

Spécification radiofréquence du système de comptage d'entrées / Sorties

Résumé

Ce document présente la spécification radiofréquence d'un système de comptage d'entrées - sorties basé sur une carte ESP32 et une liaison Wi-Fi 2,4 GHz, avec visualisation des données sur un ES32-P4.

Auteur : Khadim NDOUR

Année universitaire : 2025 - 2026

Systèmes Electronique Embarqués/ SEE5

Encadrant : M LATRACHE

Table des matières

1	Introduction	4
1.1	Objet du document	4
1.2	Contexte du projet compteur entrées / sorties	4
1.3	Périmètre de la spécification radiofréquence	4
1.4	Méthodologie de rédaction et sources utilisées	5
2	Description fonctionnelle du dispositif	5
2.1	Principe de comptage (IN, OUT, INSIDE)	5
2.2	Architecture globale du système	6
2.3	Rôle de la liaison radio dans l'architecture	6
2.4	Contraintes d'usage (bâtiment, portée, fiabilité, maintenance)	7
3	Cadre réglementaire et normatif	8
3.1	Directive RED 2014/53/UE – exigences essentielles	8
3.2	Normes ETSI applicables à la bande 2,4 GHz (EN 300 328, EN 301 489-1/-17)	9
3.3	Normes de sécurité électrique (EN 62368-1)	10
3.4	Recommandation CEPT ERC/REC 70-03 et statut de la bande ISM 2,4 GHz	11
3.5	Références complémentaires (cybersécurité IoT, SAR, etc.)	12
3.5.1	Cybersécurité des objets connectés (ETSI EN 303 645)	12
3.5.2	Protection des données et confidentialité	13
3.5.3	Exposition aux champs électromagnétiques (SAR)	13
3.5.4	Synthèse	14
4	Architecture radio du système	14
4.1	Choix de la technologie (Wi-Fi 2,4 GHz – IEEE 802.11 b/g/n)	14
4.2	Module ESP32 et pile réseau	14
4.3	Topologie réseau (point d'accès, ESP32, P4)	14
4.4	Scénarios de communication (initialisation, mise à jour, supervision)	15
5	Spécifications RF détaillées	15
5.1	Paramètres de fréquence	15
5.2	Spécifications de l'émetteur	15
5.3	Spécifications du récepteur	16
5.4	Spécifications d'antenne	16
5.5	Environnement d'exploitation	17
6	Exigences RF et matrice de conformité	17
6.1	Liste synthétique des exigences RF	17
6.2	Lien exigences – normes et textes de référence	18
6.3	Matrice exigences – choix techniques	19

7	Dimensionnement et bilan de liaison	19
7.1	Hypothèses de calcul	19
7.2	Bilan de liaison théorique	20
7.3	Analyse de la marge de liaison et impact des obstacles	21
7.4	Discussion et conclusion sur le dimensionnement	21
8	Cybersécurité et protection des données	21
8.1	Menaces principales pour la liaison Wi-Fi	21
8.2	Mécanismes de sécurité retenus	22
8.3	Protection des données et confidentialité	22
8.4	Limites actuelles et pistes d'amélioration	22
9	Stratégie de test et de validation RF	23
9.1	Essais fonctionnels de base	23
9.2	Tests de portée et de taux d'erreur	23
9.3	Tests de robustesse aux interférences	23
9.4	Vérification de la conformité de principe	24
10	Analyse des risques radio et mesures de mitigation	24
10.1	Principaux risques radio identifiés	24
10.2	Mesures de mitigation envisagées	25
10.3	Synthèse	25
11	Conclusion et perspectives	26
11.1	Synthèse de la spécification RF	26
11.2	Bilan par rapport aux exigences normatives et projet	26
11.3	Perspectives d'évolution	27
	Annexes	28
A	Fiches techniques du module ESP32-WROOM-32 et de l'antenne	28
A.1	Module ESP32-WROOM-32	28
A.2	Antenne intégrée du module	29
B	Captures de l'outil de spécification RF / formulaire CEPT	29
B.1	Capture de l'outil de spécification RF	30
B.2	Capture du formulaire CEPT / ERC 70-03	36
B.3	Lien avec la spécification du projet	36
C	Détails des calculs de bilan de liaison	36
C.1	Rappel des formules utilisées	37
C.2	Paramètres numériques utilisés	37
C.3	Calculs détaillés pour 10 m et 20 m	38
C.3.1	Cas 1 : distance 10 m	38
C.3.2	Cas 2 : distance 20 m	39

C.4	Tableau récapitulatif	39
C.5	Commentaire sur les résultats	40
D	Tableaux complets d'exigences RF	40
D.1	Liste des exigences RF	41
D.2	Modes de vérification associés	42
E	Glossaire des acronymes RF et réseaux	42

1 Introduction

1.1 Objet du document

Le présent document a pour objet de définir et de formaliser la **spécification radiofréquence (RF)** du système de comptage d'entrées / sorties développé dans le cadre du projet SEE5. Il décrit le rôle de la liaison radio, les paramètres techniques retenus (bande de fréquence, puissance, modulation, antenne, portée, etc.), ainsi que le cadre normatif et réglementaire visé.

Cette spécification RF sert de base :

- à la conception et au dimensionnement de la partie radio du système,
- à la justification des choix matériels (module ESP32, antenne) et logiciels (pile réseau, protocole),
- à la préparation d'éventuelles campagnes de tests et de validation.

1.2 Contexte du projet compteur entrées / sorties

Le projet consiste à réaliser un **dispositif de comptage du flux de personnes** à travers une zone donnée (porte, couloir, accès de salle, etc.). Deux capteurs ultrasoniques disposés en barrière permettent de détecter le passage et le *sens de déplacement* des personnes. L'électronique embarquée, basée sur une carte **ESP32**, met à jour en temps réel les compteurs suivants :

- **IN** : nombre d'entrées,
- **OUT** : nombre de sorties,
- **INSIDE** : nombre de personnes actuellement présentes dans la zone.

Les informations de comptage sont :

- affichées localement sur le dispositif,
- transmises via une liaison **Wi-Fi 2,4 GHz** vers une tablette **ESP32-P4**, qui assure la visualisation et éventuellement la supervision.

Dans ce contexte, la partie radiofréquence joue un rôle central : elle doit garantir une communication fiable dans un environnement intérieur potentiellement encombré (murs, mobilier, autres réseaux Wi-Fi), tout en restant cohérente avec les contraintes réglementaires applicables en Europe.

1.3 Périmètre de la spécification radiofréquence

Le périmètre de ce document est strictement limité à la **dimension radio du système**. Les éléments suivants sont couverts :

- le choix de la technologie de communication (Wi-Fi 2,4 GHz, IEEE 802.11 b/g/n) et de la bande de fréquence,
- les paramètres RF principaux : fréquence, largeur de bande, puissance d'émission, sensibilité, type d'antenne, portée visée,
- l'architecture radio globale (ESP32, point d'accès, ESP32-P4),
- le lien entre ces choix et les normes / recommandations en vigueur (directive RED, normes ETSI, recommandation CEPT, etc.),
- les exigences RF à respecter (fonctionnelles, de performance, de compatibilité électromagnétique, de sécurité d'usage).

Les aspects purement fonctionnels (algorithmique de comptage, logique des capteurs), mécaniques (boîtier, fixation) ou applicatifs (interface graphique côté ESP32-P4, stockage avancé des données) ne sont pas détaillés dans ce document, sauf lorsqu'ils influencent directement la définition des paramètres RF.

1.4 Méthodologie de rédaction et sources utilisées

La spécification RF présentée dans ce rapport s'appuie sur :

- les caractéristiques techniques du module **ESP32** et de son sous-système Wi-Fi 2,4 GHz (fiches techniques constructeur),
- les **normes et textes de référence** applicables aux équipements de transmission de données large bande en bande ISM 2,4 GHz, en particulier la directive RED, les normes ETSI (EN 300 328, EN 301 489-1/-17) et la norme de sécurité EN 62368-1,
- les contraintes pratiques du projet (portée utile de 10 à 20 m en intérieur, usage en environnement tertiaire, alimentation basse tension),
- une démarche d'ingénierie système visant à transformer les besoins du projet (compter, afficher, transmettre) en **exigences RF traçables et vérifiables**.

L'objectif est de disposer d'un document clair, structuré et exploitable, montrant que la partie radio du compteur entrées / sorties n'est pas définie de manière empirique, mais s'inscrit dans un cadre technique et normatif cohérent.

