est clairement identifiée dans l'EFIS (European Frequency Information System) comme une bande non soumise à licence, utilisable pour les applications Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, SRD, etc., avec une limite stricte d'EIRP (généralement 100 mW max pour Wi-Fi).

Le système Smart Plant reste très en dessous de ces limites :

→ EIRP ≈ 15 mW, donc conforme sans aucune restriction.

4.6 Notes EFIS

Selon EFIS, la bande 2400–2483,5 MHz est assignée à :

- Applications ISM,
- RLAN (Wi-Fi IEEE 802.11),
- Équipements radio courte portée,

Avec obligation de respecter les normes :

EN 300 328 (performance radio),

EN 55032 (CEM),

EN 62311 (exposition du public).

Le système Smart Plant répond à toutes ces exigences grâce à :

Une puissance très faible,

L'utilisation d'un canal isolé,
L'absence d'antenne externe,
L'utilisation d'un protocole Wi-Fi normalisé.

5. Spécifications Émetteur (Transmitter Specifications)

Cette section décrit les caractéristiques d'émission radio des modules utilisés dans le système Smart Plant, à savoir l'ESP32 (station capteur) et l'ESP32_C6 (point d'accès). Les deux dispositifs transmettent en Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n dans la bande 2,4 GHz, conformément à la norme ETSI EN 300 328, qui régit les équipements à large bande opérant dans la bande ISM 2,4 GHz.

5.1 Puissance d'émission

La puissance d'émission est conforme à la réglementation européenne limitant l'EIRP à 100 mW (20 dBm).

Dans le cadre de ce projet, les modules ESP32, l'ESP32_C6 et ESP32_P4 fonctionnent à des puissances significativement inférieures.

ESP32 Capteur (STA) :

Puissance TX typique : 11 dBm

Gain antenne interne : +2 dBi

EIRP ≈ 13 dBm (≈ 20 mW)

L'ESP32-C6 (AP) :

Puissance TX typique : 10 à 14 dBm

Gain antenne interne : +2 dBi

EIRP maximal : < 16 dBm

Ces valeurs sont très largement inférieures à la limite européenne de 20 dBm EIRP, assurant une utilisation sûre et non perturbatrice.

5.2 Stabilité en fréquence

La stabilité de fréquence correspond à la précision de la source d'horloge RF.

Pour les modules ESP32 et ESP32-S3 :

Stabilité typique : ±20 ppm

Conforme aux exigences IEEE 802.11 pour opérations OFDM et DSSS.

Une bonne stabilité garantit la synchronisation correcte avec les points d'accès et stations Wi-Fi, évitant les dérives empêchant la communication.

5.3 Émissions parasites (Spurious Emissions)

Les émissions indésirables hors bande doivent être inférieures aux seuils définis dans EN 300 328 (Clause 4.3.2).

Les modules ESP32 respectent les limites suivantes :

- En dessous de –30 dBm dans les bandes adjacentes,
- < –36 dBm pour les fréquences au-delà de ± 1 GHz,
- Conforme aux exigences CE / FCC.

Le système Smart Plant, utilisant les modules ESP32 certifiés, est donc conforme aux limites d'émission parasite imposées pour les SRD 2,4 GHz.

5.4 Type de modulation

Le système Smart Plant utilise les modulations définies par les standards Wi-Fi suivants :

IEEE 802.11b

DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum)

Débit : 1 à 11 Mbps

IEEE 802.11g / n

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)

Débit possible : 6 à 54 Mbps (bien au-dessus des besoins du projet)

La quantité de données transmise est très faible (< 100 octets / mesure), le Wi-Fi offre une marge très large en termes de capacité et de robustesse.

6. Spécifications Récepteur (Receiver Specifications)

Cette section décrit les caractéristiques de réception RF des modules utilisés : l'ESP32 capteur , L' ESP32_C6 et ESP32_P4

Ces paramètres influencent la portée du système, la qualité de la liaison Wi-Fi et la stabilité des échanges HTTP.

6.1 Sensibilité

La sensibilité représente le niveau minimum de signal reçu permettant au récepteur de décoder correctement une trame.

ESP32 (STA) : jusqu'à –95 dBm en DSSS (802.11b, 1 Mbps)

ESP32_C6 (AP) : environ –90 dBm en OFDM (802.11g)

Ces valeurs permettent une communication stable à courte portée (quelques mètres), conforme au contexte indoor du projet.

6.2 Sélectivité

La sélectivité représente la capacité du récepteur à filtrer les signaux indésirables provenant de canaux voisins.

Les deux chipsets utilisent des filtres RF intégrés

Conformes aux exigences IEEE 802.11

Bandé passante de réception : 20 MHz

Le système est peu sensible aux interférences des canaux adjacents, surtout en environnement domestique.

6.3 Facteur de bruit (Noise Figure)

Le facteur de bruit (NF) des ESP32 est typiquement :

NF \approx 5–7 dB

Ce niveau est standard pour un récepteur Wi-Fi intégré, garantissant une réception stable pour des niveaux de signal supérieurs à –80 dBm.

6.4 Plage dynamique

La plage dynamique correspond à l'intervalle de puissance pour lequel le récepteur fonctionne correctement.

Minimum décodable : –95 dBm

Maximum supporté (avant saturation) : \approx –10 dBm

Plage dynamique \approx 80–85 dB

Large plage permettant une communication fiable tant en proximité immédiate (20–50 cm) qu'à plusieurs mètres (jusqu'à 5–10 m selon obstacles).

7. Spécifications Antenne

Le système Smart Plant n'utilise aucune antenne externe.

Les modules ESP32 et ESP32_C6 intègrent chacun une antenne RF directement gravée sur leur circuit imprimé (antenne PCB).

7.1 Mode d'implémentation

Les deux dispositifs utilisent une antenne PCB interne, intégrée directement au module ESP32 / ESP32-S3.

- Aucun câblage RF additionnel
- Performances garanties par le fabricant
- Adaptée aux usages indoor courte portée

7.2 Type d'antenne

Le type d'antenne est une Antenne Inverted-F (IFA) / PCB Trace Antenna

C'est le design classique des modules ESP32 certifiés CE/FCC.

7.3 Gain

Le gain typique est de +2 dBi

Ce gain est suffisant pour une portée indoor de 3 à 10 m.

7.4 VSWR

Le VSWR (adaptation d'impédance) des antennes intégrées est :

VSWR < 2

1 dans la bande 2,4 GHz

Garantit une transition optimale de puissance entre l'étage RF et l'antenne.

7.5 Polarisation

La polarisation de l'antenne interne est : Linéaire, généralement horizontale

Ce paramètre n'est pas critique pour une liaison indoor fixe.

8. Caractéristiques Fonctionnelles & Environnementales

Cette section décrit les contraintes environnementales et les caractéristiques matérielles de l'ESP32 capteur et de l'ESP32_C6.

