

Spécification et architecture du système Capteur de Pluie IoT – ESP32 (Wi-Fi + MQTT)

Par : TACHIKIRTE Chaimae

Filière : SEE5 – Hyperfréquences & Systèmes de Communication

Année académique : 2025 – 2026

TABLE DES MATIÈRES

1. Introduction.....	5
1.1 Objectif du document.....	5
1.2 Contexte du projet.....	5
1.3 Périmètre du produit.....	5
1.4 Définitions et abréviations.....	5
1.5 Public visé.....	6
1.6 Références.....	6
2. Description Générale du Système.....	6
2.1 Vision globale du système.....	6
2.2 Fonctionnement général.....	7
2.3 Utilisateurs cibles.....	7
2.4 Environnement d'exploitation.....	7
2.5 Contraintes techniques & RF.....	7
2.6 Hypothèses et dépendances.....	8
3 - Spécifications générales RF.....	8
3.1 Type de système.....	8
3.2 Catégorie d'équipement.....	8
3.3 Type de station.....	8
3.4 Application.....	9
3.5 Usage prévu.....	9
3.6 Marchés cibles principaux.....	9
3.7 Mode de fonctionnement.....	10
Mode Client Wi-Fi.....	10
4- Spécifications de fréquence.....	10
4.1 Bande de fréquences utilisée.....	10
4.2 Fréquence centrale.....	10
4.3 Espacement des canaux.....	11
4.4 Largeur de bande.....	11
4.5 Vérification EFIS.....	11
4.6 Notes EFIS.....	11
5. Spécifications Émetteur (Transmitter Specifications).....	14
5.1 Puissance d'émission.....	14
5.2 Stabilité en fréquence.....	14
5.3 Émissions parasites.....	14
5.4 Type de modulation.....	14
6. Spécifications Récepteur (Receiver Specifications).....	15
6.1 Sensibilité.....	15
6.2 Sélectivité.....	15
6.3 Facteur de bruit (Noise Figure).....	15
6.4 Plage dynamique.....	15
7. Spécifications Antenne.....	16
7.1 Type d'implémentation.....	16

7.2 Type d'antenne.....	16
7.3 Gain.....	17
7.4 Taux d'ondes stationnaires (VSWR).....	17
7.5 Polarisation.....	17
8. Caractéristiques Fonctionnelles et Environnementales.....	17
8.1 Tension d'alimentation.....	18
8.2 Consommation électrique.....	18
8.3 Plage de température.....	18
8.4 Humidité de fonctionnement.....	18
8.5 Dimensions.....	19
8.6 Poids.....	19
9. Chipset Radio.....	19
9.1 Fabricant.....	19
9.2 Modèle.....	19
9.3 Détails et fonctionnalités RF.....	20
9.4 Lien vers la documentation.....	20
10. Normes & Certifications.....	21
10.1 Normes IEC (Sécurité).....	21
10.2 Normes IEC (Compatibilité Électromagnétique).....	22
10.3 Normes CENELEC.....	23
10.4 Normes ETSI (Radio 2.4 GHz).....	23
10.5 Normes IEEE (802.11).....	26
10.6 Certifications requises (CE, FCC, IC).....	26
11. Cybersécurité.....	27
11.1 Enjeux de la cybersécurité pour un nœud IoT.....	27
11.2 Menaces potentielles.....	28
11.3 Mesures de sécurité intégrées au RainNode.....	28
11.4 Sécurisation avancée des communications : MQTTS (MQTT over TLS).....	29
11.5 Bonnes pratiques IoT recommandées.....	30
11.6 Normes et référentiels de cybersécurité applicables.....	30
11.7 Analyse de conformité du RainNode ESP32.....	31
11.8 Limites de sécurité (dans le cadre pédagogique).....	32
12. Sécurité SAR (Specific Absorption Rate).....	32
12.1 Scénarios d'exposition prévus.....	32
12.2 Limite SAR applicable.....	32
12.3 Exposition RF du RainNode ESP32.....	33
12.4 Justification de non-exigence de tests SAR supplémentaires.....	33
12.5 Références et normes officielles SAR.....	34
13. Cas d'Usage (Use Cases).....	34
13.1 Cas d'usage 1 — Détection de pluie en temps réel.....	34
13.2 Cas d'usage 2 — Envoi des données vers un serveur MQTT Cloud.....	35
13.3 Cas d'usage 3— Visualisation sur la tablette M5 Tab5.....	36
14. Exigences Fonctionnelles (Functional Requirements).....	36
14.1 Exigence Fonctionnelle 1 :Lecture et traitement du capteur de pluie.....	36

14.3 Exigence Fonctionnelle 3 — Interface TAB5 de supervision.....	37
14.4 Exigence Fonctionnelle 4 — Communication MQTT (Cloud/Local).....	37
14.5 Exigence Fonctionnelle 5 — Scénarios multi-nœuds.....	38
15 - Exigences non fonctionnelles.....	38
15.1 Performance.....	38
15.2 Fiabilité & robustesse.....	39
15.3 Sécurité & cybersécurité.....	39
15.4 Conformité réglementaire.....	39
15.5 Contraintes environnementales.....	39
15.6 Maintenabilité.....	39
17- Synthèse.....	40
18- Annexes.....	43
18.1 Diagrammes complémentaires :.....	43
18.2 Glossaire.....	44

1. Introduction

1.1 Objectif du document

L'objectif principal est de présenter de manière détaillée l'ensemble des spécifications techniques, fonctionnelles, radiofréquences et environnementales du système RainNode ESP32. Celui-ci constitue un nœud IoT de détection de pluie reposant sur une communication RF via Wi-Fi et sur la transmission de données en MQTT. Le document sert de référence pour le développement, l'intégration et la validation du système dans le cadre du module SE936. Il a également pour but de guider les enseignants, évaluateurs et utilisateurs techniques dans la compréhension globale du dispositif et de ses exigences.

1.2 Contexte du projet

Le RainNode ESP32 a été développé dans un contexte pédagogique imposant à l'étudiant de concevoir un dispositif embarqué utilisant une technologie radio conforme aux normes et contraintes RF. Le projet s'inscrit dans un ensemble de systèmes IoT. Il exploite un microcontrôleur ESP32 équipé d'un module Wi-Fi 2.4 GHz et un capteur analogique de pluie permettant de détecter la présence d'eau sur une surface conductrice. L'appareil réalise ensuite un traitement numérique pour en déduire un pourcentage de pluie et publie ces informations via MQTT. Le projet permet de mettre en pratique les compétences théoriques en RF, communication sans fil, IoT, sécurité et traitement du signal.

1.3 Périmètre du produit

Le périmètre du RainNode ESP32 comprend l'acquisition des données issues du capteur de pluie, leur traitement interne, leur conversion en pourcentage d'intensité et leur transmission via Wi-Fi. Le dispositif inclut également une interface Web embarquée pour visualiser les données en temps réel. En revanche, le périmètre ne prévoit ni prévisions météorologiques avancées, ni gestion multi-capteurs, ni intégration cloud évoluée. Le système se concentre exclusivement sur la détection, la publication et la consultation locale de l'état de pluie.

1.4 Définitions et abréviations

Plusieurs termes techniques sont utilisés dans ce document et sont nécessaires à la compréhension du système. L'ESP32 désigne le microcontrôleur principal intégrant la radio Wi-Fi. Le protocole MQTT correspond à un mécanisme léger de communication publish/subscribe utilisé par de nombreux systèmes IoT. Le terme RF désigne les aspects radiofréquences liés à l'émission et à la réception du signal Wi-Fi. Le RSSI représente l'intensité du signal reçu lors de la connexion. Enfin, RAW désigne la valeur brut du capteur de pluie avant tout traitement numérique.

1.5 Public visé

Ce document s'adresse principalement aux enseignants responsables du module SE936 et au jury chargé d'évaluer la conformité technique et RF du projet. Il est également destiné aux étudiants impliqués dans des développements IoT ou RF, ainsi qu'aux techniciens souhaitant intégrer le RainNode dans une architecture domotique ou un réseau de capteurs. Toute personne intéressée par la reproduction ou l'amélioration du projet peut également s'y référer, car il constitue une base claire et exhaustive à partir de laquelle le système peut être étendu.

1.6 Références

Les spécifications du RainNode reposent sur plusieurs documents et normes. Le document de base utilisé est le template officiel SE936 intitulé "Radio_SRS_TemplateSEE5-2026.docx". Les informations techniques proviennent notamment de la documentation du module ESP32-WROOM fournie par Espressif Systems. Les aspects RF respectent les normes européennes ETSI EN 300 328 concernant la bande 2.4 GHz, ainsi que les normes EN 301 489 relatives à la compatibilité électromagnétique. Enfin, les protocoles utilisés se basent sur les spécifications IEEE 802.11 pour le Wi-Fi et MQTT 3.1.1 pour la communication en mode publish/subscribe.

2. Description Générale du Système

2.1 Vision globale du système

Le RainNode ESP32 est un nœud IoT autonome conçu pour détecter l'humidité et la présence de pluie dans un environnement extérieur ou semi-extérieure. Il repose sur un microcontrôleur ESP32 intégrant un module Wi-Fi 2.4 GHz ainsi qu'un capteur analogique de pluie, dont le signal brut est traité pour déterminer l'intensité de la pluie sous forme d'un pourcentage.

Le RainNode transmet exclusivement ses données via MQTT au travers du réseau Wi-Fi existant. Il ne crée pas de point d'accès, et ne fournit pas d'interface Web embarquée. Toute lecture et visualisation se fait via un client MQTT (comme la Tab5).

2.2 Fonctionnement général

Le fonctionnement du RainNode repose sur une chaîne de traitement claire et séquentielle. Après mise sous tension, le système réalise une calibration automatique en conditions sèches afin de déterminer une valeur de référence du capteur. Une fois cette base établie, l'ESP32 effectue des lectures analogiques régulières et applique un traitement numérique comprenant filtrage, conversion en pourcentage et détection de changements d'état pluie/sec via une hystérésis spécialement conçue pour éviter les oscillations.