2 Description fonctionnelle du dispositif

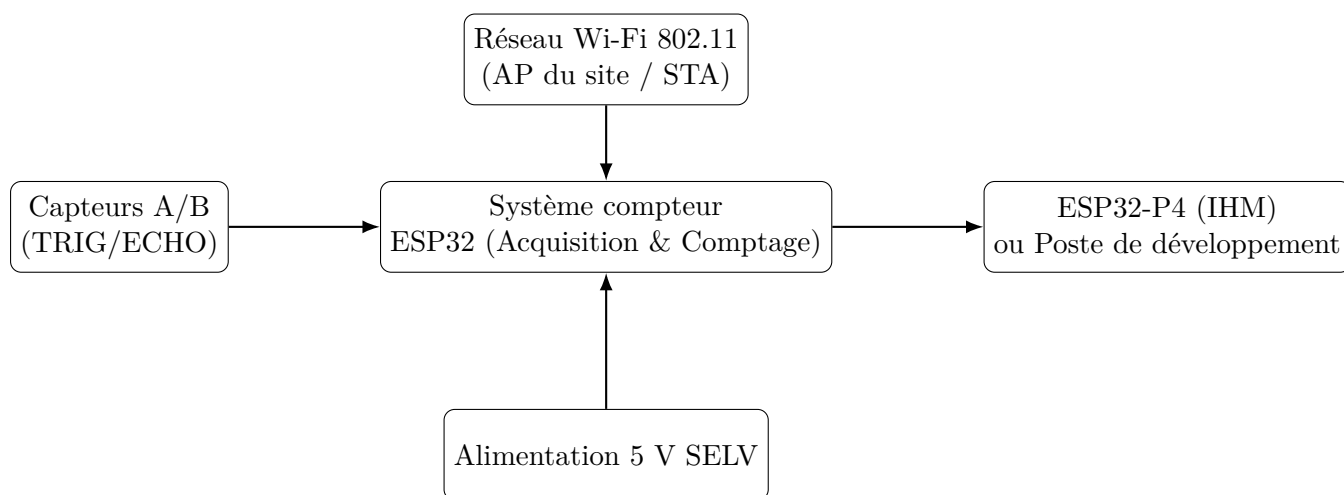


FIGURE 1 – Diagramme fonctionnel du dispositif de comptage d'entrées / sorties.

2.1 Principe de comptage (IN, OUT, INSIDE)

Le dispositif réalisé a pour objectif de **compter le nombre de personnes** qui franchissent une zone de passage (porte, couloir, accès de salle) et de déterminer le **sens de déplacement**. Pour cela, deux capteurs ultrasoniques sont disposés en barrière de part et d'autre du passage, de manière à détecter les entrées et les sorties.

Le principe de fonctionnement est le suivant :

- lorsque la première barrière est franchie, puis la seconde, le système interprète un mouvement dans le sens **entrée** et incrémente le compteur **IN**,
- lorsque la seconde barrière est franchie avant la première, le système interprète un mouvement dans le sens **sortie** et incrémente le compteur **OUT**,
- la valeur **INSIDE** correspond à la différence entre le nombre total d'entrées et le nombre total de sorties, et représente l'occupation actuelle de la zone surveillée.

Des règles de décision et de temporisation sont mises en place dans le logiciel embarqué afin de :

- filtrer les détections parasites (mouvements partiels, passages très rapides),
- éviter les doubles comptages pour une même personne,
- garantir la cohérence des compteurs dans le temps.

2.2 Architecture globale du système

Sur le plan fonctionnel, le système de comptage se décompose en plusieurs blocs principaux :

- **Sous-système de détection** : deux capteurs ultrasoniques installés en barrière, chargés de détecter la présence et l'ordre de passage des personnes ;
- **Unité de traitement** : une carte **ESP32** qui lit les mesures des capteurs, applique l'algorithme de décision, met à jour les compteurs et gère la logique de communication ;
- **Interface locale** : un affichage (écran ou interface simple) qui présente en temps réel les valeurs IN, OUT et INSIDE ;
- **Interface radio** : le module Wi-Fi 2,4 GHz intégré à l'ESP32, qui assure la transmission des données vers le réseau ;
- **Poste de supervision** : une tablette **ESP32-P4** connectée au même réseau Wi-Fi, utilisée pour visualiser les compteurs et superviser le fonctionnement du dispositif.

Le fonctionnement global peut être résumé de la manière suivante :

1. Les capteurs ultrasoniques détectent un passage et envoient l'information brute (distance, front logique, etc.) à l'ESP32 ;
2. L'ESP32 traite ces informations, détermine s'il s'agit d'une entrée ou d'une sortie, et met à jour les compteurs ;
3. Les valeurs IN, OUT et INSIDE sont mises à disposition :
 - localement, via l'affichage ou une interface simple,
 - à distance, via la liaison Wi-Fi, pour consultation sur le ESP32-P4.

2.3 Rôle de la liaison radio dans l'architecture

La liaison radio, assurée par le **Wi-Fi 2,4 GHz** de l'ESP32, joue un rôle clé dans l'architecture du système :

- elle permet de **dissocier physiquement** le dispositif de comptage (installé à proximité de la porte) du poste de supervision (tablette ESP32-P4), qui peut être déplacé librement dans la zone couverte par le réseau ;

- elle offre une **remontée d'information en temps quasi réel** des compteurs, sans câblage supplémentaire ;
- elle permet à terme d'envisager **plusieurs dispositifs de comptage** connectés au même réseau, avec centralisation des données.

Concrètement, l'ESP32 se connecte à un *point d'accès Wi-Fi* (routeur ou hotspot), et la ESP32-P4 se connecte au même réseau. Les données peuvent être échangées via un protocole applicatif léger (par exemple HTTP ou MQTT), permettant à la tablette de récupérer régulièrement les valeurs IN, OUT et INSIDE et de les présenter sous une forme exploitable (tableau, graphe, indicateurs).

La **qualité de la liaison radio** influe directement sur :

- la fluidité de la mise à jour des compteurs affichés sur la ESP32-P4,
- la fiabilité de la supervision (éviter les pertes d'information),
- la portée effective entre le dispositif de comptage et le point d'accès.

C'est pourquoi la spécification RF détaillée fait l'objet d'un document dédié.

2.4 Contraintes d'usage (bâtiment, portée, fiabilité, maintenance)

Le dispositif est conçu pour un usage en **intérieur de bâtiment**, en environnement tertiaire (salles de cours, bureaux, couloirs). À ce titre :

- il est installé de manière fixe à proximité d'une **porte ou d'un passage**, à une hauteur permettant une détection fiable des personnes par les capteurs ultrasoniques ;
- il fonctionne dans une plage de température typique de 0 °C à +40 °C et une humidité de 10 % à 90 % sans condensation ;
- l'alimentation est assurée par une **source 5 V SELV** (bloc secteur ou alimentation de laboratoire), sans recours à une batterie.

En termes de **portée radio**, le système est dimensionné pour :

- une liaison Wi-Fi 2,4 GHz ESP32–point d'accès de **10 à 20 m** en intérieur, avec présence de cloisons légères ;
- un taux de trames correctement reçues supérieur ou égal à **99 %** sur 10 m, afin de garantir un affichage quasi temps réel des compteurs sur la Tab5.

La **fiabilité** repose sur :

- des algorithmes simples de détection de passage (ordre de franchissement des capteurs A/B) pour limiter les erreurs de comptage ;
- des mécanismes logiciels de **reconnexion automatique** au Wi-Fi et de reprise après coupure d'alimentation (compteurs stockés en mémoire non volatile ou re-initialisation contrôlée) ;
- une surveillance minimale (par exemple affichage d'un état de connexion ou d'une alarme simple sur la ESP32-P4).

Enfin, la **maintenance** visée reste légère :

- opérations principalement limitées à la **vérification ponctuelle** du bon fonctionnement (comparaison comptage réel / affichage) ;
- possibilité de **mise à jour logicielle** de l'ESP32 (firmware) en cas d'évolution des algorithmes ou des besoins RF ;

- éventuel **recalage mécanique** des capteurs ultrasoniques si la géométrie du passage est modifiée (largeur de porte, obstacles).

Ces contraintes d’usage définissent un cadre réaliste pour l’exploitation du système dans un bâtiment et orientent les choix de spécifications RF, de portée et de stratégie de maintenance présentés dans le reste du rapport.