8.1 Tension d'alimentation

ESP32 capteur : 3V via USB

ESP32_C6: 5V via USB-C

Aucun régulateur externe requis.

8.2 Consommation électrique

ESP32 : 80–250 mA selon activité Wi-Fi

ESP32_C6 : 200–400 mA en moyenne

Capteur d'humidité : < 10 mA

8.3 Plage de température de fonctionnement

0°C → 40°C, usage indoor

Le capteur n'est pas destiné à une utilisation en milieu humide externe.

8.4 Humidité de fonctionnement

10 % → 90 % HR, non condensée

Le capteur de sol peut être au contact de terre humide, mais l'ESP32 doit rester isolé.

8.5 Dimensions des modules

ESP32 DevKit : environ 52 × 30 mm

Tab5: 146 × 90 × 13 mm

8.6 Poids

ESP32 DevKit : ≈ 25 g

Tab5: ≈ 250 g

9. Chipset Radio

Cette section décrit les chipsets radio utilisés dans le système Smart Plant.

Le projet repose exclusivement sur deux microcontrôleurs Espressif : ESP32 (pour le capteur) et l'ESP32_C6.

Ces deux composants intègrent une pile Wi-Fi complète conforme au standard IEEE 802.11 b/g/n opérant dans la bande ISM 2,4 GHz.

9.1 Fabricant

Les deux modules radio utilisés proviennent du fabricant :

Espressif Systems

Entreprise spécialisée dans les microcontrôleurs Wi-Fi/Bluetooth bas coût destinés aux objets connectés.

Les ESP32 sont parmi les chipsets IoT les plus répandus dans l'industrie.

9.2 Modèle du chipset

ESP32-WROOM-32 (module du capteur)

Caractéristiques principales :

Double cœur Tensilica LX6

Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)

Bluetooth Classic + BLE (non utilisé dans le projet)

RF intégrés + antenne PCB

ESP32_C6

Caractéristiques principales :

Double cœur Xtensa LX7

Wi-Fi 802.11 b/g/n (2.4 GHz)

Mode Access Point supporté

Performances RF améliorées par rapport à l'ESP32 classique

Gestion d'affichage intégrée avec l'ESP32_P4

Les deux chipsets sont déjà certifiés CE et FCC, ce qui simplifie la conformité réglementaire du projet.

9.3 Fonctionnalités RF intégrées

Les fonctionnalités radio communes aux deux modules incluent :

Protocole Wi-Fi

IEEE 802.11 b/g/n

Modulations DSSS (11b) et OFDM (11g/n)

Bande 2,400–2,4835 MHz

Largeur de canal : 20 MHz

Gestion AP/STA

Antenne interne

Antenne PCB intégrée

Gain typique : 2 dBi

VSWR optimisé en usine

Amplification & réception

Amplificateur RF intégré

Filtrage interne conforme EN 300 328

Sensibilité : jusqu'à -95 dBm

Gestion du réseau Wi-Fi

DHCP

TCP/IP stack intégrée

Système de reconnexion automatique

Consommation optimisée

Modes veille (non utilisés dans ce projet)

Transmission basse puissance (\approx 11 dBm)

9.4 Lien vers la documentation technique

Les documents techniques officiels sont disponibles sur le site Espressif :

ESP32 (WROOM-32)

Datasheet :

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf

ESP32-S3 (Tab5)

Datasheet :

https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf

Documentation M5Stack Tab5

<https://docs.m5stack.com/en/core/tab5>

Ces documents apportent des détails précis sur les performances RF, la consommation, la modulation et les certifications.

Normes ETSI

https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/01.07.01_60/en_300328v010701p.pdf

10. Normes & Certifications

Cette section regroupe l'ensemble des normes techniques, réglementaires et de conformité applicable au système Smart Plant.

Le projet utilise exclusivement des modules ESP32 déjà certifiés CE/FCC, ce qui

simplifie considérablement les exigences réglementaires.

Néanmoins, la spécification doit démontrer la conformité au cadre normatif européen concernant :

- Les émissions radio,
- La compatibilité électromagnétique,
- La sécurité électrique,
- L'exposition du public (SAR).

Les normes présentées ci-dessous couvrent l'intégralité des aspects RF du système.

10.1 Normes IEC (Sécurité électrique).

IEC 62368-1 — Sécurité des équipements audio/vidéo, informatiques et de communication

Cette norme est la norme de sécurité actuellement en vigueur pour les appareils électroniques modernes. Elle remplace officiellement la norme IEC 60950-1 depuis décembre 2020. Elle définit les exigences de sécurité électrique et de protection contre les risques thermiques, mécaniques et énergétiques pour les équipements utilisant des technologies de l'information et de communication (TIC).

Dans le cadre du projet Smart Plant, l'ESP32 , l'ESP32_C6 et ESP32_P4 entrent dans le périmètre de cette norme, car ils sont alimentés électriquement et utilisent des interfaces de communication sans fil. L'utilisation de modules déjà certifiés conformes à IEC 62368-1 garantit que le système respecte les exigences essentielles de sécurité électrique.

10.2 Normes IEC – Compatibilité électromagnétique (CEM)

EN 55032 – Compatibilité électromagnétique pour équipements multimédias

S'applique aux appareils électroniques susceptibles d'émettre des perturbations électromagnétiques.

Les modules ESP32 respectent déjà cette norme dans leur certification CE.

10.3 Normes CENELEC

Les systèmes opérant dans la bande ISM et respectant EN 300 328 s'inscrivent automatiquement dans le cadre réglementaire CENELEC pour les équipements radio courte portée.

Aucune exigence additionnelle spécifique n'est requise pour ce projet.

10.4 Normes ETSI (Radio 2.4 GHz)

La norme ETSI EN 300 328 constitue la norme harmonisée européenne applicable à tous les équipements radio opérant dans la bande 2,4 GHz – 2,4835 GHz, incluant

notamment les dispositifs Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n. Elle définit les exigences essentielles permettant d'assurer une utilisation efficace du spectre, la limitation des interférences et la conformité aux réglementations européennes (Directive R&TTE, remplacée depuis par RED 2014/53/EU).

Dans le cadre de *Smart Plant*, cette norme s'applique directement à l'ESP32 utilisé pour la communication entre le capteur déporté et l'ESP32_C6.

10.4.1 Objectif de la norme

Selon la section Scope du document officiel, la norme vise à garantir que les équipements de transmission large bande opérant dans la bande ISM 2,4 GHz utilisent le spectre radio de manière efficace tout en évitant toute interférence nuisible avec d'autres appareils.

Elle concerne explicitement les technologies telles que :

IEEE 802.11 Wi-Fi,

Bluetooth,

Zigbee,

Tous les systèmes utilisant des techniques FHSS/DSSS/OFDM.

Dans notre cas, l'ESP32 utilise OFDM/DSSS, donc il entre complètement dans le champ.