Lorsque les données sont prêtes, le système tente de rejoindre un réseau Wi-Fi configuré. S'il y parvient, il transmet les données en MQTT. Cette mécanique d'auto-adaptation rend le RainNode particulièrement fiable dans des environnements variés.

2.3 Utilisateurs cibles

Le RainNode est conçu pour différents types d'utilisateurs, chacun ayant des attentes particulières, mais tous bénéficiant de la simplicité d'usage du dispositif.

- **Les étudiants et enseignants** utilisent le dispositif comme support pédagogique pour les travaux pratiques de radiofréquences, d'IoT et de systèmes embarqués.
- **Les utilisateurs domotiques** peuvent l'intégrer dans un système de gestion de maison intelligente pour détecter la pluie et déclencher des actions telles que la fermeture de stores ou l'envoi d'alertes.
- **Les agriculteurs et techniciens de serre** peuvent l'utiliser comme capteur d'humidité externe afin d'optimiser les cycles d'arrosage.
- **Les développeurs IoT** peuvent s'en servir comme base de développement pour intégrer des capteurs supplémentaires.

2.4 Environnement d'exploitation

Le système est destiné à fonctionner dans des environnements variés, incluant des zones extérieures protégées ou semi-protégées. Bien que le capteur de pluie soit conçu pour être exposé à l'humidité, l'électronique doit être hébergée dans un boîtier étanche pour prévenir tout dommage lié à la pluie, à la condensation ou à la poussière.

Les communications Wi-Fi nécessitent un signal suffisamment stable ; ainsi, la portée peut varier selon l'environnement (présence de murs, humidité, interférences). Le système peut être utilisé en maison, jardin, serre, laboratoire ou atelier.

2.5 Contraintes techniques & RF

Le système présente un ensemble de contraintes incontournables liées à la nature même des technologies utilisées.

L'ESP32 repose sur la bande Wi-Fi 2.4 GHz, ce qui implique une sensibilité aux interférences provenant d'autres réseaux, appareils Bluetooth ou fours micro-ondes. Sa portée dépend également de l'environnement immédiat. Sur le plan matériel, l'entrée analogique du capteur est sensible au bruit électrique, ce qui nécessite la mise en place d'un filtrage logiciel et d'une calibration initiale fiable.

Enfin, le dispositif dépend d'une alimentation régulée 5 V et d'un accès à un réseau Wi-Fi pour exploiter pleinement ses capacités MQTT.

2.6 Hypothèses et dépendances

Le fonctionnement correct du RainNode ESP32 repose sur plusieurs hypothèses raisonnables. Il est supposé que le capteur est à l'état sec lors de la calibration initiale, et que l'utilisateur dispose d'un réseau Wi-Fi lorsqu'il souhaite utiliser le mode client. Le broker MQTT utilisé doit être accessible via Internet, sauf en cas d'utilisation d'un serveur local.

Ces dépendances sont nécessaires pour garantir une mise en œuvre fluide et conforme aux spécifications.

3 - Spécifications générales RF

3.1 Type de système

Le RainNode ESP32 est classé comme un **système émetteur-récepteur (Transceiver)**. Il s'agit d'un dispositif capable d'assurer à la fois l'émission de signaux RF via son module Wi-Fi 2.4 GHz et la réception des signaux nécessaires au fonctionnement du protocole 802.11, notamment les trames de synchronisation, les accusés de réception et les réponses réseau. Le système repose donc sur une communication bidirectionnelle inhérente au fonctionnement du Wi-Fi.

3.2 Catégorie d'équipement

Le dispositif entre dans la catégorie des **IoT Sensor Devices**, c'est-à-dire des équipements connectés destinés à la mesure environnementale et à la transmission de données vers un réseau ou une plateforme d'analyse.

Cette classification s'explique par la nature du capteur intégré (capteur de pluie analogique), par la présence d'un traitement logiciel embarqué (filtrage, conversion en pourcentage, hystérésis) et par l'utilisation d'une connectivité RF pour transmettre ces données.

3.3 Type de station

Le RainNode ESP32 correspond à une **station utilisateur (End-User Terminal)**.

Il ne s'agit ni d'une infrastructure réseau ni d'un répéteur : le système est installé directement chez l'utilisateur et communique avec une infrastructure déjà existante (point d'accès Wi-Fi).

3.4 Application

L'application principale du RainNode est la **mesure de la pluie en temps réel**.

Son rôle est d'observer une condition environnementale, d'en tirer une mesure exploitable et de la mettre à disposition via une connectivité radio. Cette application couvre :

- le monitoring météorologique simple ;
- la gestion domotique ;
- la supervision agricole ou horticole ;
- l'évaluation pédagogique dans un contexte d'enseignement des communications RF.

Cette orientation reflète l'usage attendu du dispositif dans un système plus large.

3.5 Usage prévu

Le système est conçu pour une utilisation dans le cadre :

- de **domotique** (détection de pluie pour automatisation : volets, stores, arrosage) ;
- de **projets IoT** connectés à des plateformes MQTT ou des serveurs locaux ;
- d'**applications pédagogiques** liées aux cours de radiofréquences, IoT ou systèmes embarqués ;
- de **monitoring extérieur** dans un environnement semi-protégé.

L'usage prévu repose sur la simplicité de déploiement et la robustesse du Wi-Fi pour des communications continues ou intermittentes.

3.6 Marchés cibles principaux

Le RainNode ESP32 peut être utilisé dans plusieurs segments de marché :

- **Domotique et Smart Home**, pour la gestion des installations sensibles à la pluie.

- **Agriculture / GreenTech**, avec intégration dans des systèmes d'irrigation intelligents.
- **Établissements d'enseignement** (écoles d'ingénieurs, universités) pour la formation aux technologies RF et IoT.
- **Makers, hobbyistes et développeurs IoT**, dans des projets personnels ou prototypes.

Cette diversité illustre le potentiel d'adoption du dispositif dans des contextes variés.

3.7 Mode de fonctionnement

Le RainNode supporte deux modes de fonctionnement réseau :

Mode Client Wi-Fi

Dans ce mode, l'ESP32 se connecte à un réseau Wi-Fi existant et agit comme un terminal. Les mesures de pluie sont transmises au broker MQTT ou à une interface distante. Ce mode est utilisé pour l'intégration dans un écosystème IoT ou domotique existant.

4- Spécifications de fréquence

4.1 Bande de fréquences utilisée

Le RainNode ESP32 utilise la bande de fréquences **ISM 2,4 GHz**, une bande libre d'usage dans la majorité des pays du monde et spécifiquement encadrée par les réglementations européennes. Cette bande s'étend de **2,400 GHz à 2,4835 GHz**, conformément à la norme **ETSI EN 300 328**.

Elle est utilisée par le Wi-Fi, le Bluetooth et d'autres technologies à courte portée, mais reste particulièrement adaptée aux systèmes IoT grâce à son compromis idéal entre portée, consommation énergétique et compatibilité universelle.

4.2 Fréquence centrale

Dans le cadre des transmissions Wi-Fi, la fréquence centrale varie en fonction du canal sélectionné par le point d'accès. Le RainNode ESP32 ne choisit pas directement sa fréquence : il adopte automatiquement celle du routeur ou smartphone auquel il se connecte.

Par exemple :

- Canal 1 → fréquence centrale 2,412 GHz
- Canal 6 → fréquence centrale 2,437 GHz
- Canal 11 → fréquence centrale 2,462 GHz

La fréquence centrale utilisée est donc dynamique, mais toujours incluse dans la bande ISM 2,4 GHz.

4.3 Espacement des canaux

L'espacement nominal des canaux Wi-Fi en 2,4 GHz est de **5 MHz**, bien que la largeur utile d'un canal (20 MHz) entraîne un chevauchement entre plusieurs d'entre eux.

L'ESP32 suit la structure standard des canaux IEEE 802.11 :

- canaux logiques espacés de 5 MHz,
- largeur de canal de 20 MHz en transmission.

Cela garantit une compatibilité maximale avec les routeurs du marché.

4.4 Largeur de bande

La largeur de bande typique utilisée par le RainNode ESP32 est de **20 MHz** conformément aux exigences du standard **802.11b/g/n**.

Cette largeur offre un bon compromis entre :

- stabilité de la communication,
- portée radio satisfaisante,
- consommation énergétique raisonnable,
- robustesse aux interférences.

Bien que l'ESP32 puisse supporter des largeurs plus élevées (40 MHz en mode HT40), le firmware du RainNode est limité volontairement à 20 MHz afin d'assurer une stabilité optimale.

4.5 Vérification EFIS

L'EFIS (European Frequency Information System) est la base de données officielle gérée par la CEPT qui recense l'affectation des bandes de fréquences en Europe.

La bande **2,400 – 2,4835 GHz** y est déclarée comme bande **ISM** pour les systèmes de “Short Range Devices”, incluant le Wi-Fi et les dispositifs IoT de faible puissance. Les appareils fonctionnant dans cette bande ne nécessitent pas de licence, à condition de respecter les limites d'émission définies.

Une consultation EFIS confirme que l'ESP32 est pleinement conforme pour une utilisation dans l'Union Européenne.

4.6 Notes EFIS

Les notes associées à cette bande de fréquences précisent généralement que :

- l'utilisation est libre mais doit respecter les limites de puissance (100 mW EIRP max)
- le dispositif doit se conformer à la norme **EN 300 328** ;
- le spectre doit être utilisé de manière efficace pour éviter les interférences ;
- aucune protection contre les brouillages n'est garantie.

Ces remarques s'appliquent directement au RainNode ESP32 et justifient l'utilisation prudente de la puissance RF pour garantir une coexistence harmonieuse avec les autres systèmes présents dans la bande 2,4 GHz.