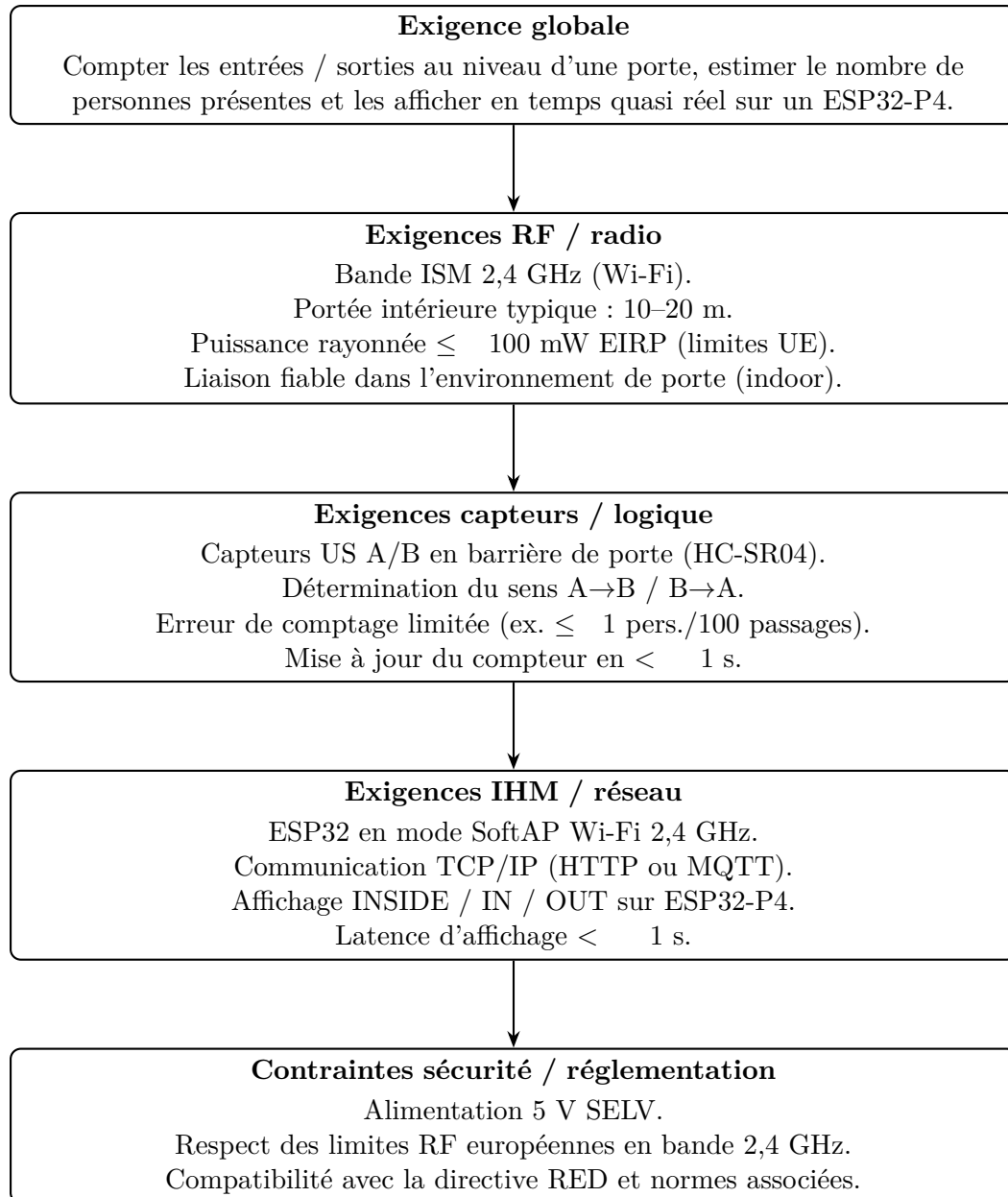


FIGURE 2 – Diagramme des exigences principales du système de comptage.

3 Cadre réglementaire et normatif

3.1 Directive RED 2014/53/UE – exigences essentielles

La directive européenne **RED 2014/53/UE** encadre la mise sur le marché des équipements radio. Elle définit trois familles d’exigences dites *essentiels* (Article 3) auxquelles le système

de comptage doit, en théorie, satisfaire.

- **Art. 3(1)(a) – Santé et sécurité** : l'équipement ne doit pas présenter de risque inacceptable pour l'utilisateur ou les tiers. Pour le dispositif :
 - alimentation en **basse tension** (5 V SELV) ;
 - boîtier fermé, accès limité aux parties actives ;
 - puissance RF faible (≤ 100 mW EIRP), très en dessous des limites d'exposition du public.
- **Art. 3(1)(b) – Compatibilité électromagnétique (CEM)** : l'équipement doit **ne pas perturber** de manière inacceptable les autres appareils, et **tolérer** un niveau raisonnable de perturbations. Dans le projet, cela se traduit par le recours à un module Wi-Fi ESP32 conçu pour respecter les normes CEM applicables (EN 301 489-1/-17) et par une intégration matérielle soignée (masse, câblage, antenne).
- **Art. 3(2) – Utilisation efficace du spectre** : l'équipement doit utiliser la bande radio de façon à limiter les interférences. Pour le système de comptage :
 - utilisation de la bande ISM **2,4 GHz**, telle que décrite dans la recommandation CEPT ERC/REC 70-03 ;
 - respect des paramètres de puissance et d'occupation de canal de la norme **ETSI EN 300 328** (100 mW EIRP max, mécanismes de partage du spectre type CSMA/CA, largeur de canal 20 MHz).

Dans le cadre de ce projet académique, il ne s'agit pas de réaliser une certification complète RED, mais de montrer que la conception choisie (ESP32 + Wi-Fi 2,4 GHz en bande ISM, basse tension, antenne intégrée) est **alignée avec l'esprit** de ces exigences essentielles.

3.2 Normes ETSI applicables à la bande 2,4 GHz (EN 300 328, EN 301 489-1/-17)

Pour démontrer la conformité aux exigences de la directive RED, les fabricants d'équipements radio s'appuient sur des **normes européennes harmonisées** publiées par l'ETSI (European Telecommunications Standards Institute). Dans le cas d'un système de transmission de données en bande ISM 2,4 GHz, comme le dispositif de comptage étudié, les normes principales sont les suivantes :

- **ETSI EN 300 328** : norme harmonisée pour les *systèmes de transmission de données large bande* opérant dans la bande 2400–2483,5 MHz. Elle s'applique notamment aux technologies Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n), Bluetooth et à d'autres systèmes à étalement de spectre ou OFDM. Elle précise les exigences relatives :
 - à la **puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP)** maximale, typiquement 100 mW (20 dBm) pour de nombreux profils d'utilisation en 2,4 GHz ;
 - à la **bande occupée** et aux **masques d'émission**, afin de limiter les interférences entre canaux et bandes adjacentes ;
 - au comportement du système vis-à-vis de l'**accès au médium** (mécanismes d'écoute de canal, temps d'occupation, etc.), afin d'assurer une utilisation efficace et rationnelle du spectre.
- **ETSI EN 301 489-1** : norme générique de **compatibilité électromagnétique (CEM)**

applicable à une large gamme d'équipements radio. Elle définit les méthodes d'essai et les niveaux d'exigence en termes d'émissions perturbatrices et d'immunité aux perturbations externes.

- **ETSI EN 301 489-17** : partie spécifique CEM pour les *systèmes de transmission de données large bande* dans les bandes 2,4 GHz et 5 GHz (Wi-Fi, Bluetooth, etc.). Elle complète EN 301 489-1 avec des exigences adaptées aux équipements de type WLAN / RLAN.

Ces normes ont un impact direct sur la définition des **paramètres RF** de notre système de comptage :

- la puissance d'émission du module ESP32 doit rester **inférieure ou égale à 20 dBm EIRP** en 2,4 GHz, ce qui est le cas des profils Wi-Fi proposés par le constructeur ;
- le spectre émis doit respecter les **masques d'émission** et les limites d'*émissions hors bande* définies par EN 300 328, afin de ne pas perturber les canaux voisins ;
- le dispositif doit s'inscrire dans un **comportement de partage du canal** compatible avec les autres équipements 2,4 GHz (CSMA/CA pour le Wi-Fi), afin de limiter le risque de brouillage préjudiciable ;
- les émissions parasites conduites et rayonnées, ainsi que l'immunité vis-à-vis des perturbations externes (champs RF, décharges électrostatiques, transitoires sur l'alimentation), doivent rester dans les limites fixées par EN 301 489-1 et EN 301 489-17.

Dans le cadre de ce projet académique, il n'est pas envisagé de réaliser l'ensemble des essais de laboratoire prévus par ces normes. En revanche, le choix d'un module **ESP32** déjà largement utilisé dans des équipements Wi-Fi grand public et conçu pour répondre à ces exigences permet de se placer dans un **cadre normatif réaliste**. La spécification RF du système est donc rédigée en cohérence avec les hypothèses de puissance, de bande de fréquence et de comportement radio attendues pour un équipement conforme aux normes ETSI susmentionnées.

3.3 Normes de sécurité électrique (EN 62368-1)

Au-delà des aspects purement radio et CEM, la directive RED renvoie également à des normes de **sécurité électrique** pour les équipements audio/vidéo et de technologies de l'information et de la communication (TIC). Dans ce contexte, la norme de référence est la norme européenne **EN 62368-1** (*Audio/video, information and communication technology equipment – Part 1 : Safety requirements*).

Cette norme s'applique typiquement aux équipements tels que les routeurs Wi-Fi, les box Internet, les ordinateurs, les moniteurs ou encore les modules électroniques destinés à être intégrés dans des produits TIC. Elle définit un ensemble d'exigences visant à :

- limiter les **risques de choc électrique** pour l'utilisateur,
- prévenir les **risques de surchauffe** et d'incendie,
- encadrer l'utilisation de **tensions dangereuses** et l'accès aux parties actives,
- garantir une isolation et des barrières de protection adaptées entre les différentes parties du système.

La norme EN 62368-1 repose sur une approche dite *basée sur les sources d'énergie* : plutôt que de lister uniquement des valeurs de tension ou de courant, elle classe les différentes sources

d'énergie (électrique, thermique, mécanique) en catégories, puis spécifie les protections à mettre en place pour éviter que ces sources ne causent des dommages à l'utilisateur ou à l'environnement.