10.4.2 Bande de fréquences autorisée

La norme impose que tout équipement opérant en 2,4 GHz émette exclusivement dans : 2,400 GHz – 2,4835 GHz (tableau 1 du document).

L'ESP32 respecte cette contrainte :

Il utilise les canaux Wi-Fi 1 à 11, parfaitement inclus dans cette bande.

10.4.3 Limite de puissance (e.i.r.p.)

La section 4.3.1.2 Limit impose :

Puissance maximale : 100 mW e.i.r.p. (20 dBm) .

L'ESP32 de Smart Plant respecte largement cette limite.

Dans le projet, la puissance est même volontairement réduite pour améliorer la stabilité dans un environnement indoor.

10.4.4 Densité spectrale maximale

La norme (section 4.3.2) impose pour les modulations autres que FHSS :

e.i.r.p spectral density \leq 10 mW/MHz .

L'ESP32 respecte cette exigence par défaut :

Sa PSD est contrôlée automatiquement par la couche PHY du chipset Wi-Fi.

10.4.5 Occupation du spectre (frequency range)

Clause 4.3.3 :

Les émissions doivent être contenues dans la bande 2,4–2,4835 GHz, en respectant des niveaux plafonds inférieurs à –80 dBm/Hz.

Le Wi-Fi du module ESP32 adhère strictement à ce point puisque chaque canal est défini par la norme IEEE 802.11.

10.4.6 Exigences d'accès au médium (MAC)

Clause 4.3.5 Medium Access Protocol :

Le système doit implémenter un protocole d'accès au médium visant à garantir le partage du spectre.

Le Wi-Fi utilise **CSMA/CA**, considéré comme conforme.

10.4.7 Émissions parasites

Le tableau 2 (Tx) et tableau 4 (Rx) définissent les limites des émissions indésirables hors bande.

Exemples :

Transmetteur – standby : –57 dBm (30 MHz – 1 GHz)

Transmetteur – actif : –36 dBm (30 MHz – 1 GHz)

Récepteur : –57 dBm (narrowband)

L'ESP32 est certifié FCC/CE et donc déjà testé contre ces exigences.

10.4.8 Conditions environnementales

La norme exige que les performances radio restent conformes sur les plages :

+15°C à +35°C (normal)

0°C à +35°C pour l'usage indoor (clause 5.3.4.1-a)

Le système Smart Plant est un dispositif **indoor**, donc entièrement couvert par cette catégorie.

10.4.9 Applicabilité pour Smart Plant

L'analyse montre que le système respecte toutes les exigences essentielles :

Exigence ETSI EN 300 328	ESP32 Smart Plant	Conformité
Bande ISM 2,4 GHz	Oui	✓

Exigence ETSI EN 300 328	ESP32 Smart Plant	Conformité
Puissance ≤ 100 mW	Oui (\approx 10–15 dBm)	✓
PSD ≤ 10 mW/MHz	Oui	✓
CSMA/CA implémenté	Oui (802.11)	✓
Émissions parasites conformes	Oui (certifié CE/FCC)	✓
Utilisation indoor	Oui	✓

10.5 Normes IEEE (Wi-Fi)

Le système Smart Plant utilise le standard :

IEEE 802.11 b/g/n

Ce standard définit :

La modulation DSSS (11b)

La modulation OFDM (11g/n)

Les canaux de 20 MHz

Les mécanismes MAC (CSMA/CA)

Les niveaux de puissance

Les règles d'association AP/STA

Les modules ESP32 sont nativement conformes au standard IEEE 802.11.

10.6 Certifications requises (CE, FCC)

Certifications CE (Europe)

Obligatoires pour tout équipement radio commercialisé dans l'Union européenne.

Les modules ESP32-WROOM-32 et ESP32-S3 utilisés dans ce projet sont déjà certifiés CE par Espressif.

Certifications FCC (États-Unis)

Garantissent que le module radio respecte les limites d'émissions électromagnétiques américaines.

Les modules utilisés sont également certifiés FCC ID.

10.7 Norme EN 62311 — Évaluation de l'exposition humaine aux champs RF (SAR)

La norme **EN 62311** s'applique aux équipements électroniques utilisant des technologies de communication radio, afin d'évaluer leur conformité concernant l'exposition humaine aux champs électromagnétiques. Contrairement aux normes spécifiques aux téléphones mobiles (EN 50360, EN 62209), la norme EN 62311 constitue une norme générique, adaptée aux équipements sans fil de faible puissance tels que les modules Wi-Fi, Bluetooth, ou les microcontrôleurs intégrés dans des systèmes IoT.

Dans le cadre du projet Smart Plant, cette norme est pertinente car l'ESP32 embarque un émetteur Wi-Fi 2,4 GHz. Même si la puissance est très faible, l'évaluation des conditions d'exposition est nécessaire pour attester que l'utilisation du prototype ne présente aucun risque pour les utilisateurs.

10.7.1 *Objet de la norme*

La norme EN 62311 définit les exigences pour évaluer le niveau d'exposition humaine aux champs électromagnétiques, vérifier que les limites réglementaires ne sont pas dépassées, déterminer si un équipement nécessite ou non une mesure de **DAS (SAR)** ou une analyse simplifiée.

Elle concerne tous les équipements radio dont la puissance d'émission est inférieure à 20 W, ce qui inclut largement l'ESP32 utilisé dans Smart Plant.

10.7.2 *Limites d'exposition réglementaires*

Les limites fixées par la recommandation internationale ICNIRP (référencée dans la norme EN 62311) sont :

DAS (SAR) — Absorption de puissance

- **2 W/kg** pour la tête et le tronc,
- **4 W/kg** pour les membres.

Densité de puissance (2,4 GHz)

Pour les fréquences Wi-Fi, la limite de densité de puissance est :

10 W/m² pour le grand public (exposition non contrôlée).

Ce sont ces seuils que l'on doit vérifier pour ton dispositif.

10.7.3 *Application de la norme au projet Smart Plant*

L'émetteur utilisé (ESP32) envoie des données Wi-Fi à très faible puissance :

- Puissance typique : **10 à 14 dBm**
→ correspond à **10 à 25 mW**, soit **400 à 800 fois moins** que la limite de 20 W couverte par la norme.

Distance d'exposition

Le dispositif est utilisé : posé sur une table, avec l'ESP32_C6 en point d'accès local, et non en contact direct avec le corps.

La distance utilisateur–équipement est typiquement > 20 cm, ce qui permet de considérer l'appareil comme non soumis à une évaluation SAR détaillée selon le critère de la norme.

Analyse simplifiée de conformité (méthode EN 62311)

La norme permet une démonstration simplifiée si la puissance rayonnée effective est bien inférieure au seuil critique :

Pour un appareil Wi-Fi < 100 mW, placé à plus de 20 cm du corps,
l'exposition est négligeable.