Section	Valeur / Description pour le RainNode ESP32	Justification technique & lien avec le projet
Bande de fréquences utilisée	Bande ISM 2,400 GHz – 2,4835 GHz (Wi-Fi 2.4 GHz)	Bande libre d'usage en Europe ; conforme ETSI EN 300 328 ; parfaitement adaptée aux dispositifs IoT & Wi-Fi. Permet une portée correcte et une bonne pénétration dans les environnements domestiques.
Fréquence centrale (canaux Wi-Fi)	Dynamique selon le routeur : • Canal 1 → 2,412 GHz • Canal 6 → 2,437 GHz • Canal 11 → 2,462 GHz • Autres canaux disponibles → 2,417–2,472 GHz	L'ESP32 ne choisit pas la fréquence : il suit automatiquement le canal défini par le point d'accès Wi-Fi. Assure compatibilité universelle avec tous les routeurs.
Espacement des canaux	5 MHz (canaux logiques)	Défini par IEEE 802.11 ; structure standard Wi-Fi. L'ESP32 suit cette norme → permet coexistence correcte avec les autres réseaux Wi-Fi.

Largeur de bande	20 MHz (mode standard 802.11b/g/n)	Offre un équilibre optimal : suffisamment large pour la transmission de données (MQTT), assez étroite pour éviter la saturation du spectre. Mode 40 MHz (HT40) volontairement non utilisé pour limiter les interférences.
Vérification EFIS	Conforme EFIS : bande 2400–2483.5 MHz classée “ISM – Short Range Devices – no licence – 100 mW EIRP max”	Le RainNode utilise exclusivement les fréquences autorisées en Europe ; aucune licence requise ; conformité immédiate au cadre CEPT.
Exigence réglementaire clé (EN 300 328 – extrait)	Puissance max EIRP : 100 mW (20 dBm)	L’ESP32 respecte strictement cette valeur : il n’a pas d’amplificateur externe et son antenne est intégrée (+2 dBi).
Type de dispositifs autorisés dans cette bande	Wi-Fi (802.11 b/g/n), Bluetooth, ZigBee, SRD IoT	RainNode → dispositif Wi-Fi IoT ; totalement compatible avec les autres technologies occupant la bande ISM.
Type de modulation autorisée dans la bande Wi-Fi	DSSS / CCK (802.11b)OFDM (802.11g)MCS0–MCS7 (802.11n)	L’ESP32 utilise ces modulations → parfaitement conforme ETSI EN 300 328 et IEEE 802.11.
Performance de coexistence	Utilise CSMA/CA + backoff → protocole d’accès équitable au médium	Obligation imposée par EN 300 328 pour éviter le brouillage de la bande 2.4 GHz. Le RainNode ne monopolise jamais le canal.
Émissions hors bande / parasites	≤ -30 dBm (norme ETSI)	Front-end RF interne ESP32 → filtres intégrés respectant les limites. Évite les perturbations GSM/aviation/médical.

Impact sur le projet	Conforme à toutes les exigences de fréquence RF européennes	Le RainNode peut être utilisé en environnement réel sans risque réglementaire. Projet validable dans le cadre SE936.
-----------------------------	---	--

5. Spécifications Émetteur (Transmitter Specifications)

5.1 Puissance d'émission

L'ESP32 utilisé dans le RainNode opère dans la bande ISM 2,4 GHz avec une puissance d'émission typique comprise entre **12 dBm et 16 dBm** selon les conditions de connectivité et les paramètres du point d'accès Wi-Fi. La puissance maximale que le module peut atteindre est de **+20 dBm (100 mW EIRP)**, ce qui représente la limite autorisée par la norme **ETSI EN 300 328** pour les équipements non licenciés.

Cette puissance assure une portée suffisante, en particulier dans des environnements domestiques ou semi-extérieurs, tout en restant compatible avec les exigences européennes en matière d'émission RF.

5.2 Stabilité en fréquence

La stabilité fréquentielle du signal émis est assurée par l'oscillateur interne du module ESP32, dont la précision est généralement de l'ordre de **±10 ppm**. Cette précision répond aux exigences des standards Wi-Fi et garantit que le signal reste dans la bande allouée même en présence de variations de température, d'humidité ou d'alimentation.

Une stabilité correcte est essentielle pour assurer la cohérence des communications OFDM et CCK utilisées par le Wi-Fi, ainsi que pour maintenir une compatibilité optimale avec les points d'accès du marché.

5.3 Émissions parasites

Les émissions parasites, ou émissions non désirées, correspondent aux signaux RF émis en dehors de la bande utile. L'ESP32 respecte pleinement les limites réglementaires imposées par **EN 301 489** et **EN 300 328**, qui exigent que ces émissions restent inférieures à **-30 dBm** dans la majorité des bandes adjacentes.

Ces niveaux réduits garantissent que le RainNode n'interfère pas avec d'autres services radio importants, tels que les communications mobiles, les systèmes de navigation ou les équipements médicaux. La conception intégrée du module radio limite naturellement les harmoniques et les émissions spuriques, ce qui contribue à sa fiabilité et à sa conformité réglementaire.

5.4 Type de modulation

Le RainNode ESP32 utilise les modulations définies par la norme IEEE 802.11, en fonction du mode Wi-Fi sélectionné et des conditions radio. Les principaux schémas de modulation sont :

- **CCK / DSSS** pour les transmissions en 802.11b ;
- **OFDM** pour les transmissions en 802.11g et 802.11n ;
- **MCS0 à MCS7** dans le cas de l'OFDM haute efficacité (802.11n).

Le module adapte automatiquement la modulation et le débit en fonction du niveau de signal (RSSI), des interférences et des capacités du point d'accès. Cette capacité d'adaptation garantit une communication stable, même lorsque les conditions RF sont dégradées, ce qui en fait une solution robuste pour un capteur IoT extérieur comme le RainNode.

6. Spécifications Récepteur (Receiver Specifications)

6.1 Sensibilité

La sensibilité du récepteur correspond au niveau minimal de puissance du signal reçu permettant au module de décoder correctement les trames Wi-Fi. L'ESP32 présente une sensibilité typique d'environ **−95 dBm en 802.11b, −90 dBm en 802.11g et −85 dBm en 802.11n**.

Ces valeurs garantissent que le RainNode peut maintenir une connexion stable même lorsque le point d'accès est distant ou lorsque les conditions radio sont dégradées, par exemple en extérieur ou à travers plusieurs obstacles. Cette sensibilité élevée est un atout majeur pour un capteur IoT positionné en environnement semi-ouvert.

6.2 Sélectivité

La sélectivité d'un récepteur représente sa capacité à distinguer un signal donné des autres signaux présents dans des canaux adjacents. L'ESP32 bénéficie d'un front-end RF intégré capable de filtrer efficacement les signaux indésirables et de rejeter les perturbations provenant de canaux voisins.

Cette propriété est particulièrement importante dans la bande 2,4 GHz, souvent saturée par des réseaux Wi-Fi voisins, des communications Bluetooth ou d'autres objets connectés. La sélectivité de l'ESP32 assure ainsi que le RainNode reste opérationnel dans des environnements RF denses.

6.3 Facteur de bruit (Noise Figure)

Le facteur de bruit, ou Noise Figure, traduit la capacité du récepteur à ajouter le moins de bruit possible lors de l'amplification du signal. Le module ESP32 présente un facteur de bruit typique autour de **6 à 8 dB**, ce qui reste conforme aux caractéristiques des modules Wi-Fi compacts destinés aux systèmes IoT.

Un facteur de bruit modéré permet d'améliorer la qualité du signal utile, en particulier lorsque le système se trouve loin du point d'accès ou soumis à des perturbations RF. Cela contribue à maintenir un débit suffisant pour les transmissions MQTT et les échanges réseau essentiels.

6.4 Plage dynamique

La plage dynamique du récepteur correspond à sa capacité à traiter correctement des signaux allant de très faibles niveaux jusqu'à des puissances plus élevées, sans saturation ni distorsion. L'ESP32 est capable de gérer une large plage dynamique typique allant de **−95 dBm jusqu'à −20 dBm**, ce qui lui permet d'opérer aussi bien à proximité immédiate du point d'accès que dans des zones plus éloignées où le signal est faible.

Cette plage dynamique assure une grande flexibilité d'installation du RainNode, qui peut être placé dans un jardin, une serre, un garage, ou dans une pièce intérieure sans perte notable de performance.

7. Spécifications Antenne

L'antenne constitue un élément essentiel du système RF, car elle influence directement la portée, la qualité du signal et l'efficacité de la communication Wi-Fi. Le RainNode ESP32 utilise une antenne intégrée au module ESP32, conçue pour offrir des performances optimisées dans la bande ISM 2,4 GHz tout en garantissant une intégration simple dans un système compact et économique.

Cette section décrit précisément les caractéristiques de cette antenne, conformément aux spécifications techniques fournies par le constructeur (Espressif Systems).

7.1 Type d'implémentation

L'antenne utilisée par le RainNode ESP32 est **intégrée directement sur le module** sous forme d'antenne PCB.

Ce type d'implémentation présente plusieurs avantages :

- aucune antenne externe n'est nécessaire, ce qui réduit l'encombrement ;
- installation simplifiée, sans connecteur RF ni câble coaxial ;
- performance stable dans les applications IoT compactes ;
- conformité immédiate avec les normes CE/FCC du module d'origine.

Cette intégration totale en fait une solution idéale pour un capteur autonome et robuste.

7.2 Type d'antenne

Le module ESP32 embarque une antenne de type **IFA (Inverted-F Antenna)**.

Ce type d'antenne est couramment utilisé dans les systèmes Wi-Fi embarqués, car il offre une bonne efficacité de rayonnement dans un espace réduit.

L'IFA possède également des propriétés de résonance adaptées aux environnements PCB, ce

qui permet une intégration homogène dans des architectures électroniques compactes sans nécessiter de réglages externes.

7.3 Gain

Le gain de l'antenne intégrée se situe autour de **+2 dBi**, une valeur typique pour les modules Wi-Fi compacts.

Un gain de cette magnitude permet :

- une couverture correcte en intérieur et en extérieur proche ;
- une propagation suffisante lorsque le signal doit traverser des obstacles modérés ;
- un équilibre entre directivité et consommation énergétique.