Dans le cadre du système de comptage d'entrées / sorties étudié, les points suivants permettent de se positionner par rapport aux principes de la norme EN 62368-1 :

- le dispositif est alimenté en **basse tension** (5 V DC, régulée en 3,3 V pour la carte ESP32), ce qui le place en dessous des seuils de tension considérés comme dangereux pour l'utilisateur ;
- les parties électroniques actives (ESP32, alimentation, capteurs ultrasoniques) sont prévues pour être intégrées dans un **boîtier fermé**, évitant tout contact direct avec les conducteurs et composants ;
- la puissance dissipée par le système est faible (de l'ordre du watt), limitant le risque de **chauffe excessive** en fonctionnement normal ;
- les composants utilisés (carte ESP32, bloc d'alimentation) sont dérivés de produits destinés au marché grand public des TIC, pour lesquels les aspects de sécurité électrique sont déjà pris en compte par le fabricant.

Même si le projet n'a pas pour objectif de mener une procédure de certification complète selon EN 62368-1, la conception retenue respecte les **principes fondamentaux de sécurité** : utilisation de basses tensions, absence de parties sous tension accessibles, limitation de la puissance disponible, et intégration dans un boîtier protecteur. Ces éléments permettent d'aligner le système de comptage sur une démarche réaliste de conformité à la norme de sécurité applicable aux équipements électroniques de type TIC.

3.4 Recommandation CEPT ERC/REC 70-03 et statut de la bande ISM 2,4 GHz

La **recommandation CEPT ERC/REC 70-03** fixe, au niveau européen, un cadre commun pour l'utilisation de certaines bandes de fréquences par des *Short Range Devices (SRD)*, c'est-à-dire des dispositifs de faible portée fonctionnant généralement avec de faibles puissances d'émission et sans protection particulière contre les brouillages.

Cette recommandation :

- recense les **bandes de fréquences** pouvant être utilisées par des SRD dans les pays membres de la CEPT ;
- indique pour chaque bande les **puissances maximales** autorisées, les **types d'applications** visées (télécommande, télémessure, transmission de données, etc.) et, le cas échéant, les **restrictions** à respecter ;
- sert de base à l'harmonisation des réglementations nationales, en facilitant la libre circulation des équipements SRD au sein de l'Europe.

Parmi les bandes listées dans ERC/REC 70-03, la bande **2400–2483,5 MHz** occupe une place particulière. Elle est identifiée comme bande **ISM** (*Industrial, Scientific and Medical*) et est largement utilisée pour :

- les réseaux locaux sans fil de type *RLAN / WLAN* (Wi-Fi IEEE 802.11 b/g/n),
- les systèmes *Bluetooth* et autres liaisons radio de courte portée,
- certains dispositifs de télécommande ou de transmission de données.

Pour cette bande, la recommandation CEPT, complétée par les normes ETSI, prévoit :

- la possibilité d'utiliser la bande sans licence individuelle, sous réserve du respect de **puissances maximales** (typiquement jusqu'à 100 mW EIRP pour les équipements Wi-Fi grand public) ;
- l'absence de protection garantie : les utilisateurs de la bande ISM doivent accepter un certain niveau de **brouillage** lié à la densité d'équipements présents ;
- la nécessité de mettre en œuvre des **mécanismes de partage du spectre** (écoute de canal, protocoles d'accès au médium), afin de favoriser la coexistence entre systèmes.

Dans le cadre du système de comptage d'entrées / sorties :

- la liaison radio repose sur la technologie **Wi-Fi 2,4 GHz** intégrée à l'ESP32, qui fonctionne précisément dans la bande ISM 2400–2483,5 MHz ;
- la **puissance d'émission** du module reste dans les limites usuelles imposées pour les équipements Wi-Fi (de l'ordre de 20 dBm EIRP au maximum) ;
- le protocole IEEE 802.11 met en œuvre un mécanisme d'accès au médium de type **CSMA/CA**, permettant de partager le canal avec d'autres réseaux et dispositifs utilisant la même bande.

Ainsi, le projet s'inscrit dans l'usage typique de la bande ISM 2,4 GHz tel que prévu par la recommandation CEPT ERC/REC 70-03 : dispositif de faible portée, puissance limitée, bande libre de licence, et recours à une technologie standardisée (Wi-Fi) conçue pour la coexistence avec d'autres systèmes dans un environnement radio encombré.

3.5 Références complémentaires (cybersécurité IoT, SAR, etc.)

En complément des textes spécifiquement centrés sur la partie radio (directive RED, normes ETSI, recommandation CEPT), plusieurs références et recommandations récentes viennent encadrer ou influencer la conception d'équipements connectés comme le système de comptage d'entrées / sorties.

3.5.1 Cybersécurité des objets connectés (ETSI EN 303 645)

La norme **ETSI EN 303 645** propose un ensemble d'exigences et de bonnes pratiques pour la **cybersécurité des objets connectés grand public** (IoT). Elle couvre notamment :

- la gestion des **mots de passe** (interdiction des identifiants par défaut connus, obligation de changer les mots de passe faibles, etc.) ;
- la prise en compte des **mise à jour logicielles sécurisées** (intégrité des firmwares, mécanismes d'update) ;
- la **protection des données** (chiffrement, minimisation des données collectées, contrôle d'accès) ;
- la gestion des **vulnérabilités** (canal de remontée, correctifs, communication avec les utilisateurs).

Dans le cadre du système étudié, les principes suivants sont retenus, en cohérence avec ces recommandations :

- la liaison radio s'effectue sur un **réseau Wi-Fi protégé** (au minimum WPA2-PSK) avec un mot de passe suffisamment robuste ;

- l'accès aux données de comptage est limité au **réseau local** (LAN), sans exposition directe sur Internet ;
- le volume de données échangées est restreint aux compteurs nécessaires (IN, OUT, IN-SIDE) et éventuellement à quelques informations d'état, ce qui contribue à la **minimisation des données**.

Même si le projet ne met pas en œuvre l'ensemble des mécanismes d'une politique de cybersécurité complète, il s'inscrit dans une logique de **bonnes pratiques** adaptées à un objet connecté de type démonstrateur pédagogique.

3.5.2 Protection des données et confidentialité

Le système de comptage développé ne stocke ni n'exploite de **données personnelles identifiantes** (pas d'image, pas de nom, pas d'identifiant directement lié à une personne). Les informations manipulées se limitent à des **compteurs anonymes** de flux (nombre d'entrées, de sorties, occupation globale).

Du point de vue de la confidentialité :

- la liaison Wi-Fi peut être chiffrée via les mécanismes standards de la couche liaison (WPA2 / WPA3) ;
- la zone d'utilisation est limitée à un environnement de type salle / bâtiment, avec un nombre restreint d'utilisateurs autorisés à accéder aux informations de comptage ;
- aucune donnée de type « historique nominatif » n'est enregistrée : l'approche reste statistique et macroscopique.

Cette conception limite fortement les risques en matière de protection des données au sens du RGPD.

3.5.3 Exposition aux champs électromagnétiques (SAR)

L'exposition du public aux champs électromagnétiques produits par les équipements radio est encadrée par des recommandations internationales (ICNIRP) et transposée dans les législations nationales. Les limites sont exprimées en termes de **débit d'absorption spécifique (SAR)** et de **densité de puissance** pour différentes parties du corps (tête, tronc, membres).

Dans le cas du système de comptage :

- la puissance d'émission du module Wi-Fi est faible (typique de l'ordre de 10 à 20 dBm, soit 10 à 100 mW) ;
- le dispositif est installé **à distance des personnes**, généralement en hauteur ou à proximité d'une porte, avec une distance typique d'au moins plusieurs dizaines de centimètres ;
- la zone de fonctionnement réelle de l'antenne est la même que celle d'un routeur ou d'un point d'accès Wi-Fi de faible puissance.

Dans ces conditions, l'exposition des utilisateurs reste très largement inférieure aux limites SAR applicables aux équipements radio grand public. Aucune étude SAR détaillée n'est réalisée dans le cadre du projet, mais les hypothèses de puissance et de positionnement garantissent une **marge de sécurité importante**.

3.5.4 Synthèse

Les références complémentaires en matière de cybersécurité IoT et d'exposition aux champs électromagnétiques ne sont pas traitées de manière exhaustive dans ce projet académique. Néanmoins, elles fournissent un **cadre de réflexion** qui a guidé plusieurs choix de conception : usage d'un réseau Wi-Fi sécurisé, limitation des données échangées, absence d'informations personnelles et installation fixe à distance des personnes.

Ces éléments renforcent la cohérence globale de la spécification RF et montrent que le système de comptage d'entrées / sorties s'inscrit dans une approche réaliste pour un équipement connecté Wi-Fi déployé en environnement intérieur.

4 Architecture radio du système

4.1 Choix de la technologie (Wi-Fi 2,4 GHz – IEEE 802.11 b/g/n)

Le système de comptage s'appuie sur la technologie **Wi-Fi 2,4 GHz** (IEEE 802.11 b/g/n) intégrée à la carte **ESP32**. Ce choix permet :

- de transmettre de petits volumes de données (IN, OUT, INSIDE) avec une latence faible,
- d'assurer une portée de l'ordre de 10 à 20 m en environnement intérieur,
- de s'intégrer dans une **infrastructure existante** (point d'accès Wi-Fi) et d'être accessible directement depuis la tablette ESP32-P4.