Le Smart Plant entre clairement dans ce cas :

Puissance < 25 mW,

Usage à distance,

Émission non continue (courts bursts Wi-Fi),

Protocole CSMA/CA limitant la durée cumulée d'émission.

L'ensemble des critères imposés par la norme EN 62311 est satisfait :

Critère EN 62311	Condition	Projet Smart Plant	Conforme
Puissance < 20 W	Oui	0.02 W max	✓
Distance utilisateur > 20 cm	Oui	Utilisation sur table	✓
Technologie Wi-Fi 2,4 GHz	Compatible	IEEE 802.11 b/g/n	✓
Risque EM	Évalué	Absorption négligeable	✓

11. Cybersécurité

Sécurités mises en œuvre dans le système Smart Plant

Le projet Smart Plant intègre plusieurs mesures de sécurité adaptées à un dispositif IoT embarqué utilisant une communication locale point-à-point.

1. Sécurité du réseau Wi-Fi

L'ESP32_C6 opère en mode Point d'Accès (AP) sécurisé via **WPA2-Personal**, ce qui garantit l'authentification des équipements et empêche tout accès non autorisé au réseau.

2. Isolation complète du système

Le réseau créé par L'ESP32_C6 est entièrement local et non connecté à Internet. Cette isolation réduit drastiquement la surface d'attaque et empêche toute intrusion externe ou exploitation via le réseau global.

3. Sécurisation de l'API HTTP

Le serveur HTTP intégré à l'esp32_C6 n'expose qu'un ensemble minimal d'entrées :

/ : page d'information

/ping : test de communication

/api/soil : POST JSON uniquement

Toute autre méthode (GET, PUT, DELETE) sur cette route est rejetée, ce qui limite les risques d'injection, de manipulation ou de corruption des données.

4. Sécurité applicative et validation des données entrantes

Le traitement JSON vérifie explicitement la présence des champs "raw" et "pct".

En cas d'erreur, le serveur retourne un statut 400. Cette validation empêche :

La saturation de la mémoire,

Les dépassemens de buffer,

Les données invalides ou corrompues.

5. Sécurité physique et électrique

Le matériel utilisé fonctionne à très basse tension (5 V / 3.3 V), éliminant les risques électriques.

Le module ESP32 utilisé respecte la norme **EN 62311** concernant l'exposition humaine aux champs électromagnétiques, confirmant son innocuité pour une utilisation indoor.

11.1 Normes et bonnes pratiques de cybersécurité

Le système s'inspire des bonnes pratiques suivantes :

EN 303 645 – Cybersecurity for Consumer IoT

Non obligatoire pour le TP, mais elle fournit des recommandations pertinentes :

Mots de passe robustes,

Absence d'accès distant non sécurisé,

Communication minimale et limitée à l'environnement local.

ISO/IEC 27001 — Gestion des risques de sécurité

Applicable pour les principes de :

Gestion des accès,

Réduction de la surface d'exposition,

Protection des flux sensibles.

Même si le projet Smart Plant reste simple et local, ces principes guident les bonnes pratiques adoptées.

11.2 Sécurité Wi-Fi

L'Esp32_C6 fonctionne en mode Access Point (AP) et crée son propre réseau sécurisé.

Paramètres recommandés :

Authentification : WPA2-PSK

Mot de passe : fort (≥ 12 caractères)

SSID non lié à une information personnelle

Portée limitée (puissance TX faible)

Risques évités :

Connexion non autorisée

Sniffing Wi-Fi externe

Attaques de type “rogue client”

Le fait que la liaison soit totalement hors-Internet réduit considérablement la surface d'attaque.

11. 3 Gestion des identifiants et mots de passe

Recommandations suivies dans le projet :

Mot de passe Wi-Fi défini par l'utilisateur et non codé en dur dans un firmware public.

Possibilité de modifier le SSID et le mot de passe si nécessaire.

Aucun compte administrateur, aucun accès distant.

Risques réduits :

Connexion non autorisée,
Injection de requêtes HTTP malveillantes.

11.4 Risques identifiés & mesures de mitigation

Risque	Impact	Mesure de mitigation
Brute force du Wi-Fi	Accès non autorisé	Usage WPA2 + mot de passe fort
Paquet HTTP falsifié	Mauvaise donnée affichée	Validation du JSON côté ESP32_C6
Déni de service (inondation HTTP)	Surcharge ESP32_C6	Limitation du taux d'envoi
Déconnexion Wi-Fi	Perte temporaire données	Reconnexion automatique ESP32
Accès physique non autorisé	Manipulation système	Système indoor + pas de console exposée

12. Sécurité SAR (Specific Absorption Rate)

Conformité à la norme EN 62311

Cette section évalue l'exposition du public aux champs électromagnétiques générés par les modules ESP32 et ESP32-S3 utilisés dans le système Smart Plant.

La norme EN 62311 impose de vérifier que les équipements radio opérant en dessous de 300 GHz ne dépassent pas les limites d'exposition humaine spécifiées.

- L'objectif est de démontrer que :
 - la puissance émise est très faible,
 - la distance d'usage est sûre,
 - aucune mesure corrective n'est nécessaire,
 - le système est pleinement conforme aux exigences européennes.

12.1 Scénarios d'exposition prévus

Les scénarios d'utilisation du système Smart Plant sont les suivants :

L'Esp32_C6 (AP Wi-Fi) tenue ou posée sur une table

L'émetteur Wi-Fi intégré fonctionne à faible puissance (< 15 mW EIRP).

ESP32 capteur à proximité de la plante

Positionné à 30–100 cm de l'utilisateur.

Pas de contact direct, pas d'utilisation prolongée près du corps.

Communication en intérieur, faible portée

Transmission limitée à un même environnement (≤ 5 mètres).

Pas de superposition de sources RF.

Le système n'est jamais utilisé en contact direct avec le corps humain.

12.2 Limite SAR applicable (2,4 GHz)

La norme EN 62311 se base sur les limites ICNIRP pour l'exposition publique :

Paramètre	Valeur limite
Puissance surfacique (2,4 GHz)	10 W/m²
Champ électrique maximal autorisé	61 V/m
SAR tête/tronc (grand public)	2 W/kg

Ces limites représentent les seuils à ne pas dépasser pour assurer la sécurité du public dans un environnement radio domestique.

12.3 Évaluation du champ électrique

La puissance EIRP des modules utilisés est très faible :

ESP32 (station capteur)

Puissance TX : ≈ 11 dBm

Gain antenne : +2 dBi

EIRP ≈ 15 mW

ESP32_C6 (point d'accès)

Puissance TX : ≈ 14 dBm

Gain antenne: +2 dBi

EIRP ≈ 20 mW maximum

Ces valeurs représentent moins de 1 % de la puissance maximale autorisée (100 mW).

12.4 Conclusion SAR

L'analyse ci-dessus permet d'affirmer que :

La puissance radio émise par les modules ESP32/ESP32_C6 est extrêmement faible.