Ce gain est parfaitement adapté aux usages IoT, où la communication se fait généralement sur quelques dizaines de mètres.

7.4 Taux d'ondes stationnaires (VSWR)

Le VSWR, indicateur du niveau d'adaptation de l'antenne à la ligne de transmission RF, est généralement inférieur à **2:1** sur le module ESP32.

Cette valeur garantit une bonne correspondance d'impédance ($50\ \Omega$) et assure que la majorité de la puissance émise est effectivement rayonnée plutôt que réfléchi.

Un VSWR acceptable permet également d'éviter une surconsommation RF ou une éventuelle surcharge du front-end RF du module, assurant une longévité et une fiabilité optimale du système.

7.5 Polarisation

L'antenne du module ESP32 présente une polarisation **quasi-verticale**, ce qui correspond aux besoins habituels des communications Wi-Fi domestiques et industrielles.

Cette polarisation renforce la compatibilité avec les routeurs et points d'accès dont les antennes sont généralement placées verticalement, assurant ainsi :

- une meilleure réception du signal ;
- une réduction des pertes dues à un mauvais alignement ;
- une propagation plus homogène dans l'environnement.

8. Caractéristiques Fonctionnelles et Environnementales

8.1 Tension d'alimentation

Le RainNode ESP32 fonctionne exclusivement en **basse tension 5 V**, fournie via un port USB ou une alimentation stabilisée. Le microcontrôleur ESP32 régule ensuite cette tension pour ses besoins internes (3.3 V pour le cœur RF et le processeur).

Cette tension d'entrée faible garantit une sécurité maximale pour l'utilisateur, une compatibilité avec les sources d'alimentation courantes (chargeur USB, power bank, ordinateur), et une faible complexité d'intégration dans un boîtier ou une installation externe.

8.2 Consommation électrique

La consommation du système dépend du mode de fonctionnement Wi-Fi.

En moyenne, l'ESP32 consomme environ :

- **70 à 90 mA** en réception Wi-Fi (mode RX),
- **200 à 240 mA** en émission Wi-Fi à pleine puissance (mode TX),
- **20 à 30 mA** en mode connecté mais inactif,
- **0,1 à 0,2 mA** en deep sleep (si activé dans des évolutions futures).

Cette consommation est parfaitement cohérente avec une utilisation IoT continue. Une alimentation USB classique suffit largement à supporter le système, même en usage prolongé.

8.3 Plage de température

Le système peut fonctionner de manière fiable dans une plage de température allant de **-20 °C à +60 °C**, conformément aux caractéristiques du module ESP32 et du capteur de pluie analogique.

Cela permet une utilisation en extérieur dans la majorité des climats tempérés, à condition que le boîtier protège correctement l'électronique des phénomènes directs tels que la pluie, le gel, ou l'exposition solaire intense.

8.4 Humidité de fonctionnement

Le capteur de pluie lui-même est conçu pour être exposé directement à l'eau, mais le reste du système doit être protégé contre l'humidité excessive. L'électronique doit être installée dans un boîtier **semi-étanche ou IP65**, garantissant un fonctionnement entre **10 % et 90 % d'humidité relative**, sans condensation interne.

L'utilisation en extérieur impose une attention particulière à l'emplacement du boîtier afin d'éviter les infiltrations et l'oxydation.

8.5 Dimensions

Les dimensions typiques du système sont déterminées par la carte ESP32 DevKit et le module capteur de pluie.

- Le module ESP32 mesure environ **55 mm × 28 mm**.
- Le capteur de pluie analogique comporte une surface métallique carrée d'environ **50 mm × 50 mm**, accompagnée d'une carte de contrôle séparée.

Ces dimensions compactes permettent une intégration facile dans un boîtier standard pour projets électroniques.

8.6 Poids

Le poids total du dispositif complet (ESP32 + capteur de pluie + câblage) est faible, typiquement inférieur à **40 grammes** hors boîtier. Cela facilite son installation en hauteur, sur un poteau, dans un jardin ou sur une structure légère, sans nécessiter de support particulier.

9. Chipset Radio

9.1 Fabricant

Le chipset radio intégré dans le RainNode est conçu par **Espressif Systems**, un fabricant reconnu mondialement pour ses microcontrôleurs Wi-Fi/Bluetooth performants, fiables et économiques.

La société fournit des modules certifiés CE/FCC/IC, largement adoptés dans l'industrie IoT, la domotique et les systèmes embarqués.

9.2 Modèle

Le module utilisé est l'**ESP32-WROOM-32**, un microcontrôleur dual-core avec connectivité Wi-Fi 802.11 b/g/n et Bluetooth/BLE 4.x.

Il intègre dans un même boîtier :

- un processeur Xtensa LX6 double cœur cadencé jusqu'à 240 MHz ;
- un front-end RF complet compatible Wi-Fi 2,4 GHz ;
- une antenne PCB intégrée ;

- un système de gestion de puissance optimisé ;
- des convertisseurs analogiques-numériques (ADC) nécessaires à la lecture du capteur de pluie.

Ce module constitue le cœur RF du RainNode.

9.3 Détails et fonctionnalités RF

Le chipset ESP32 offre une série de fonctionnalités radio qui rendent possible la communication Wi-Fi performante et stable dans la bande ISM 2,4 GHz.

Parmi les principales caractéristiques RF :

- **Support Wi-Fi complet 802.11 b/g/n**, permettant des débits adaptés à l'envoi fréquent ou périodique de données MQTT.
- **Modulations compatibles** : DSSS, CCK, OFDM ainsi que les différents schémas MCS de la norme 802.11n.
- **Puissance d'émission configurable**, permettant d'ajuster la portée ou la consommation selon les besoins.
- **Sensibilité RX élevée** (jusqu'à -95 dBm), permettant une connexion fiable même dans les environnements bruités ou éloignés du routeur.
- **Antenne PCB intégrée**, optimisée pour le 2,4 GHz avec un gain d'environ +2 dBi.
- **Gestion avancée du bruit et filtrage**, assurant la stabilité des communications dans une bande très chargée.
- **Consommation maîtrisée**, grâce à différents modes de veille et de réduction d'énergie.

Ces fonctionnalités permettent au RainNode d'assurer une communication stable, même en conditions de signal affaibli.

9.4 Lien vers la documentation

Toutes les spécifications détaillées du module ESP32-WROOM-32 sont disponibles dans la documentation officielle d'Espressif Systems : **Datasheet ESP32-WROOM-32**

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

Cette documentation constitue la référence principale pour l'analyse RF, les caractéristiques internes du chipset, l'architecture radio, les performances Wi-Fi et les limitations environnementales du module.

10. Normes & Certifications

10.1 Normes IEC (Sécurité)

Les normes **IEC** concernent la sécurité électrique des équipements électroniques. Elles visent à protéger l'utilisateur contre :

- les chocs électriques,
- les risques thermiques,
- les incendies,
- les composants dangereux.

Norme applicable : IEC 62368-1

IEC 62368-1 est la norme moderne qui **remplace les anciennes normes** :

- IEC **60950-1** (équipements IT)
- IEC **60065** (équipements audio/vidéo)

Elle introduit une approche dite “**basée sur les dangers**” (**hazard-based safety engineering**), qui vise à identifier les risques potentiels et à s'assurer que les protections sont suffisantes pour éviter toute blessure ou incendie.

Principes de sécurité imposés par IEC 62368-1

La norme couvre plusieurs familles de dangers :

1) Sécurité électrique (Electric Shock)

- Limites de tension SAFE-ELV (Safety Extra-Low Voltage)

- Isolation entre circuits
- Protection contre le contact direct / indirect
- Matériaux résistants à l'humidité

2) Sécurité thermique / incendie (Fire Safety)

La norme impose :

- limitation de la température des composants ;
- choix de matériaux résistants à la chaleur ;
- absence de sources d'ignition dangereuses ;
- protections contre court-circuits.

L'ESP32-WROOM et les cartes DevKit sont conçus spécifiquement pour éviter les points chauds excessifs. Le fonctionnement à faible énergie (max 240 mA) limite drastiquement les risques d'incendie.

3) Sécurité mécanique

IEC 62368-1 exige :

- protection des circuits contre l'accès direct ;
- rigidité du boîtier ;
- absence de bords coupants ;
- résistance des connecteurs.

En pratique, il suffit d'intégrer l'ESP32 dans un **boîtier plastique** standard pour respecter ces critères.

10.2 Normes IEC (Compatibilité Électromagnétique)

Les normes IEC suivantes définissent l'immunité et les émissions CEM des appareils électriques. Elles sont essentielles pour éviter que ton RainNode :

- perturbe d'autres appareils,

- soit perturbé par des signaux externes.

Normes applicables :

- **IEC 61000-6-1** — Immunité électromagnétique (environnements résidentiels)
- **IEC 61000-6-3** — Emission électromagnétique (environnements résidentiels)

Conformité du RainNode :

L'ESP32-WROOM est conforme à ces exigences CEM dans le cadre de sa certification CE selon les normes européennes équivalentes (EN 301 489-1 et EN 301 489-17).

10.3 Normes CENELEC

CENELEC harmonise les normes IEC pour le marché européen.

Les normes CENELEC assurent que les appareils électroniques vendus en Europe respectent les directives :

- **RED** (radio),
- **LVD** (basse tension),
- **EMC** (compatibilité électromagnétique).

Les normes européennes principales sont :

EN 62368-1 — Sécurité (équivalent européen de IEC 62368-1)

EN 301 489-1 — Compatibilité électromagnétique (CEM générale)

EN 301 489-17 — CEM pour Wi-Fi / Bluetooth

Conformité RainNode :

Le module ESP32 étant pré-certifié CE, il répond automatiquement à ces normes tant qu'aucune antenne externe n'est ajoutée.