Le Wi-Fi 2,4 GHz, bande ISM libre de licence, offre un écosystème mature et bien encadré par les normes ETSI, ce qui en fait le meilleur compromis entre performance, simplicité et compatibilité pour ce projet.

4.2 Module ESP32 et pile réseau

Le **module ESP32** joue un double rôle :

- **Traitement local** : lecture des capteurs ultrasoniques, détermination du sens de passage, mise à jour des compteurs, affichage local.
- **Communication réseau** : gestion de la connexion Wi-Fi (mode station), obtention d'une adresse IP, utilisation de la pile TCP/IP (HTTP ou MQTT) pour échanger avec la ESP32-P4.

L'intégration de la radio Wi-Fi, de la pile TCP/IP et du microcontrôleur dans un même composant :

- réduit la complexité matérielle (pas de module radio externe),
- simplifie le développement logiciel (un environnement unique pour la logique de comptage et la communication),
- garantit des paramètres RF cohérents avec les normes visées.

4.3 Topologie réseau (point d'accès, ESP32, P4)

La topologie retenue est une topologie **infrastructure** classique :

- un **point d'accès Wi-Fi** diffuse le réseau (SSID), gère l'authentification et attribue les adresses IP (DHCP) ;

- le **dispositif de comptage** (ESP32) se connecte en mode station au point d'accès et publie ou expose les valeurs de comptage ;
- la **ESP32-P4** se connecte au même réseau Wi-Fi et récupère les données pour les afficher.

Le lien RF critique est la liaison **ESP32** \leftrightarrow **point d'accès** en 2,4 GHz ; le ESP32-P4 communique ensuite avec l'ESP32 au niveau IP via le même point d'accès.

4.4 Scénarios de communication (initialisation, mise à jour, supervision)

On distingue trois scénarios principaux :

- **Initialisation** : à la mise sous tension, l'ESP32 initialise les capteurs, active le Wi-Fi, se connecte au point d'accès et obtient une adresse IP. Il peut publier un premier état (compteurs initialisés).
- **Mise à jour périodique** : en fonctionnement, l'ESP32 met à jour les compteurs en fonction des détections et transmet régulièrement les valeurs (par exemple toutes les quelques secondes) via HTTP ou MQTT. Le volume de données reste faible mais la fiabilité doit être élevée.
- **Supervision** : la P4 interroge l'ESP32 (HTTP) ou s'abonne à des topics (MQTT) pour afficher en quasi temps réel IN, OUT, INSIDE et, éventuellement, l'état du dispositif (RSSI, dernière mise à jour, etc.).

Ces scénarios se traduisent, au niveau RF, par la nécessité de maintenir une **liaison Wi-Fi stable** sur la portée cible, avec un taux de trames correctement reçues élevé et une latence compatible avec l'affichage en temps quasi réel sur la Tab5.

5 Spécifications RF détaillées

5.1 Paramètres de fréquence

Le système utilise la bande ISM **2,4 GHz** :

- **Bande de fonctionnement** : 2400–2483,5 MHz ;
- **Canaux Wi-Fi** : canaux 1 à 13, espacés de 5 MHz (ex. canal 6 à 2437 MHz) ;
- **Largeur de canal** : 20 MHz (mode standard 802.11 b/g/n).

Pour les calculs et le dimensionnement, on considère un canal typique :

$$f_c \approx 2437 \text{ MHz}, \quad BW = 20 \text{ MHz}.$$

5.2 Spécifications de l'émetteur

L'émetteur est le transceiver Wi-Fi intégré à l'ESP32.

Puissance et EIRP

- **Puissance RF module** : typiquement +10 à +15 dBm ;
- **Gain antenne** : environ +2 dBi (antenne PCB Inverted-F) ;
- **EIRP typique** : $\approx +15$ dBm, avec une **limite** fixée à ≤ 20 dBm (100 mW) conformément à la bande ISM 2,4 GHz.

Modulation et débits

- **Norme** : IEEE 802.11 b/g/n ;
- **Modulations** : DSSS (802.11b) et OFDM (802.11g/n) ;
- **Débits max théoriques** : largement supérieurs aux besoins (quelques octets/s), ce qui permet d'utiliser des **modes robustes** à bas débit.

Émissions hors bande

- l'émetteur doit respecter les masques d'émission et les limites d'*émissions hors bande / spurious* de la norme **ETSI EN 300 328** ;
- cette exigence est satisfaite en s'appuyant sur le fait que l'ESP32 est un module Wi-Fi conçu pour des applications conformes aux normes ETSI.

5.3 Spécifications du récepteur

Le récepteur Wi-Fi de l'ESP32 conditionne la portée et la robustesse de la liaison.

Sensibilité et performances de réception

- **Sensibilité typique** : jusqu'à ≈ -90 dBm pour les modes bas débit (802.11b) ;
- **Sensibilité cible projet** : ≤ -85 dBm pour les débits utilisés ;
- **Sélectivité** : > 35 dB vis-à-vis des canaux adjacents ;
- **Figure de bruit** : typiquement < 8 dB en 2,4 GHz.

Plage dynamique et fiabilité

- **Plage dynamique** : d'environ -90 à -10 dBm (80 dB) ;
- **Exigence de service** : taux de trames correctement reçues ≥ 99 % sur la portée cible (10 à 20 m en intérieur), compensé si besoin par les retransmissions MAC/TCP.

5.4 Spécifications d'antenne

L'antenne est celle intégrée au module ESP32.

Type et caractéristiques principales

- **Type** : antenne PCB *Inverted-F* (IFA) intégrée ;
- **Gain typique** : $G_{\text{ant}} \approx +2$ dBi ;
- **Polarisation** : linéaire (approximativement verticale) ;
- **Rayonnement** : quasi omnidirectionnel dans le plan horizontal ;
- **Adaptation** : impédance 50Ω , VSWR visé $< 2:1$ sur 2400–2483,5 MHz.

Intégration mécanique

- module positionné de façon à laisser l'antenne dégagée, proche d'un bord du boîtier ;
- boîtier en matériau non métallique (plastique) pour limiter la détuning ;
- éviter le passage de câbles ou de masses métalliques immédiatement devant l'antenne.

5.5 Environnement d'exploitation

Conditions environnementales

- **Température de fonctionnement** : 0 °C à +40 °C (intérieur) ;
- **Humidité relative** : 10 % à 90 % sans condensation ;
- **Alimentation** : 5 V DC externe, régulée en 3,3 V pour l'ESP32 ; puissance totale 1 W.

Portée cible et conditions radio

- **Portée visée** : 10 à 20 m en environnement intérieur ;
- **Scénarios** : LOS (visibilité directe) et NLOS (un ou plusieurs murs) ;
- **Environnement radio** : présence d'autres réseaux Wi-Fi / équipements 2,4 GHz (environnement tertiaire standard) ;
- **Exigence** : liaison Wi-Fi opérationnelle avec taux de trames reçues ≥ 99 % sur 10 m NLOS typique et communication fonctionnelle jusqu'à 20 m dans les meilleures conditions.

Ces spécifications RF détaillées fixent le **cadre chiffré** dans lequel le système doit fonctionner (bande, puissance, sensibilité, antenne, environnement) et serviront de base au *bilan de liaison* et aux essais de validation décrits dans les sections suivantes.

6 Exigences RF et matrice de conformité

Cette section regroupe les principales **exigences radiofréquence** (RF) du système et les met en relation avec :

- les **normes / textes de référence** (RED, ETSI, CEPT, EN 62368-1, etc.) ;
- les **choix techniques** effectués (ESP32, Wi-Fi 2,4 GHz, antenne intégrée).

6.1 Liste synthétique des exigences RF

Les exigences ci-dessous sont numérotées pour faciliter la traçabilité dans le reste du rapport.

Bande et spectre

- **RF-01 – Bande de fonctionnement** : le système doit fonctionner dans la bande ISM 2400–2483,5 MHz, en utilisant des canaux Wi-Fi 20 MHz conformes à IEEE 802.11 b/g/n.
- **RF-02 – Utilisation efficace du spectre** : l'équipement doit utiliser le spectre de façon compatible avec les mécanismes d'accès au médium de la norme 802.11 (CSMA/CA) et les limites de la norme ETSI EN 300 328 (masques d'émission, temps d'occupation).

Puissance, émission et CEM

- **RF-03 – EIRP maximale** : l'EIRP du système doit rester ≤ 20 dBm (100 mW) en 2,4 GHz.

- **RF-04 – Émissions hors bande / spurious** : les émissions hors bande et parasites doivent respecter les limites de la norme ETSI EN 300 328, afin de ne pas perturber les services voisins.
- **RF-05 – Compatibilité électromagnétique** : le système doit satisfaire les exigences CEM applicables aux équipements Wi-Fi (EN 301 489-1 / EN 301 489-17) en émission et en immunité.