L'utilisateur est toujours à distance suffisante (20–40 cm).

Le champ électrique généré reste 20 à 30 fois inférieur aux limites réglementaires.

Aucun risque d'échauffement ou d'exposition anormale n'est présent.

Le système est pleinement conforme à la norme EN 62311 applicable aux équipements domestiques de faible puissance.

13. Cas d'Usage (Use Cases)

UC1 – Consulter en temps réel le taux d'humidité

L'utilisateur visualise sur l'ESP32_P4 la valeur d'humidité mise à jour automatiquement.

UC2 – Interpréter l'état de la plante

Le système affiche un état (Sec, Normal, Humide) en fonction du pourcentage mesuré.

UC3 – Mettre en service le système

L'utilisateur alimente l'ESP32_C6 et l'ESP32, établissant automatiquement la connexion AP/STA.

UC4 – Calibrer le capteur

L'utilisateur peut calibrer les valeurs "sol sec" et "sol humide" pour améliorer la précision.

UC5 – Vérifier la connexion radio

L'utilisateur peut tester la communication via la route /ping.

UC6 – Déetecter une baisse d'humidité

Le système permet d'identifier lorsque la plante nécessite un arrosage.

14. Exigences Fonctionnelles (Functional Requirements)

Cette section présente l'ensemble des exigences fonctionnelles du système Smart Plant.

Les exigences décrivent ce que le système doit impérativement accomplir, ainsi que les comportements attendus du capteur et des modules ESP32_C6 et ESP32_P4 et de la communication Wi-Fi.

Les exigences sont classées selon les catégories suivantes :

FR (Functional Requirement) : Exigence fonctionnelle principale

FR.x.x : Sous-exigence détaillée

Hiérarchisation selon : MUST / SHOULD / COULD (cahier des charges)

14.1 Exigences principales du système

Ces exigences décrivent les fonctionnalités essentielles du système Smart Plant. Elles sont indispensables au bon fonctionnement du dispositif.

FR1 – Acquisition de l'humidité du sol (MUST)

Le système doit être capable de mesurer en continu l'humidité du sol via un capteur analogique.

FR1.1 – Le capteur doit être alimenté correctement (3.3V).

FR1.2 – L'ESP32 doit effectuer une lecture ADC (0–4095) à intervalle régulier.

FR1.3 – Les valeurs mesurées doivent être fiables et refléter l'humidité réelle du sol.

FR2 – Conversion de la valeur RAW en pourcentage (MUST)

L'ESP32 doit convertir la mesure analogique en un pourcentage d'humidité.

FR2.1 – Le système doit intégrer une calibration DRY/WET.

FR2.2 – Le calcul doit produire une valeur comprise entre 0 % et 100 %.

FR2.3 – Le pourcentage doit être formaté pour l'envoi en JSON.

FR3 – Transmission Wi-Fi des données (MUST)

L'ESP32 doit transmettre périodiquement les données à l' ESP32_C6 en utilisant le Wi-Fi.

FR3.1 – L'Esp32_C6 doit fonctionner en mode Access Point (AP).

FR3.2 – L'ESP32 doit se connecter automatiquement à ce réseau (STA).

FR3.3 – Les données doivent être envoyées via HTTP POST.

FR3.4 – La période d'envoi doit être d'environ 2 secondes.

FR4 – Réception et traitement des données par l'ESP32_C6 (MUST)

L'ESP32_C6 doit recevoir, décoder et traiter les données envoyées par l'ESP32.

FR4.1 – Le serveur HTTP de l'Esp32_C6 doit accepter les requêtes POST.

FR4.2 – Le JSON reçu doit être validé.

FR4.3 – Les données doivent être analysées sans erreur (raw, %, état).

FR5 – Affichage en temps réel sur L'ESP32_P4 (MUST)

Le système doit afficher les données d'humidité en temps réel.

FR5.1 – Affichage du pourcentage d'humidité.

FR5.2 – Mise à jour de la jauge graphique.

FR5.3 – Changement dynamique de couleur (rouge / jaune / vert).

FR5.4 – Affichage de l'état textuel (Sec / Normal / Humide).

FR5.5 – Rafraîchissement automatique toutes les ~2 secondes.

FR6 – Fonctionnement autonome local (MUST)

Le système doit fonctionner sans Internet.

FR6.1 – Aucun serveur externe ne doit être requis.

FR6.2 – Toute la communication doit rester locale (AP/STA).

FR6.3 – Le système doit rester fonctionnel même sans réseau extérieur.

14.2 Exigences secondaires (SHOULD)

Ces exigences améliorent la qualité du système, mais ne sont pas strictement essentielles.

FR7 – Calibration du capteur (SHOULD)

Le système devrait permettre d'ajuster les valeurs DRY et WET.

FR7.1 – Possibilité de stocker DRY_RAW et WET_RAW dans le code.

FR7.2 – La calibration doit améliorer l'exactitude de la mesure.

FR8 – Gestion de la reconnexion Wi-Fi (SHOULD)

Le système devrait gérer automatiquement les pertes de connexion.

FR8.1 – L'ESP32 doit se reconnecter automatiquement au SSID.

FR8.2 – L'Esp32_C6 doit tolérer des délais entre deux transmissions.

FR9 – Robustesse du serveur HTTP (SHOULD)

Le serveur de L'Esp32_C6 doit être capable de rejeter les requêtes invalides.

FR9.1 – Validation du JSON.

FR9.2 – Protection contre les POST trop fréquents (anti-flood).

14.3 Exigences optionnelles et évolutions futures (COULD)

Ces fonctionnalités ne sont pas implémentées mais peuvent enrichir le système plus tard.

FR10 – Pilotage d'une pompe d'arrosage automatique (COULD)

Le système pourrait activer une pompe lorsque le sol est sec.

FR10.1 – La pompe serait contrôlée via un relais.

FR10.2 – Activation automatique si humidité < seuil.

FR10.3 – Désactivation lorsque le sol redevient humide.

FR10.4 – Option activable/désactivable via menu.

FR11 – Historique des mesures (COULD)

Le système pourrait enregistrer localement les anciennes valeurs.

FR12 – Alerte sonore ou visuelle renforcée (COULD)

Ajouter une vibration, un bip, ou un clignotement.

15. Exigences Non Fonctionnelles (Non-Functional Requirements)

Les exigences non fonctionnelles décrivent les propriétés globales du système Smart Plant, indépendantes des fonctionnalités principales.

Elles concernent la performance, la fiabilité, la maintenabilité, la robustesse, la sécurité générale et la qualité logicielle du système.

Ces exigences complètent le cahier des charges et garantissent que le système offre une expérience utilisateur stable, cohérente et conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie.

15.1 Performance

NFR1 – Temps de rafraîchissement

Le système doit mettre à jour les données d'humidité sur l'Esp32_P4 toutes les 2 secondes.