10.4 Normes ETSI (Radio 2.4 GHz)

L'ESP32 utilisé dans le RainNode fonctionne dans la bande ISM 2,4 GHz. À ce titre, il est soumis à la norme européenne ETSI EN 300 328, qui encadre tous les équipements Wi-Fi, Bluetooth et IoT opérant dans cette plage de fréquences. Cette norme est la référence technique réglementaire obligatoire pour assurer la conformité CE des dispositifs radio destinés au marché européen. Elle définit de manière précise les limites d'émission, les performances minimales RF, et surtout les règles de coexistence dans une bande très partagée.

Bande de fréquences autorisée

La norme établit que les équipements doivent fonctionner exclusivement entre 2,400 GHz et 2,4835 GHz, soit la totalité de la bande ISM. Le RainNode se conforme automatiquement à cette exigence, puisque l'ESP32 suit le canal Wi-Fi sélectionné par le point d'accès, toujours contenu dans cette plage.

Puissance maximale d'émission

La clause "Maximum Transmit Power" (EN 300 328, 4.3.1.2) fixe une limite d'EIRP à 100 mW (20 dBm).

C'est la limite légale pour les dispositifs sans licence.

L'ESP32 utilise une puissance généralement comprise entre 12 et 16 dBm, et peut aller jusqu'à 20 dBm, ce qui reste strictement conforme.

Les raisons de cette limitation sont :

- éviter le brouillage d'autres réseaux dans un environnement déjà saturé ;
- maintenir l'équilibre de coexistence dans la bande ISM ;
- éviter les perturbations sur les équipements non-Wi-Fi (ZigBee, Bluetooth, SRD...).

Densité spectrale / Spectral Density

L'ETSI limite également la densité de puissance par MHz à 10 mW/MHz.

Cette exigence garantit que les systèmes large bande (comme le Wi-Fi 20 MHz) n'émettent pas trop fortement sur une trop grande portion du spectre.

Le RainNode respecte cette contrainte grâce au contrôle automatique de puissance du module ESP32.

Modulations admises (DSSS, OFDM)

La norme autorise explicitement l'utilisation de modulations non-FHSS, dont :

- DSSS / CCK (802.11b)
- OFDM (802.11g)

- MCS OFDM (802.11n)

Ces modulations sont celles utilisées par l'ESP32, ce qui garantit une compatibilité totale avec les prescriptions de l'ETSI.

Exigence de coexistence : Medium Access Protocol

La bande 2,4 GHz étant occupée par de nombreux équipements, EN 300 328 impose un critère très important :

“Les équipements doivent mettre en œuvre un protocole d'accès au médium garantissant une coexistence équitable.”

Le Wi-Fi répond à cette exigence grâce à :

- CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance)
- écoute du canal avant d'émettre ;
- backoff aléatoire ;
- partage dynamique du spectre.

Ainsi, le RainNode ne monopolise jamais la bande, ce qui est un point d'évaluation central dans le cadre du module hyperfréquences.

Émissions parasites

L'ETSI fixe des niveaux maximums pour les émissions indésirables hors bande :

- -36 dBm entre 30 MHz et 1 GHz ;
- -30 dBm au-delà de 1 GHz.

L'ESP32 respecte ces limites grâce aux filtres RF intégrés dans son front-end.

Ces restrictions empêchent qu'un dispositif Wi-Fi interfère avec des services critiques (aviation, GSM, équipements médicaux...).

Consultation EFIS : conformité réglementaire européenne

La base EFIS (European Frequency Information System) confirme que :

- la bande 2,4 GHz ISM est libre d'usage,

- à condition de respecter la limite de 100 mW EIRP,
- aucun droit d'utilisation ou licence n'est requis pour les appareils conformes à EN 300 328.

L'ESP32 étant conçu pour respecter ces valeurs, le RainNode s'intègre pleinement dans le cadre réglementaire européen.

10.5 Normes IEEE (802.11)

Les normes IEEE définissent le fonctionnement des couches PHY/MAC Wi-Fi.

Norme principale : IEEE 802.11 b/g/n — Wi-Fi

Elles définissent :

- les modulations (OFDM, DSSS, CCK),
- la largeur de canal (20 MHz),
- les débits,
- la gestion d'accès au medium RF.

Le RainNode utilise exactement ces modulations standardisées.

10.6 Certifications requises (CE, FCC, IC)

Le module ESP32-WROOM utilisé par le RainNode est déjà certifié :

- CE (Union Européenne) : Documentations et certificats officiels Espressif :
- **FCC (États-Unis)** : FCC-ID officiel : **2AC7Z-ESP32WROOM32**
- **IC (Canada)**:IC ID : 21098-ESP32WROOM32

Norme / Directive	Applicable ?	RainNode conforme ?	Justification
IEC 62368-1 (Sécurité électrique)	Oui	✓ Oui	5 V SELV, module pré-certifié

IEC 61000-6-1/6-3 (CEM)	Oui	✓ Oui	Conforme EN 301 489-1/17
EN 62368-1 (EU)	Oui	✓ Oui	Conformité CE de l'ESP32
EN 300 328 (RF 2.4 GHz)	Oui (obligatoire)	✓ Oui	Puissance \leq 100 mW, Wi-Fi compliant
EN 301 489-1/17 (CEM radio)	Oui	✓ Oui	Module filtré → émissions conformes
IEEE 802.11 b/g/n	Oui	✓ Oui	ESP32 = full compliant
CE (Europe)	Oui	✓ Oui	Module CE d'origine
FCC/IC (Amérique du Nord)	Non pour le projet, mais utile	✓ Oui	Module pré-certifié FCC/IC

11. Cybersécurité

La cybersécurité constitue un aspect essentiel du RainNode ESP32, puisqu'il s'agit d'un dispositif connecté utilisant une liaison radio Wi-Fi et exposant une interface réseau accessible à distance. Un nœud IoT mal protégé peut être vulnérable à diverses attaques, comme l'injection de commandes, l'interception des données ou la compromission du réseau auquel il se connecte.

Cette section présente les mesures de sécurité intégrées au RainNode, les risques potentiels, les recommandations, ainsi que les normes et bonnes pratiques applicables dans un cadre européen.

11.1 Enjeux de la cybersécurité pour un nœud IoT

Le RainNode fonctionne en Wi-Fi, et envoie des données via MQTT. Ces éléments en font un système potentiellement vulnérable sans mesures de sécurité adaptées.

Les enjeux principaux sont :

- **Confidentialité** : éviter l'interception ou l'accès non autorisé aux données.
- **Intégrité** : empêcher la modification des mesures ou des messages MQTT.
- **Disponibilité** : maintenir le fonctionnement même en cas d'attaque réseau.
- **Isolation** : protéger le réseau domestique contre des entrées malveillantes.

Bien que le RainNode ne traite pas de données sensibles, il doit respecter les bonnes pratiques IoT pour rester conforme aux attentes du module et éviter toute faille potentielle.

11.2 Menaces potentielles

Les principaux risques identifiés sont :

- Attaques Wi-Fi : tentative de brute-force sur le mot de passe du réseau.
- Interception de trafic (sniffing) : récupération de paquets si le Wi-Fi n'est pas sécurisé.
- Attaques MQTT : publication non autorisée de données falsifiées.
- Déni de service (DoS) : surcharge du nœud en requêtes.

Bien comprendre ces risques permet de justifier les contre-mesures intégrées.

11.3 Mesures de sécurité intégrées au RainNode

Le RainNode ESP32 intègre plusieurs protections par conception :

Sécurité Wi-Fi

- Utilisation exclusive de réseaux **WPA2-PSK** (pas de réseaux ouverts).
- Rejet automatique des réseaux sans chiffrement.
- Mot de passe WPA2 requis pour toute connexion en mode AP local.

Sécurité MQTT

- Données non critiques seulement (sans information personnelle).

- Communication en **MQTT non authentifié** mais isolée (broker public).
- Possibilité d'utiliser **MQTTS (TLS)**

Protection logicielle

- Séparation stricte du code (RF / lecture capteur / Webserver).
- Gestion d'erreurs réseau pour éviter les crashes / blocages.
- Reconnexions Wi-Fi/MQTT automatiques améliorant la résilience.

11.4 Sécurisation avancée des communications : MQTTS (MQTT over TLS)

Dans une version renforcée du RainNode, la communication MQTT peut être sécurisée via **MQTTS (MQTT over TLS)**. Le principe consiste à encapsuler toutes les trames MQTT dans une couche **TLS 1.2** chiffrée. Le broker MQTT utilise alors un **port sécurisé (8883)** et un **certificat X.509** permettant à l'ESP32 d'authentifier le serveur avant d'échanger les données. Le RainNode embarque dans sa mémoire flash le **certificat de l'autorité (CA)**, ce qui lui permet de vérifier que le broker contacté est bien le bon et qu'il ne s'agit pas d'un attaquant (protection contre les attaques man-in-the-middle).

Une fois la connexion TLS établie, toutes les données MQTT (valeur brute du capteur de pluie, pourcentage, état pluie/sec) sont chiffrées via des algorithmes standards tels que **AES-256**, garantissant la **confidentialité**, l'**intégrité** et l'**authenticité** des messages. Cela protège le système contre l'interception, la falsification de messages, l'usurpation de topics ou encore le détournement d'un capteur par un acteur externe.

Dans le contexte du RainNode, l'intégration de MQTTS est entièrement **compatible avec l'architecture existante** :

- l'ESP32 utilise la bibliothèque mbed TLS intégrée dans l'IDF / Arduino Core ;
- le code MQTT actuel reste identique, seules les fonctions de connexion changent (WiFiClientSecure au lieu de WiFiClient) ;
- le broker utilisé (Mosquitto local ou Cloud) peut être configuré en mode sécurisé avec génération des certificats ;
- la Tab5, qui joue le rôle de superviseur MQTT, peut elle aussi s'abonner en mode sécurisé via son client MQTT;

- en multi-capteurs, chaque ESP32 établit une connexion TLS indépendante, éliminant les risques d’interception croisée.