Réception, portée et qualité de service

- **RF-06 – Sensibilité minimale** : la chaîne de réception doit permettre de décoder correctement des signaux d'au moins -85 dBm sur la portée visée.
- **RF-07 – Portée utile** : la liaison doit rester opérationnelle sur 10–20 m en environnement intérieur (LOS / NLOS typique) avec un taux de trames correctement reçues ≥ 99 % en conditions normales.
- **RF-08 – Robustesse aux interférences** : le système doit rester fonctionnel en présence d'autres réseaux Wi-Fi et d'équipements 2,4 GHz dans un environnement tertiaire standard.

Antenne et intégration

- **RF-09 – Antenne et adaptation** : l'antenne doit présenter un gain typique d'environ $+2$ dBi, une impédance 50Ω et un VSWR $< 2:1$ sur 2400–2483,5 MHz.
- **RF-10 – Intégration mécanique** : l'antenne doit être intégrée de manière à conserver son diagramme de rayonnement (boîtier non métallique, dégagement vis-à-vis des masses métalliques).

Sécurité et environnement

- **RF-11 – Sécurité électrique / exposition EM** : le fonctionnement doit respecter les principes de la norme EN 62368-1 (basses tensions, boîtier fermé) et garantir une exposition très inférieure aux limites SAR usuelles pour le grand public (installation fixe, puissance ≤ 100 mW).

6.2 Lien exigences – normes et textes de référence

Le tableau suivant met en relation les exigences RF du projet avec les principales normes et directives identifiées dans le cadre réglementaire.

Exigence	Objet	Références normatives / réglementaires
RF-01, RF-02	Bande de fonctionnement, usage du spectre	Directive RED (Art. 3(2)), ETSI EN 300 328, CEPT ERC/REC 70-03 (bande 2,4 GHz)
RF-03, RF-04	Puissance EIRP, émissions hors bande / spurious	ETSI EN 300 328 (limites de puissance et masques d'émission), Directive RED
RF-05	Compatibilité électromagnétique	ETSI EN 301 489-1 et EN 301 489-17, exigences CEM de la directive RED
RF-06, RF-07, RF-08	Sensibilité, portée, qualité de service	Performances attendues d'un équipement Wi-Fi 2,4 GHz conforme à IEEE 802.11 b/g/n en environnement intérieur
RF-09, RF-10	Antenne, adaptation, intégration mécanique	Bonnes pratiques RF (impédance 50 Ω , VSWR < 2:1), documentation constructeur ESP32
RF-11	Sécurité électrique et exposition EM	EN 62368-1 (sécurité), recommandations ICNIRP / cadre RED pour l'exposition du public

6.3 Matrice exigences – choix techniques

Enfin, la conformité de principe aux exigences RF repose sur les choix techniques suivants :

- utilisation d'un **module ESP32** Wi-Fi 2,4 GHz précertifiable, conçu pour respecter les normes ETSI et la directive RED ;
- choix d'une **antenne PCB intégrée** (Inverted-F) avec gain et adaptation maîtrisés ;
- fonctionnement dans une **infrastructure Wi-Fi standard** (point d'accès, réseau local), avec une puissance et une portée typiques d'un équipement grand public ;
- installation en **environnement intérieur** avec alimentation basse tension et boîtier fermé.

Dans le cadre du projet académique, cette matrice ne remplace pas une certification formelle, mais elle montre que la **spécification RF** du système de comptage est cohérente avec les exigences habituelles d'un équipement Wi-Fi 2,4 GHz destiné à un usage intérieur.

7 Dimensionnement et bilan de liaison

Le dimensionnement RF vise à vérifier que, avec les paramètres retenus (puissance, antenne, sensibilité), la liaison Wi-Fi 2,4 GHz entre l'ESP32 et le point d'accès offre une **portée suffisante** (10 à 20 m en intérieur) avec une **marge de liaison** confortable.

7.1 Hypothèses de calcul

Pour le bilan de liaison, on retient les hypothèses suivantes, cohérentes avec les sections précédentes :

- **Fréquence centrale** : $f \approx 2,437$ GHz (canal Wi-Fi 6 typique) ;
- **EIRP de l'ESP32** : $P_{\text{EIRP}} \approx +15$ dBm (limité à ≤ 20 dBm) ;
- **Sensibilité cible du récepteur** : $P_{\text{sens}} \approx -85$ dBm (mode bas débit robuste) ;
- **Portée visée** :
 - scénario typique : $d = 10$ m en intérieur (NLOS léger) ;
 - scénario étendu : $d = 20$ m (LOS ou NLOS modéré).

On utilise comme base la perte de propagation en espace libre (*Free Space Path Loss, FSPL*) donnée par la formule de Friis :

$$L_{\text{FSPL}}(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)$$

avec $\lambda = c/f$ la longueur d'onde.

Pour $f \approx 2,4$ GHz, on obtient à titre indicatif :

- $L_{\text{FSPL}}(10 \text{ m}) \approx 60$ dB ;
- $L_{\text{FSPL}}(20 \text{ m}) \approx 66$ dB.

En environnement intérieur, on ajoute typiquement une **marge supplémentaire** pour tenir compte des murs, réflexions et pertes diverses : de l'ordre de $+10$ à $+15$ dB.

7.2 Bilan de liaison théorique

La puissance reçue peut être estimée par :

$$P_{\text{RX}} \approx P_{\text{EIRP}} - L_{\text{chemin}}$$

où L_{chemin} regroupe la perte de propagation et les pertes supplémentaires dues à l'environnement.

Cas 1 : distance 10 m (NLOS léger)

- $L_{\text{FSPL}}(10 \text{ m}) \approx 60$ dB ;
- marge environnement (murs, mobilier) : ≈ 10 dB ;
- perte totale estimée : $L_{\text{chemin}} \approx 70$ dB.

D'où :

$$P_{\text{RX}} \approx 15 \text{ dBm} - 70 \text{ dB} = -55 \text{ dBm}$$

Comparé à la sensibilité cible $P_{\text{sens}} \approx -85$ dBm, la **marge de liaison** est :

$$M_{10\text{m}} = P_{\text{RX}} - P_{\text{sens}} \approx -55 - (-85) = 30 \text{ dB}$$

Cas 2 : distance 20 m (LOS / NLOS modéré)

- $L_{\text{FSPL}}(20 \text{ m}) \approx 66$ dB ;
- marge environnement : ≈ 10 à 15 dB ;
- perte totale estimée : $L_{\text{chemin}} \approx 76$ à 81 dB.

En prenant un cas légèrement pessimiste $L_{\text{chemin}} \approx 80$ dB :

$$P_{RX} \approx 15 \text{ dBm} - 80 \text{ dB} = -65 \text{ dBm}$$

La marge de liaison devient :

$$M_{20m} = P_{RX} - P_{sens} \approx -65 - (-85) = 20 \text{ dB}$$

7.3 Analyse de la marge de liaison et impact des obstacles

Les résultats précédents montrent que, avec les hypothèses retenues :

- à **10 m** en intérieur, la marge de liaison est d'environ **30 dB**, ce qui est très confortable ;
- à **20 m**, même en ajoutant une marge environnement pessimiste, il reste encore **environ 20 dB** de marge.

Cela signifie que :

- le système peut tolérer des pertes supplémentaires (murs plus épais, personnes, variations de puissance) tout en restant au-dessus de la sensibilité du récepteur ;
- les mécanismes propres au Wi-Fi (modulation adaptative, retransmissions, CSMA/CA) renforceront encore la robustesse de la liaison ;
- la **portée cible de 10 à 20 m en environnement intérieur** est cohérente avec les spécifications RF retenues (EIRP, sensibilité, antenne).

7.4 Discussion et conclusion sur le dimensionnement

Le bilan de liaison simplifié confirme que :

- la puissance d'émission et la sensibilité du module ESP32 sont largement suffisantes pour l'usage visé ;
- la bande 2,4 GHz, malgré la présence d'obstacles et d'autres réseaux, permet d'obtenir une **marge de 20 à 30 dB** sur les distances d'intérêt ;
- les exigences de portée et de qualité de service définies dans la section précédente (taux de trames reçues $\geq 99 \%$ sur 10 m NLOS typique) sont réalistes.

Ce dimensionnement RF constitue une base pour la préparation des **essais de validation** : mesures de RSSI, tests de portée et de taux d'erreur en conditions réelles, qui permettront de vérifier expérimentalement les hypothèses formulées dans ce bilan de liaison.

8 Cybersécurité et protection des données

La liaison radio s'appuie sur un réseau Wi-Fi 2,4 GHz et transporte des données de comptage (IN, OUT, INSIDE). Même si le volume et la sensibilité des données restent limités, il est nécessaire de cadrer la **cybersécurité** et la **protection des données**.

8.1 Menaces principales pour la liaison Wi-Fi

Dans le contexte du projet, les menaces principales sont les suivantes :

- **Accès non autorisé au réseau Wi-Fi** (mot de passe faible, diffusion du SSID) ;
- **Interception du trafic** sur le réseau local si la liaison n'est pas chiffrée ;

- **Modification malveillante des données** (fausses valeurs de comptage injectées) ;
- **Perturbation volontaire** (déconnexion, surcharge du point d'accès).