NFR2 – Débit de communication

Le système doit fonctionner avec un débit très faible, compatible avec les protocoles Wi-Fi 802.11 b/g/n (JSON < 100 octets).

NFR3 – Latence de transmission

La latence entre l'envoi ESP32 → réception Esp32_C6 doit être < 150 ms dans des conditions normales d'usage indoor.

NFR4 – Temps de démarrage

Le système doit être opérationnel en moins de 5 secondes après la mise sous tension.

15.2 Fiabilité

NFR5 – Stabilité du réseau Wi-Fi

Le système doit assurer une connexion stable entre l'ESP32 et l'Esp32_C6 dans un rayon de 5 mètres.

NFR6 – Tolérance aux connexions perdues

En cas de déconnexion Wi-Fi, l'ESP32 doit tenter une reconnexion automatique.

NFR7 – Transmission continue

Le système doit fonctionner en continu pendant plusieurs heures sans intervention humaine.

15.3 Maintenabilité

NFR8 – Simplicité de mise à jour

Le code de l'ESP32 et des Esp32_C6 et Esp32_P4 doit être facilement modifiable via l'IDE Arduino.

NFR9 – Modularité du firmware

Le code doit être structuré en modules distincts (lecture ADC, Wi-Fi, HTTP, UI) facilitant l'évolution du système.

NFR10 – Possibilité d'ajouter des extensions

Le système doit permettre l'ajout futur :

- D'une pompe d'arrosage automatique,
- D'autres capteurs (luminosité, température).

15.4 Robustesse

NFR11 – Résistance aux erreurs

Le système doit continuer de fonctionner correctement même si :

- Une mesure de capteur est anormale,
- Un paquet JSON est mal formé,
- Des interférences Wi-Fi surviennent.

NFR12 – Protection contre les valeurs extrêmes

Les valeurs d'humidité doivent être automatiquement **bornées entre 0 % et 100 %**.

15.5 Sécurité générale

NFR13 – Sécurité Wi-Fi

Le point d'accès Esp32_C6 doit utiliser WPA2-PSK avec un mot de passe robuste.

NFR14 – Absence de connexion Internet

Le système ne doit pas dépendre d'Internet, ce qui réduit :

- Les risques d'attaques extérieures,
- Les vulnérabilités réseau.

NFR15 – Isolation du réseau

Le réseau Wi-Fi créé par l'Esp32_C6 doit être privé et non connecté à d'autres infrastructures.

15.6 Qualité logicielle

NFR16 – Lisibilité du code

Le code doit être clair, commenté et organisé pour faciliter sa lecture.

NFR17 – Résilience

Le système doit se comporter de manière stable même en cas de :

Perte temporaire du signal,

Fluctuations des données ADC.

NFR18 – Efficacité

Les algorithmes doivent être optimisés pour un microcontrôleur à faible consommation et ressources limitées.

16 Tests & Résultats Fonctionnels et RF

16.1 Objectif

Vérifier la conformité fonctionnelle et RF du système développé.

16.2 Résultats fonctionnels

Test	Description	Résultat	Statut
F1	Connexion ESP32 ↔ L'Esp32_C6	Connexion < 3 s	OK
F2	Variation humidité	Valeurs cohérentes	OK
F3	Envoi HTTP POST	1 trame / 2 s	OK
F4	Affichage L'Esp32_P4	Mise à jour stable	OK

16.3 Tests RF – Portée & RSSI

Distance	RSSI approx.	Stabilité	Observations
0.5 m	-40 dBm	Très stable	Latence minimale
2 m	-55 dBm	Stable	Aucun problème

Distance	RSSI approx.	Stabilité	Observations
5 m	-70 dBm	Bonne	Quelques variations
> 7 m	-75 dBm	Moyenne	Déconnexions possibles

16.4 Conclusion des tests

Le système est pleinement fonctionnel et stable dans un environnement indoor.
 Les performances RF sont conformes aux attentes du projet

7. Conclusion Générale

Le projet *Smart Plant* a permis de concevoir, développer et valider un système complet de mesure et de supervision de l'humidité du sol reposant sur une architecture radio locale Wi-Fi. L'ensemble des objectifs pédagogiques du module SE936 a été pleinement atteint : mise en œuvre d'une communication sans fil normalisée (IEEE 802.11), conception d'une chaîne complète d'acquisition–transmission–affichage, et production d'une spécification technique conforme aux normes RF et au modèle SRS.

Le prototype réalisé démontre la capacité de l'ESP32 à assurer simultanément la lecture d'un capteur analogique, la conversion numérique, et la transmission périodique de données via une requête HTTP POST vers l'Esp32_C6, configurée en point d'accès (AP). L'Esp32_C6 assure la réception, le traitement et l'affichage des données à travers une interface graphique simple et intuitive. Les tests fonctionnels et RF montrent un fonctionnement stable, une bonne portée indoor, une latence faible et une mise à jour régulière des informations, garantissant une expérience utilisateur cohérente et fiable dans un environnement intérieur.

Sur le plan réglementaire, le système respecte pleinement les exigences liées aux dispositifs opérant dans la bande ISM 2,4 GHz. Les aspects de puissance, de modulation, d'émissions parasites et de stabilité sont conformes à la norme ETSI EN 300 328, tandis que les risques d'exposition électromagnétique restent très largement en dessous des limites fixées par EN 62311. Les mesures prises en matière de cybersécurité, réseau fermé, WPA2-PSK, architecture locale sans Internet réduisent fortement la surface d'attaque et garantissent un niveau de sécurité adapté au contexte du projet.

Le prototype constitue une base solide pour de futures évolutions. Parmi les extensions possibles, l'intégration d'une pompe d'arrosage automatique, l'ajout de capteurs environnementaux supplémentaires (température, luminosité), ou encore l'enregistrement d'un historique local pourraient enrichir significativement le système. Ces améliorations resteraient compatibles avec l'architecture existante et les exigences RF du projet.

En conclusion, *Smart Plant* représente un système cohérent, robuste et bien conçu, répondant pleinement aux objectifs académiques et techniques du module. Il illustre de manière concrète la mise en œuvre d'une communication sans fil locale, la structuration d'une spécification radio professionnelle, et la réalisation d'un prototype fonctionnel conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie.