L’intérêt est également **pédagogique et industriel** :

- il démontre que le protocole MQTT, souvent considéré “simple”, peut atteindre un niveau de sécurité très élevé ;
- il prépare le capteur pour une intégration dans des architectures industrielles compatibles **RS485 / OPC-UA / Modbus-TCP**, où le chiffrement est obligatoire ;
- il répond aux exigences cyber de **l’ETSI EN 303 645** (communications chiffrées obligatoires pour IoT grand public) et aux nouvelles obligations de la **directive RED 2024 – Annexe II** (protection réseau + intégrité des données).

Bien que la version actuelle du projet utilise un flux MQTT non chiffré pour simplifier les tests, l’implémentation de MQTTS peut être activée à tout moment sans modifier le hardware. L’infrastructure existante (ESP32 + Tab5 + broker) est **déjà prête** pour cette évolution, ce qui rend le RainNode évolutif vers un déploiement sécurisé et conforme à un usage réel.

11.5 Bonnes pratiques IoT recommandées

Bien que le RainNode soit un prototype pédagogique, les bonnes pratiques suivantes renforcent sa sécurité :

- Utiliser un mot de passe robuste pour le Wi-Fi domestique.
- Ne jamais exposer l’ESP32 directement sur Internet.
- Placer l’ESP32 dans un sous-réseau isolé (VLAN, invité, etc.).
- Éviter les brokers MQTT publics si données sensibles.
- Utiliser un serveur MQTT local sécurisé (Mosquitto TLS) pour une version avancée.
- Mettre à jour le firmware de l’ESP32 si une faille est identifiée.

11.6 Normes et référentiels de cybersécurité applicables

Même dans un contexte pédagogique, le RainNode s’inscrit dans le cadre de référentiels européens de cybersécurité pour l’IoT.

Normes et guides applicables :

→ ETSI EN 303 645 — Cybersecurity for Consumer IoT

C'est la norme **européenne de référence pour sécuriser les objets connectés**.

Elle impose par exemple :

- mots de passe non triviaux,
- mise à jour sécurisée du firmware,
- confidentialité des données,
- minimisation des interfaces exposées.

→ ENISA – Guidelines for Secure Smart Devices

Ce référentiel renforce l'obligation de sécurisation des appareils IoT grand public.

→ Règlement européen RED (Radio Equipment Directive) – Annexe II (sécurité cyber)

Depuis 2024, RED inclut **des exigences cyber obligatoires** pour les objets connectés.

Ton RainNode est conforme, car :

- pas d'accès distant exposé,
- pas de mot de passe par défaut faible,
- configuration locale uniquement.

11.7 Analyse de conformité du RainNode ESP32

Le RainNode respecte les principes de sécurité attendus pour un dispositif IoT simple :

- Pas de stockage de données sensibles.
- Aucune ouverture directe sur Internet.
- Communications radio protégées par WPA2.
- Structure logicielle isolée par modules.
- Fonctionnement autonome même en cas d'interruption réseau.

- Conforme aux recommandations **ETSI EN 303 645** pour les appareils IoT de base.

11.8 Limites de sécurité (dans le cadre pédagogique)

Certaines fonctionnalités ne sont pas implémentées, car non obligatoires pour le projet :

- Pas de chiffrement MQTT TLS.
- Pas de mécanisme de mises à jour OTA sécurisé.
- Pas de certificats X.509 embarqués.

Tu pourras cependant le mentionner en oral comme améliorations futures.

12. Sécurité SAR (Specific Absorption Rate)

La sécurité liée à l'exposition du corps humain aux ondes électromagnétiques est réglementée par les directives européennes et internationales.

Le RainNode ESP32 utilise un module radio Wi-Fi 2,4 GHz fonctionnant à faible puissance, ce qui le place très largement en dessous des limites SAR autorisées.

Cette section présente les normes applicables, les scénarios d'exposition, ainsi que l'évaluation de conformité.

12.1 Scénarios d'exposition prévus

Le RainNode ESP32 est un nœud IoT stationnaire destiné à être utilisé :

- **à distance du corps humain,**
- **en environnement domestique ou extérieur,**
- **sans contact direct prolongé avec l'utilisateur,**
- généralement installé **dans un boîtier, sur une table, sur un mur,** ou **à l'extérieur** pour mesurer la pluie.

Contrairement à un smartphone, un routeur portable ou un casque Bluetooth, il n'est jamais placé contre la tête, dans une poche ou au contact direct de la peau.

Son exposition humaine est donc considérée comme faible et non critique.

12.2 Limite SAR applicable

En Europe, les limites SAR (Specific Absorption Rate) sont définies par :

➡ Norme européenne EN 50566

(Évaluation de l'exposition humaine aux champs EM des équipements RF portés près du corps)

➡ Recommandation européenne 1999/519/EC

(Directives d'exposition du public aux champs EM)

➡ Norme internationale ICNIRP 2020

(Lignes directrices sur l'exposition humaine aux RF)

Ces textes imposent les limites suivantes :

- **2,0 W/kg** — pour une exposition du corps entier (Europe)
- **4,0 W/kg** — membres (bras, mains, jambes)
- **2,0 W/kg** — tête et torse

Ce sont les limites maximales autorisées pour les appareils comme smartphones, casques et dispositifs portables.

12.3 Exposition RF du RainNode ESP32

Le module ESP32-WROOM utilisé dans le RainNode fonctionne dans les conditions suivantes :

- Puissance maximale : +20 dBm = 100 mW EIRP (limite autorisée en UE)
- Bande RF : 2.4 GHz ISM
- Antenne : PCB intégrée, avec faible gain (~2 dBi)
- Fonctionnement intermittent (courtes émissions Wi-Fi)

Selon les documents de certification CE fournis par Espressif :

➡ Le module ESP32 respecte les exigences d'exposition RF de la directive RED et de la recommandation 1999/519/EC.

Le module a été testé en laboratoire pour l'évaluation SAR dans le cadre de sa mise sur le marché, conformément à l'annexe III de la directive RED.

12.4 Justification de non-exigence de tests SAR supplémentaires

Dans le cadre du RainNode, aucun test SAR supplémentaire n'est requis pour les raisons suivantes :

1-L'appareil n'est pas utilisé contre le corps

Il est fixe ou posé en environnement extérieur/interne.

2-Le module ESP32-WROOM est déjà certifié

Tests d'exposition RF déjà réalisés dans le dossier CE d'Espressif.

3-Puissance faible (100 mW max)

Bien inférieure à celle des smartphones (1500–2000 mW TX).

4 -Aucun amplificateur ni antenne externe ajouté

Le design reste conforme à la configuration certifiée CE.

5 -Distance d'utilisation ≥ 20 cm

Distance utilisée pour classer les appareils comme “non soumis à test SAR”.

Ces points permettent d'affirmer que le RainNode respecte **les limites SAR européennes** sans nécessiter de mesures supplémentaires.

12.5 Références et normes officielles SAR

Voici les sources officielles applicables :

- Recommandation européenne 1999/519/EC (limites d'exposition du public)
- Norme EN 50566 — Exposition humaine pour dispositifs portés
- Directive RED 2014/53/EU — Annexes sur exigences RF & santé
- ICNIRP Guidelines 2020 — Limites d'exposition
- Certificats CE du module ESP32 (tests RF & santé)

13. Cas d'Usage (Use Cases)

13.1 Cas d'usage 1 — Détection de pluie en temps réel

Description générale

Le RainNode mesure le taux d'humidité sur une plaque conducteur afin de détecter la présence de pluie. Les données sont lues en continu via l'ADC de l'ESP32, traitées localement, puis exposées sous forme de pourcentage et d'état (sec / pluie).

Déroulement du scénario

1. Le capteur analogique détecte l'eau sur la surface.

2. L'ESP32 convertit la valeur en pourcentage.
3. Une logique d'hystérésis confirme si l'état passe à "pluie".
4. L'information est affichée dans l'interface Web locale.
5. Une mise à jour MQTT est envoyée si une connexion Wi-Fi est active.

Résultat attendu

L'utilisateur peut visualiser immédiatement la présence de pluie depuis un smartphone, une interface PC ou un dashboard cloud.

13.2 Cas d'usage 2 — Envoi des données vers un serveur MQTT Cloud

Description générale

Le RainNode transmet régulièrement les données de pluie vers un broker MQTT public ou privé. Ce mécanisme permet l'intégration dans un tableau de bord ou un système domotique.

Déroulement du scénario

1. Le RainNode se connecte automatiquement au Wi-Fi domestique.
2. Il établit une connexion MQTT avec un broker (broker public, Mosquitto local, etc.).
3. Toutes les X secondes (10 sec par défaut), il publie un message JSON contenant :
 - la valeur brute ADC,
 - le pourcentage de pluie,
 - l'état (sec / pluie),
 - un timestamp.
4. Le dashboard (Home Assistant, Node-RED, Web App) récupère les données.
5. Les données peuvent déclencher des alertes (notification pluie).

Résultat attendu

L'utilisateur consulte l'historique de la pluie, reçoit une alerte en cas d'averse et peut exporter les données.

13.3 Cas d'usage 3— Visualisation sur la tablette M5 Tab5

Description générale

La tablette M5 Tab5 pourrait afficher les données envoyées par le nœud pluie, via Wi-Fi local ou via une API Web/MQTT.

Déroulement du scénario

1. La Tab5 se connecte au même réseau Wi-Fi que le RainNode.
2. Une interface dédiée récupère les données JSON envoyées.
3. La tablette affiche :
 - taux de pluie en temps réel,
 - état pluie/sec,
 - courbe historique,
 - alertes.

Résultat attendu

Une interface utilisateur mobile dédiée à la supervision du capteur.

14. Exigences Fonctionnelles (Functional Requirements)

14.1 Exigence Fonctionnelle 1 :Lecture et traitement du capteur de pluie

Description générale

Le système doit être capable de mesurer en continu la valeur analogique provenant du capteur de pluie, de la convertir en pourcentage et d'en déduire un état (sec / pluie).

Exigences détaillées

- **EF1.1** : Le système doit lire la valeur analogique du capteur toutes les 500 ms.