Même si les données échangées ne sont pas nominatives, une compromission pourrait fausser les indicateurs d'occupation ou dégrader la disponibilité du système.

8.2 Mécanismes de sécurité retenus

Pour le projet, les mécanismes suivants sont considérés comme un socle minimal :

- **Sécurisation du Wi-Fi** :
 - utilisation d'un chiffrement de type **WPA2-PSK** (voire WPA3 si disponible) ;
 - choix d'un **mot de passe robuste** (longueur suffisante, non trivial).
- **Segmentation logique** :
 - l'ESP32 et la Tab5 fonctionnent sur un **réseau local interne** (LAN) non exposé directement sur Internet ;
 - l'accès au service (HTTP/MQTT) peut être limité à des adresses IP internes de confiance.
- **Simplicité des interfaces** :
 - seules les informations nécessaires (IN, OUT, INSIDE, éventuellement état du système) sont exposées ;
 - pas d'interface d'administration ouverte sans contrôle (changements de configuration, mise à zéro non authentifiée, etc.).

Ces mesures restent compatibles avec les recommandations de base de la norme **ETSI EN 303 645** pour les objets connectés grand public (authentification, limitation de surface d'attaque, usage de mécanismes standard de chiffrement).

8.3 Protection des données et confidentialité

Du point de vue des données :

- le système ne traite que des **compteurs anonymes** (nombre d'entrées, de sorties, occupation globale INSIDE) ;
- aucune donnée personnelle (image, identité, identifiant) n'est collectée ni stockée ;
- la Tab5 se limite à l'affichage de ces compteurs et, éventuellement, d'un historique agrégé.

Cela réduit fortement les enjeux de confidentialité (RGPD) : le risque principal se situe davantage au niveau de la **disponibilité** et de l'**intégrité** des données que de leur caractère sensible.

8.4 Limites actuelles et pistes d'amélioration

Dans le cadre d'un projet académique, la sécurité est abordée de manière réaliste mais simplifiée. Les limites et améliorations possibles sont :

- ajout d'une **authentification applicative** (mot de passe ou jeton) pour accéder à l'API de lecture des compteurs ;
- utilisation d'un protocole chiffré de bout en bout (HTTPS ou MQTT sur TLS) si l'infrastructure le permet ;

- mise en place de **journaux d'événements** (log minimal) pour détecter des comportements anormaux (tentatives d'accès répétés, pertes de liaison fréquentes) ;
- documentation d'une procédure de **changement de mot de passe** et de configuration réseau sécurisée.

En résumé, la conception retenue limite volontairement les données manipulées, s'appuie sur un réseau Wi-Fi protégé et évite l'exposition directe sur Internet. Ces choix sont cohérents avec le niveau de risque et les objectifs pédagogiques du système de comptage.

9 Stratégie de test et de validation RF

La stratégie de test vise à vérifier que le système respecte les **spécifications RF** définies : portée, fiabilité, comportement en présence d'autres réseaux Wi-Fi, et cohérence avec le cadre normatif visé (RED + ETSI).

9.1 Essais fonctionnels de base

Objectif : vérifier que la liaison Wi-Fi permet bien l'échange des données de comptage.

- **TF-01** : connexion ESP32 → point d'accès (association, obtention IP).
- **TF-02** : envoi régulier des compteurs IN, OUT, INSIDE et réception correcte sur la Tab5.
- **TF-03** : maintien de la connexion après plusieurs heures de fonctionnement continu.

Critère de validation : pas de déconnexion intempestive, données cohérentes entre affichage local et affichage Tab5.

9.2 Tests de portée et de taux d'erreur

Objectif : vérifier que la portée cible (10 à 20 m) est atteinte avec une qualité de liaison suffisante.

- **TP-01** : mesures à 5 m, 10 m, 15 m, 20 m entre ESP32 et point d'accès :
 - scénario **LOS** (ligne de vue) ;
 - scénario **NLOS** (un mur typique).
- **TP-02** : pour chaque distance, envoi d'un grand nombre de messages (ex. 1000 trames) et comptage du nombre de trames reçues correctement sur la ESP32-P4.

Critère de validation (indicatif) :

- ≥ 99 % de trames reçues à 10 m en NLOS léger ;
- liaison encore fonctionnelle (pertes acceptables) jusqu'à 20 m dans les meilleures conditions.

9.3 Tests de robustesse aux interférences

Objectif : évaluer le comportement du système dans un environnement 2,4 GHz déjà occupé.

- **TR-01** : répétition des tests de portée avec d'autres réseaux Wi-Fi actifs (salles voisines, utilisateurs connectés).

- **TR-02** : génération volontaire de trafic sur le même point d'accès (streaming vidéo, téléchargement) pendant le fonctionnement du dispositif de comptage.

Critère de validation :

- les compteurs restent correctement mis à jour ;
- quelques pertes ponctuelles sont tolérées, mais sans remise en cause de la supervision.

9.4 Vérification de la conformité de principe

Ces tests ne remplacent pas une *campagne de certification* en laboratoire, mais permettent une validation de principe :

- **VP-01** : vérifier que la puissance configurée reste dans la plage attendue (profil ESP32 standard, pas de modification de la chaîne RF).
- **VP-02** : documenter les conditions de test (distances, obstacles, environnement Wi-Fi) et les résultats obtenus (taux de trames reçues, stabilité de la connexion).
- **VP-03** : conclure sur l'alignement du comportement observé avec les **exigences RF** définies (portée, fiabilité, robustesse aux interférences).

La stratégie de test ainsi définie fournit un **niveau de confiance suffisant** pour un projet académique : elle démontre que la partie radio du système fonctionne conformément aux hypothèses de dimensionnement et aux objectifs de portée et de qualité de service.

10 Analyse des risques radio et mesures de mitigation

La liaison Wi-Fi 2,4 GHz entre l'ESP32 et le point d'accès est soumise à plusieurs **risques radio** pouvant impacter la disponibilité ou la qualité des données de comptage. Cette section présente les principaux risques identifiés et les mesures de mitigation associées.

10.1 Principaux risques radio identifiés

R1 – Perte de liaison Wi-Fi

- **Cause** : éloignement excessif, obstacles (murs épais, structure métallique), chute de niveau de signal (RSSI trop faible), perturbations temporaires du point d'accès.
- **Effet** : impossibilité de remonter les compteurs vers la Tab5, affichage figé ou retardé.

R2 – Brouillage et saturation du canal 2,4 GHz

- **Cause** : forte densité de réseaux Wi-Fi voisins, trafic important sur le même point d'accès, présence d'autres systèmes 2,4 GHz (Bluetooth, objets connectés).
- **Effet** : augmentation du taux de trames perdues, latence élevée, instabilité de la supervision.

R3 – Mauvaise intégration de l'antenne

- **Cause** : antenne PCB trop proche de masses métalliques, câbles ou boîtier inadapté (métallique), orientation défavorable.
- **Effet** : dégradation du gain effectif, détunage, réduction significative de la portée.

R4 – Configuration réseau inadaptée

- **Cause** : choix de canal très encombré, puissance du point d'accès mal réglée, paramètres Wi-Fi non optimaux (bandes mixtes, surcharge sur un seul AP).
- **Effet** : performances radio inférieures aux capacités théoriques (pertes, temps de réponse).

10.2 Mesures de mitigation envisagées

M1 – Placement et installation maîtrisés

- installer le dispositif de comptage de manière à limiter les obstacles entre l'ESP32 et le point d'accès ;
- éviter les boîtiers métalliques et dégager la zone autour de l'antenne PCB (position en bord de boîtier) ;
- si possible, positionner le point d'accès de façon à couvrir correctement la zone de la porte surveillée.

M2 – Optimisation de la configuration Wi-Fi

- choisir un canal 2,4 GHz moins encombré (par exemple parmi 1, 6 ou 11) après un scan rudimentaire ;
- s'assurer que le point d'accès ne regroupe pas un trafic trop important sur un seul SSID ;
- limiter le nombre de clients connectés sur le même AP lorsque cela est possible.

M3 – Gestion logicielle de la liaison

- mettre en place une **reconnexion automatique** de l'ESP32 en cas de perte de Wi-Fi ;
- bufferiser localement les compteurs en cas d'interruption temporaire de la liaison, puis resynchroniser lorsque la connexion est rétablie ;
- surveiller un indicateur simple (RSSI, temps depuis la dernière trame reçue) pour détecter des dégradations de liaison et, éventuellement, les afficher côté ESP32-P4.

M4 – Validation sur site et ajustements

- réaliser des tests de portée et de qualité de liaison dans l'environnement réel d'utilisation (salle, couloir, bâtiment) ;
- ajuster, si nécessaire, la position du dispositif, du point d'accès ou la configuration de canal ;
- documenter les conditions d'installation recommandées (distance maximale, obstacles, type de cloison).