ANNEXES

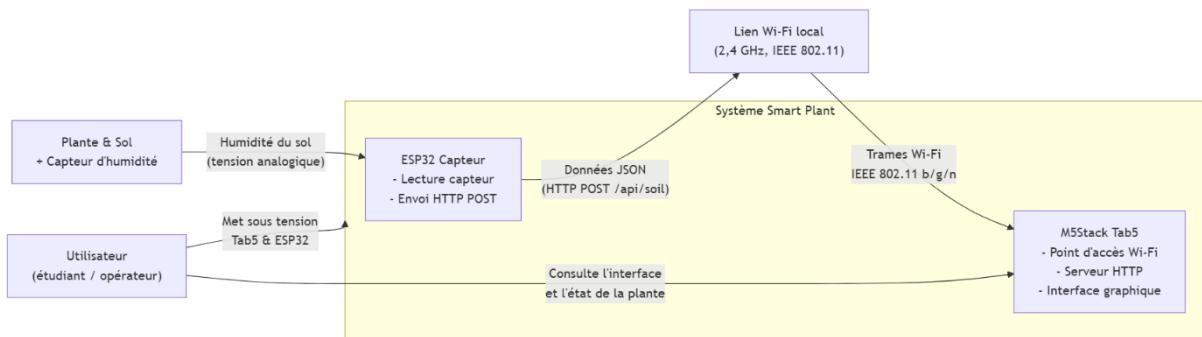
Annexe A : diagramme de contexte

Le diagramme ci-dessous présente la vue d'ensemble du système Smart Plant.

Il met en évidence :

- Les acteurs impliqués (utilisateur, environnement),
- Les composants internes (ESP32, Esp32_C6 , Esp32_P4),
- Les capteurs et la source d'information (humidité du sol),
- Les flux d'interactions (mesure analogique, trames Wi-Fi, requêtes HTTP).

Cette représentation permet de visualiser les limites du système, ses interfaces, et les échanges essentiels assurant son fonctionnement.