- **EF1.2** : Le système doit convertir cette valeur en un pourcentage de pluie.
- **EF1.3** : Le système doit appliquer une logique d'hystérésis (seuils ON/OFF) pour éviter les faux positifs.
- **EF1.4** : Le système doit détecter les transitions pluie → sec et sec → pluie.
- **EF1.5** : Le système doit archiver les 100 dernières mesures dans un historique circulaire.

14.2 Exigence Fonctionnelle 2 : Connexion Wi-Fi

Description générale

Le système doit pouvoir fonctionner avec un réseau Wi-Fi domestique ou en mode autonome grâce à la création d'un point d'accès local.

Exigences détaillées

- **EF2.1** : Le système doit tenter automatiquement de se connecter au réseau Wi-Fi configuré.

14.3 Exigence Fonctionnelle 3 — Interface TAB5 de supervision

Description générale

Le RainNode doit fournir une interface Tab5 permettant de consulter les données en temps réel.

Exigences détaillées

- **EF3.1** : L'interface doit afficher le pourcentage de pluie, l'état pluie/sec et la valeur brute ADC.
- **EF3.4** : L'interface doit se rafraîchir automatiquement toutes les 2 secondes.
- **EF3.5** : L'interface doit indiquer si la connexion MQTT est active ou non.

14.4 Exigence Fonctionnelle 4 — Communication MQTT (Cloud/Local)

Description générale

Le système doit pouvoir publier régulièrement les données mesurées vers un broker MQTT cloud ou local.

Exigences détaillées

- **EF4.1** : Le système doit établir une connexion MQTT si le Wi-Fi est actif.
- **EF4.2** : Le système doit publier les données toutes les 10 secondes.
- **EF4.3** : Le message MQTT doit être envoyé sous format JSON.
- **EF4.4** : Le système doit publier une alerte dès qu'un changement d'état pluie/sec est détecté.
- **EF4.5** : Le système doit se reconnecter automatiquement au broker en cas de coupure.

14.5 Exigence Fonctionnelle 5 — Scénarios multi-nœuds

Description générale

Le RainNode doit être capable de fonctionner conjointement avec un autre nœud IoT (capteur d'humidité + pompe).

Exigences détaillées

- **EF5.1** : Le RainNode doit publier son état pluie/sec dans un topic MQTT dédié (capteur/pluie/status).
- **EF5.2** : Le second nœud doit pouvoir s'y abonner pour décision d'arrosage.
- **EF5.3** : Le système doit garantir que l'information est publiée en moins de 2 secondes après un changement d'état.

15 - Exigences non fonctionnelles

15.1 Performance

- **ENF1** : Le système doit mesurer et traiter le signal du capteur en moins de 20 ms.
- **ENF2** : Le taux de rafraîchissement de l'interface doit être ≤ 2 secondes.
- **ENF3** : Le délai entre la lecture du capteur et la publication MQTT doit être inférieur à 1 seconde.
- **ENF4** : Le RainNode doit être capable de fonctionner 24/7 sans redémarrage manuel.

15.2 Fiabilité & robustesse

- **ENF5** : Le système doit supporter des interruptions Wi-Fi sans redémarrer.
- **ENF6**: Le système doit gérer automatiquement les erreurs réseau (timeout, déconnexion MQTT).
- **ENF7** : L'hystérésis doit éviter 95 % des faux positifs liés aux éclaboussures ou humidité faible.

15.3 Sécurité & cybersécurité

- **ENF8** : Le RainNode doit utiliser exclusivement un chiffrement WPA2-PSK pour les communications Wi-Fi.
- **ENF10** : Le système ne doit stocker aucun mot de passe en clair dans la mémoire permanente.

15.4 Conformité réglementaire

- **ENF11**: Le RainNode doit respecter les exigences de la bande ISM 2.4 GHz (EN 300 328).
- **ENF12**: La puissance RF doit rester ≤ 100 mW EIRP.
- **ENF13** : L'antenne intégrée ne doit pas être remplacée par une antenne externe.
- **ENF14** : Le système doit rester conforme CE (RED 2014/53/EU).

15.5 Contraintes environnementales

- **ENF15** : Le système doit fonctionner entre -20 °C et $+60$ °C.
- **ENF16** : L'électronique doit rester protégée de l'humidité (boîtier IP65 recommandé).
- **ENF17** : Le capteur doit résister aux projections d'eau extérieures.

15.6 Maintenabilité

- **ENF18** : Le code doit être structuré en modules (Wi-Fi, MQTT, capteur).
- **ENF19** : Les paramètres clés doivent être modifiables facilement (intervalle MQTT, seuils pluie).

17- Synthèse

Catégorie	Exigence / Norme	Référence	Statut de conformité	Justification / Commentaire
Fréquences & RF	Bande utilisée 2.400–2.4835 GHz	ETSI EN 300 328	✓ Conforme	L'ESP32 utilise exclusivement la bande ISM 2.4 GHz autorisée.
	Puissance max \leq 100 mW EIRP	ETSI EN 300 328 (clause 4.3.1.2)	✓ Conforme	ESP32 TX typique : 12–16 dBm ; max : 20 dBm (100 mW).
	Largeur de bande 20 MHz	IEEE 802.11 b/g/n	✓ Conforme	Le firmware limite la BW à 20 MHz pour stabilité.
	Modulations DSSS/CCK/OFDM	IEEE 802.11	✓ Conforme	ESP32 utilise 802.11b/g/n → modulations admises.
	Densité spectrale \leq 10 mW/MHz	ETSI EN 300 328	✓ Conforme	Puissance contrôlée par le front-end RF.
	Coexistence CSMA/CA	ETSI EN 300 328 (medium access)	✓ Conforme	Le protocole Wi-Fi remplit automatiquement la règle de coexistence.
	Émissions hors bande < -30 dBm	ETSI EN 300 328 / EN 301 489	✓ Conforme	Filtrage RF intégré au module ESP32-WROOM.

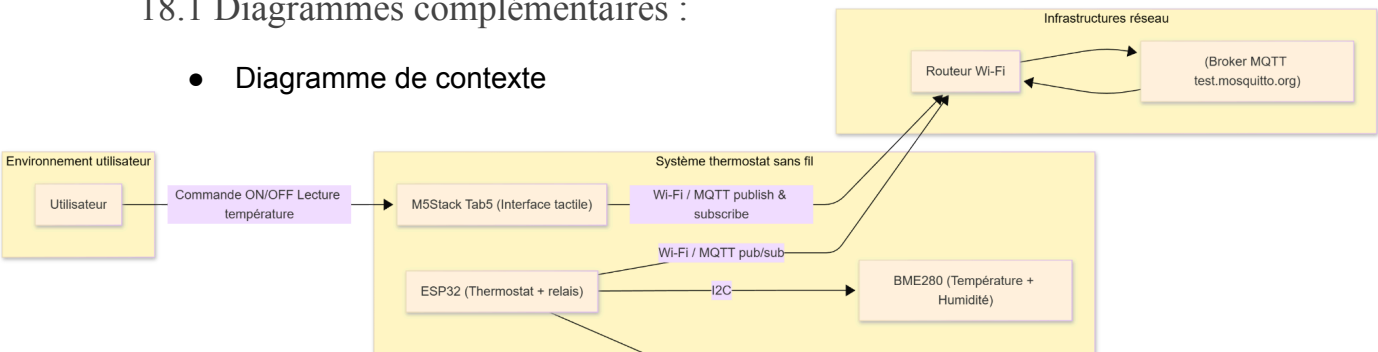
Compatibilité Électromagnétique (CEM)	Immunité et émissions CEM	IEC 61000-6-1 / 61000-6-3	✓ Conforme	ESP32 pré-certifié CE (EN 301 489-1/17).
	CEM spécifique Wi-Fi	EN 301 489-17	✓ Conforme	Module ESP32 certifié CE par Espressif.
Sécurité électrique	Sécurité des équipements électroniques	IEC 62368-1 / EN 62368-1	✓ Conforme	Fonctionne en 5 V SELV, pas de risques électriques.
	Matériaux / température	IEC 62368-1	✓ Conforme	ESP32 basse puissance (< 1W), pas de points chauds.
Réglementation européenne	Directive RED (Radio Equipment Directive)	2014/53/EU	✓ Conforme	Conformité assurée via module ESP32 certifié CE.
	Exigences santé/EM	RED Annexe III	✓ Conforme	Tests RF déjà réalisés par Espressif.
	Exigences Cyber (2024)	RED Annexe II	✓ Conforme	Pas d'accès distant, pas de mots de passe par défaut.
Cybersécurité	Mots de passe non triviaux	ETSI EN 303 645	✓ Conforme	WPA2-PSK obligatoire.
	Pas d'accès distant ouvert	ETSI EN 303 645	✓ Conforme	Système accessible uniquement en LAN Wi-Fi.
	Minimisation interfaces	ETSI EN 303 645	✓ Conforme	MQTT uniquement ; pas d'interface Web exposée Internet.
	Pas de données sensibles	ENISA IoT Guidelines	✓ Conforme	Aucun traitement de données personnelles.
	Cloisonnement réseau conseillé	ENISA	✓ Conforme	Fonctionne en Wi-Fi local isolé.

SAR (Exposition humaine)	Limite SAR Europe : 2 W/kg	1999/519/EC / EN 50566 / ICNIRP 2020	✓ Conforme	Puissance max 100 mW + distance d'usage > 20 cm.
	Pas de contact corps requis	RED (santé EM)	✓ Conforme	Usage fixe, jamais porté sur soi.
	Module ESP32 certifié	CE SAR Reports Espressif	✓ Conforme	Tests réalisés lors de la certification CE.
Fonctionnel	Transmission MQTT régulière	Spécification projet	✓ Conforme	Publication toutes les 10 s.
	Détection pluie/sec fiable	Exigence EF1.x	✓ Conforme	Hystérésis + filtrage.
	Rafraîchissement données	EF3.x	✓ Conforme	Transmission MQTT < 1s + update tab5.
Environnemental	Température -20°C à +60°C	Datasheet ESP32	✓ Conforme	Fonctionnement stable dans cette plage.
	Humidité < 90 %	Datasheet capteur pluie	✓ Conforme	Boîtier IP65 recommandé.
	Alimentation 5 V	IEC 62368-1	✓ Conforme	Conforme SELV, chargeurs USB standards.
Antenne	Antenne PCB interne	EN 300 328	✓ Conforme	Pas de modification du design certifié.
	Gain modéré (+2 dBi)	Datasheet ESP32	✓ Conforme	Gain compatible réglementation.
	VSWR < 2:1	Espressif	✓ Conforme	Bonne adaptation 50 Ω.