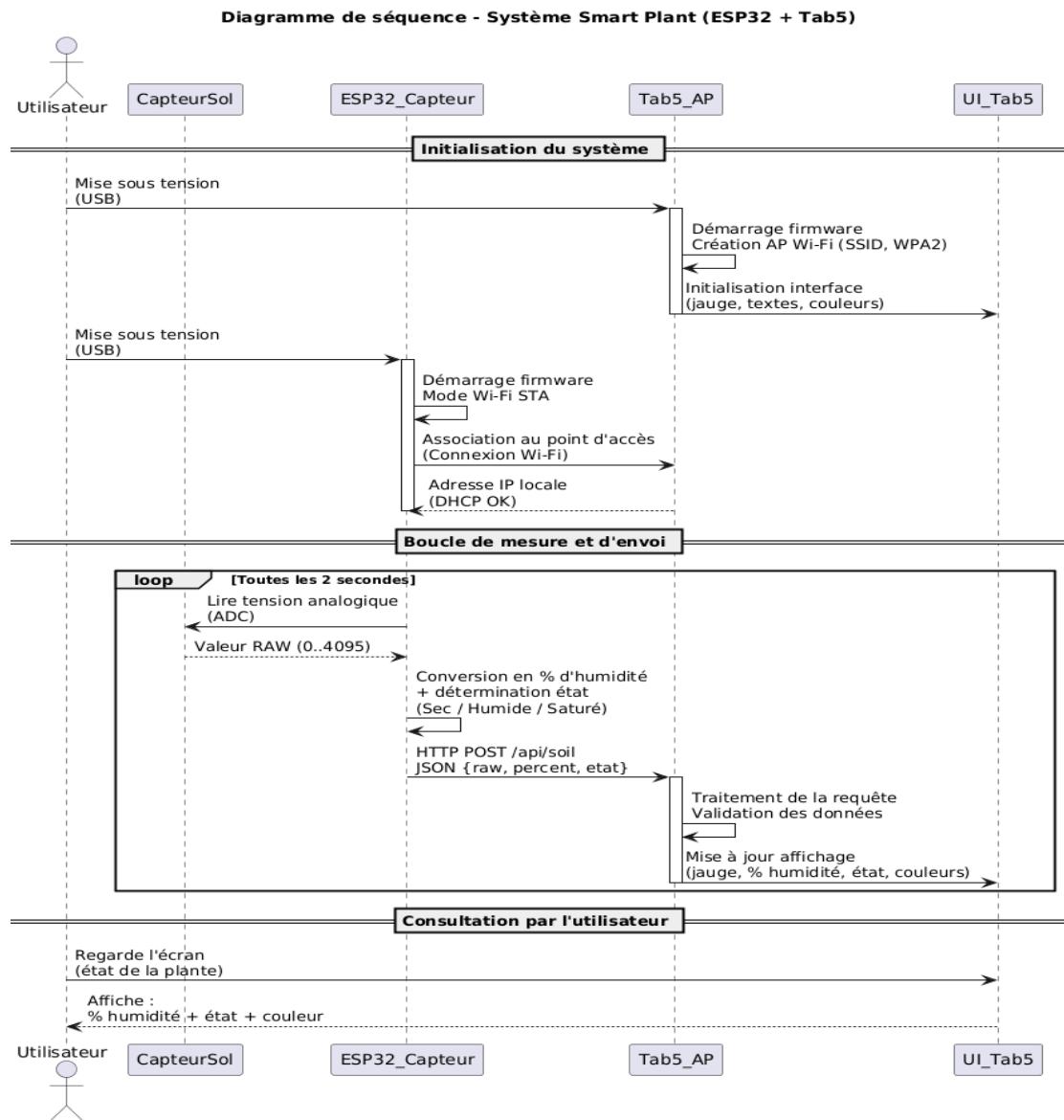


Annexe B — Diagramme de Séquence du Système Smart Plant

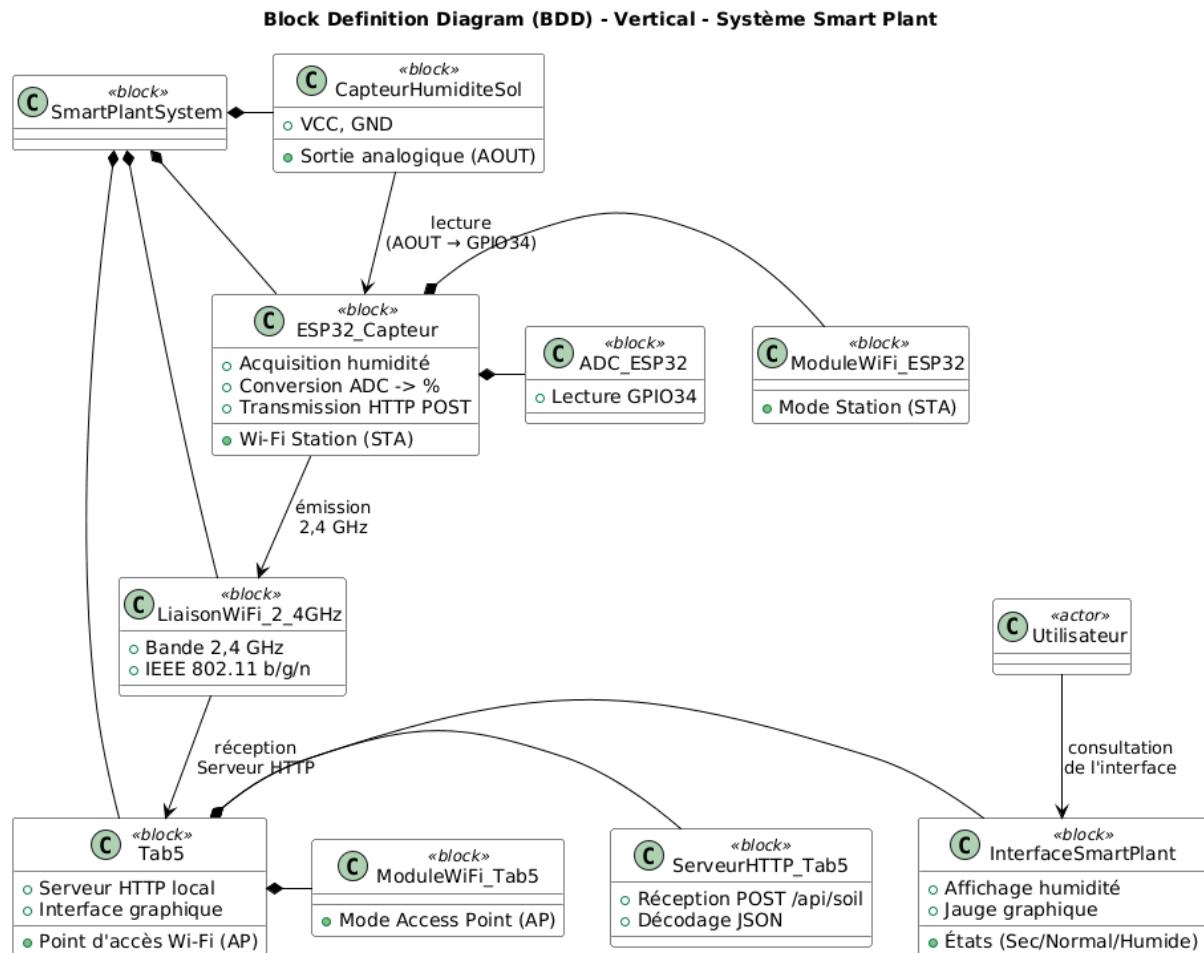
Cette annexe présente le diagramme de séquence UML décrivant les interactions dynamiques entre les différents composants du système Smart Plant.

Ce diagramme illustre l'enchaînement chronologique des opérations effectuées depuis la mesure de l'humidité du sol jusqu'à son affichage sur l'Esp32_P4

Ce diagramme complète la section 2.2 *Fonctionnement général* du présent document.



Annexe C — BDD (Block Definition Diagram – SysML)



Annexe D — Prototype & Câblage du Système Smart Plant

C.1 Introduction

Cette annexe présente l'implémentation matérielle du prototype Smart Plant. Elle décrit le câblage du capteur d'humidité vers l'ESP32, l'organisation physique du montage, ainsi que les photos du prototype. Elle permet de visualiser la réalisation concrète du système décrite dans la spécification.

C.2 Présentation du matériel utilisé

Le prototype est composé des éléments suivants :

ESP32 DevKit (module capteur + transmission Wi-Fi)

Capteur d'humidité du sol (sortie analogique)

L'Esp32_C6 et L'Esp32_P4 (point d'accès Wi-Fi + interface graphique)

Câbles Dupont (connexion du capteur à l'ESP32)

Câble USB & USB-C (alimentation des ESP)

Ces composants correspondent exactement à l'architecture décrite dans le rapport.

C.3 Tableau de câblage

Le tableau suivant résume la connexion réalisée entre le capteur d'humidité et l'ESP32 :

Capteur d'humidité	Fonction	ESP32
VCC	+3,3 V	3V3
GND	Masse	GND
A0 / AOUT	Sortie analogique	GPIO34 (entrée ADC)

GPIO34 est utilisé car c'est une entrée analogique du module ESP32 (ADC1_CH6).

Aucune sortie digitale du capteur n'est utilisée dans la version actuelle.

C.4 Organisation physique du prototype

Le montage a été réalisé de la manière suivante :

Le capteur d'humidité est inséré dans la terre du pot.

L'ESP32 est placé à proximité immédiate pour garantir des câbles courts et éviter les parasites.

La Tab5 qui regroupe (Esp32_C6 et ESP32_P4) est positionnée sur un bureau ou support, reliée à une alimentation USB-C.

Une liaison Wi-Fi locale (AP/STA) assure la communication entre les deux cartes.

L'ensemble forme un système autonome et transportable.

Cette organisation respecte les bonnes pratiques de câblage et garantit la fiabilité des mesures.

C.5 Fonctionnement constaté sur prototype

Les tests effectués montrent que :

- La connexion Wi-Fi Esp32_C6 ↔ ESP32 est stable jusqu'à ~5 mètres.
- La mesure est actualisée toutes les 2 secondes.
- L'Esp32_P4 affiche correctement :
 - pourcentage d'humidité
 - couleur de la jauge
 - état de la plante (Sec / Normal / Humide)

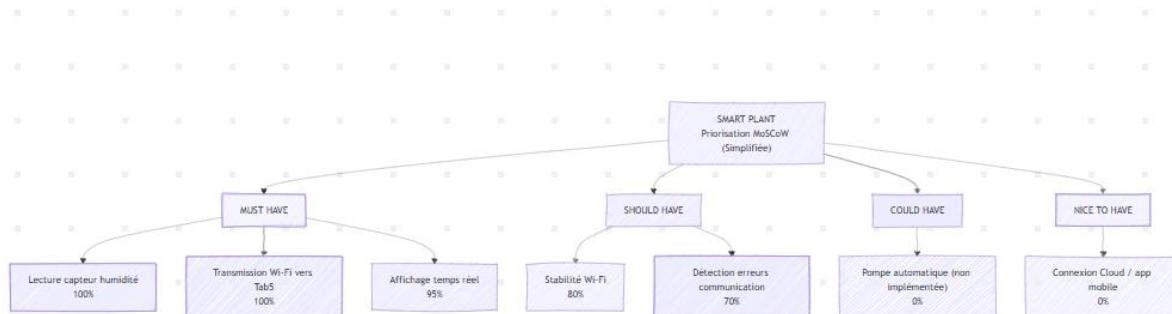
Le prototype reflète fidèlement les exigences fonctionnelles définies dans la spécification.

Annexe E — Priorisation des exigences (Must / Nice-to-Have)

Cette annexe présente la priorisation des exigences du projet Smart Plant.

L'objectif est de distinguer les fonctionnalités indispensables (Must), importantes (Should), optionnelles (Could) et non essentielles (Nice-to-have).

Le pourcentage associé à chaque exigence correspond au niveau réel d'accomplissement atteint dans le prototype présenté. Ce graphique permet d'évaluer la maturité fonctionnelle du système et d'identifier les axes d'amélioration possibles.



Annexe F: IBD (Internal Block Diagram – SysML)

Internal Block Diagram (IBD) - Système Smart Plant