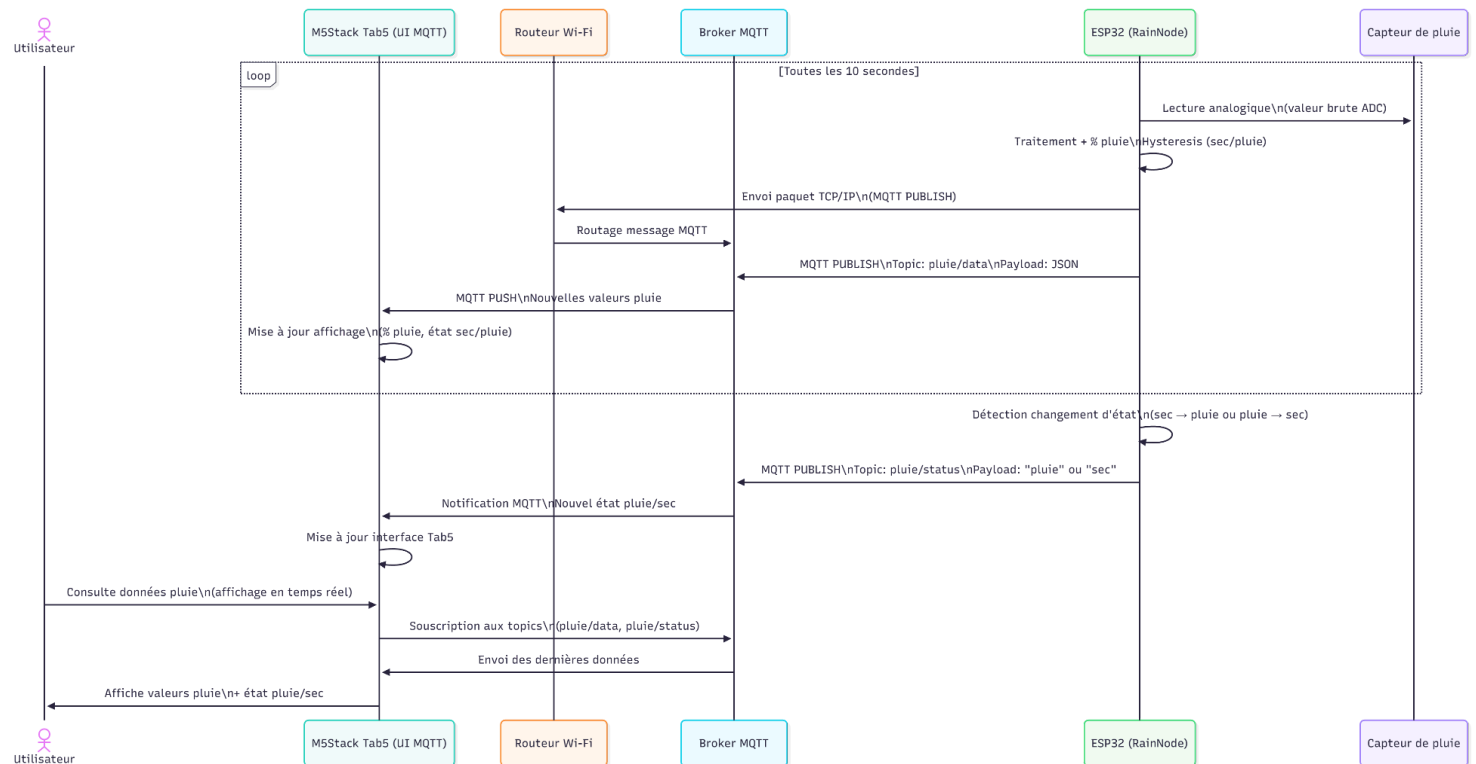
18- Annexes

18.1 Diagrammes complémentaires :

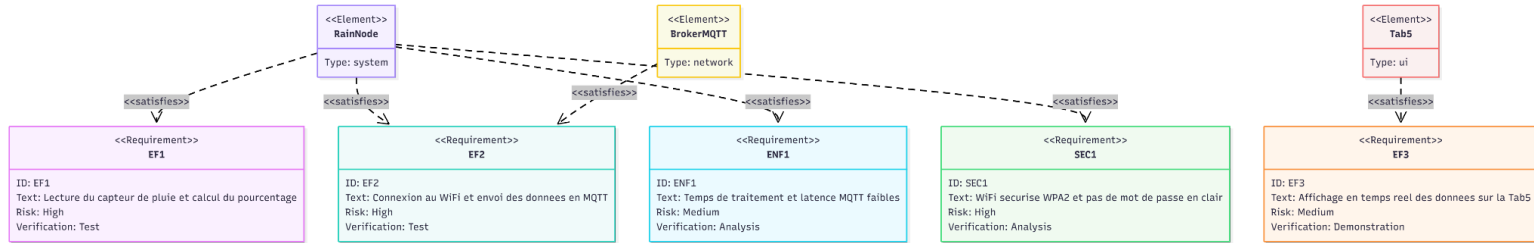
- Diagramme de contexte



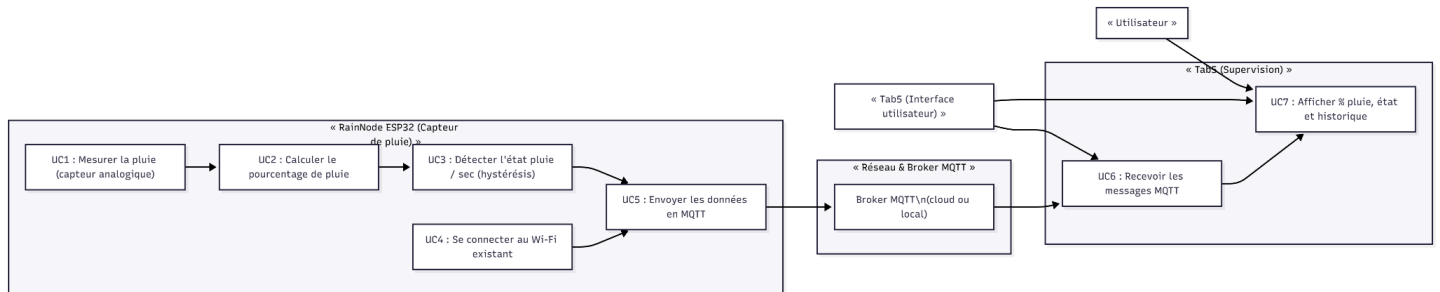
- Diagramme de séquence



● Diagramme d'exigences



● Diagramme d'usages



18.2 Glossaire

ADC – Analog to Digital Converter

Convertisseur analogique-numérique présent dans l'ESP32 permettant de lire la valeur brute du capteur de pluie. Il transforme une tension analogique en une valeur numérique.

API – Application Programming Interface

Interface logicielle permettant à la Tab5 (ou à d'autres systèmes) de récupérer les données du RainNode.

Bande ISM 2,4 GHz

Bande de fréquences libre d'usage (2,400 – 2,4835 GHz) utilisée par le Wi-Fi, Bluetooth et divers capteurs IoT. Normée par ETSI EN 300 328.

Broker MQTT

Serveur central chargé de router les messages MQTT entre l'ESP32 (publisher) et la Tab5 (subscriber).

CCK / DSSS / OFDM

Modulations radio définies par IEEE 802.11. L'ESP32 utilise DSSS/CCK (802.11b) ou OFDM (802.11g/n).

EIRP – Equivalent Isotropically Radiated Power

Puissance effective rayonnée par l'antenne. Limite européenne : 100 mW (20 dBm) sur la bande 2,4 GHz.

ESP32-WROOM-32

Module Wi-Fi/Bluetooth utilisé dans ton projet. Intègre RF, antenne PCB, ADC, CPU dual-core. Pré-certifié CE / FCC / IC.

EFIS – European Frequency Information System

Base de données CEPT listant l'utilisation réglementaire des fréquences radio en Europe.

Hystérésis

Méthode permettant d'éviter les oscillations pluie/sec en utilisant deux seuils différents.

IEEE 802.11 b/g/n

Normes Wi-Fi définissant les modulations, les largeurs de bande (20 MHz) et le protocole CSMA/CA.

IoT – Internet of Things

Ensemble de dispositifs connectés capables d'échanger leurs données via Internet ou un réseau local.

MQTT – Message Queuing Telemetry Transport

Protocole léger utiliser pour le publish/subscribe entre RainNode → Broker → Tab5.

PPM – Part per Million

Unité caractérisant la stabilité de l'oscillateur de fréquence. L'ESP32 a un drift typique de ± 10 ppm.

RSSI – Received Signal Strength Indicator

Indicateur intensité du signal Wi-Fi reçu. Utilisé pour adapter débit et modulation.

SAR – Specific Absorption Rate

Taux d'absorption d'énergie RF par le corps humain. Le RainNode est hors exigence SAR car utilisé à > 20 cm et puissance faible.

SSID – Service Set Identifier

Nom du réseau Wi-Fi auquel se connecte l'ESP32.

VSWR – Voltage Standing Wave Ratio

rs85

local broker

que dois al tabb5 envoyer de mise ne veille

comment oml

Mesure de qualité d'adaptation antenne \leftrightarrow circuit. L'antenne ESP32-WROOM \rightarrow VSWR