10.3 Synthèse

En résumé, les risques radio identifiés portent principalement sur la **perte de liaison**, le **brouillage en bande 2,4 GHz** et une éventuelle **dégradation d'antenne** liée à l'intégration mécanique. Les mesures proposées (placement soigné, choix de canal adapté, mécanismes de

reconnexion et tests in situ) permettent de réduire significativement la probabilité et l'impact de ces risques, et de garantir un **fonctionnement fiable** du système de comptage dans son environnement cible.

11 Conclusion et perspectives

11.1 Synthèse de la spécification RF

La présente spécification a défini le **cadre radiofréquence** du système de comptage d'entrées / sorties basé sur une carte ESP32 et une liaison Wi-Fi 2,4 GHz vers un ESP32-P4.

Les points clés peuvent être résumés ainsi :

- choix d'une **technologie standard** (Wi-Fi 2,4 GHz, IEEE 802.11 b/g/n) opérant dans la bande ISM 2400–2483,5 MHz ;
- utilisation d'un **module ESP32** intégrant radio, pile réseau et traitement applicatif, avec antenne PCB Inverted-F adaptée ;
- définition de **paramètres RF cibles** : EIRP typique ≈ 15 dBm, sensibilité ≤ -85 dBm, VSWR $< 2:1$, portée utile 10–20 m en environnement intérieur ;
- prise en compte du **cadre réglementaire** (directive RED, normes ETSI, CEPT ERC/REC 70-03, EN 62368-1) pour assurer une utilisation réaliste du spectre et une sécurité suffisante ;
- intégration d'aspects de **cybersécurité** et de protection des données, adaptés à un système manipulant des compteurs anonymes sur un réseau local sécurisé.

Les bilans de liaison simplifiés montrent que, pour les distances visées et avec les hypothèses retenues, la marge de liaison est confortable (20 à 30 dB), ce qui valide le dimensionnement RF pour un usage en intérieur.

11.2 Bilan par rapport aux exigences normatives et projet

Au regard des exigences définies dans le document :

- les exigences de **bande, puissance et émissions** (RF-01 à RF-05) sont satisfaites de principe par l'usage d'un module Wi-Fi ESP32 conçu pour se conformer aux normes ETSI en bande 2,4 GHz ;
- les exigences de **portée et de qualité de service** (RF-06 à RF-08) sont cohérentes avec les performances théoriques attendues et seront confortées par les essais de portée et de taux d'erreur ;
- les exigences liées à l'**antenne et à l'intégration** (RF-09, RF-10) peuvent être respectées par un placement correct du module dans un boîtier non métallique avec dégagement autour de l'antenne ;
- les exigences de **sécurité et d'environnement** (RF-11) sont compatibles avec une alimentation basse tension, un boîtier fermé et une puissance RF limitée (100 mW).

Pour un **projet académique**, le niveau de détail atteint est suffisant pour démontrer que la partie radio n'est pas traitée de manière empirique, mais s'inscrit dans une démarche structurée prenant en compte les aspects techniques, réglementaires et d'usage.

11.3 Perspectives d'évolution

Plusieurs pistes d'évolution peuvent être envisagées pour approfondir ou industrialiser le système :

- **Renforcement de la cybersécurité :**
 - ajout d'authentification applicative (API protégée, jetons d'accès) ;
 - passage à des protocoles chiffrés de bout en bout (HTTPS, MQTT/TLS).
- **Élargissement de l'architecture réseau :**
 - gestion de **plusieurs dispositifs de comptage** sur le même réseau Wi-Fi ;
 - centralisation des données sur un serveur ou une passerelle pour des analyses plus avancées (historique, statistiques d'occupation).
- **Exploration d'autres technologies radio** (en complément du Wi-Fi) :
 - étude comparative avec des solutions sub-GHz ou LoRa pour des scénarios de grande portée ;
 - utilisation éventuelle de la bande 5 GHz pour réduire la congestion en environnement très chargé.
- **Validation avancée :**
 - mesures expérimentales approfondies (RSSI, taux d'erreur, robustesse aux interférences) ;
 - préparation, à titre pédagogique, d'un *dossier de présélection* en vue d'une future certification RED.

Ainsi, cette spécification RF constitue une **base solide** pour le projet actuel de compteur entrées / sorties et un point de départ pour de futures évolutions vers des systèmes de comptage et de supervision plus complets et plus fortement industrialisables.

ANNEXES

A Fiches techniques du module ESP32-WROOM-32 et de l'antenne

Cette annexe présente de manière synthétique les caractéristiques principales du **module ESP32-WROOM-32** utilisé dans le projet ainsi que de son antenne intégrée.

A.1 Module ESP32-WROOM-32

Vue d'ensemble

- **Type** : module Wi-Fi / Bluetooth basé sur SoC **ESP32**.
- **Fonctions intégrées** :
 - microcontrôleur double coeur 32 bits (Xtensa) ;
 - transceiver Wi-Fi 2,4 GHz IEEE 802.11 b/g/n ;
 - transceiver Bluetooth (BR/EDR + BLE) ;
 - mémoire Flash intégrée (typiquement 4 Mo).
- **Format** : module monté en surface (SMD), avec blindage métallique et antenne PCB intégrée.

Caractéristiques électriques principales

- **Tension d'alimentation** : 3,0 V à 3,6 V (valeur typique 3,3 V).
- **Consommation** (ordres de grandeur) :
 - mode Wi-Fi actif Tx/Rx : quelques centaines de mA en crête ;
 - mode veille profonde : quelques dizaines de μ A.
- **Température de fonctionnement** : typiquement $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ (limites constructeurs), projet visé : $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ (intérieur).

Caractéristiques Wi-Fi (2,4 GHz)

- **Normes supportées** : IEEE 802.11 b/g/n (2,4 GHz).
- **Bande de fréquences** : 2400–2483,5 MHz (canaux 1 à 13 selon région).
- **Puissance de sortie Tx** (typique, suivant débit) :
 - de l'ordre de +10 à +15 dBm en 2,4 GHz, avant gain d'antenne.
- **Sensibilité Rx** (ordres de grandeur) :
 - jusqu'à $\approx -90\text{ dBm}$ en 802.11b bas débit ;
 - meilleure que -80 dBm pour les débits usuels.
- **Canal** : largeur typique 20 MHz ; prise en charge des canaux définis par la norme.

Interfaces et E/S utiles pour le projet

- **Interfaces de communication** :
 - UART, SPI, I²C, I2S, etc. ;
 - interface Wi-Fi via pile TCP/IP intégrée (ESP-IDF / Arduino).

- **GPIO** :
 - broches configurables pour capteurs ultrasoniques (trig/echo), affichage, LEDs ;
 - certaines broches réservées / à éviter au boot (strapping).

A.2 Antenne intégrée du module

Type et principe

- **Type d'antenne** : antenne **PCB Inverted-F** (IFA) intégrée sur le module.
- **Impédance nominale** : $50\ \Omega$ (adaptation réalisée sur le module).
- **Utilisation** : émission et réception Wi-Fi 2,4 GHz (et Bluetooth).

Caractéristiques RF principales

- **Gain typique** : $\approx +2$ dBi en bande 2,4 GHz.
- **Diagramme de rayonnement** :
 - quasi omnidirectionnel dans le plan horizontal autour du module ;
 - dépendant de l'orientation mécanique et de la proximité des masses.
- **Polarisation** : linéaire (approximativement verticale lorsqu'orientée selon les recommandations constructeur).
- **VSWR visé** : $< 2:1$ sur 2400–2483,5 MHz, si les recommandations d'intégration sont respectées.

Recommandations d'intégration mécanique

- placer le module de sorte que l'antenne soit située au **bord du PCB** principal, avec une zone dégagée à proximité ;
- éviter les **boîtiers métalliques** ou écrans proches de l'antenne ;
- utiliser un boîtier en matériau **non métallique** (plastique) pour limiter la détuning ;
- éviter de routage de **pistes ou câbles** immédiatement sous ou devant l'antenne.

Lien avec le projet de comptage

Dans le cadre du système de comptage d'entrées / sorties :

- l'antenne intégrée du module ESP32-WROOM-32 est utilisée *telle quelle*, sans réseau d'adaptation RF supplémentaire ;
- les caractéristiques de gain, de polarisation et de VSWR sont celles prises en compte dans le **bilan de liaison** et les **spécifications RF** du rapport ;
- le respect des consignes d'intégration mécanique permet de conserver la portée cible de 10–20 m en environnement intérieur.

B Captures de l'outil de spécification RF / formulaire CEPT

Cette annexe présente, sous forme de captures d'écran, les éléments principaux utilisés pour documenter et vérifier la conformité RF du système :

- l'**outil de spécification RF** (ou feuille de calcul interne) ;

- le **formulaire CEPT / ERC 70-03** ou équivalent, utilisé comme référence pour la bande ISM 2,4 GHz.

Les fichiers d'image mentionnés ci-dessous sont à remplacer par les captures réelles (.png, .jpg) lors de la finalisation du rapport.

B.1 Capture de l'outil de spécification RF

1. GENERAL SPECIFICATIONS

System Type

Transceiver

Device Category

SRD

CEPT Rec. 70-03 Annex

Annex 3: Wideband Data Transmission

Station Type

End-User Terminal / Indoor fixed device

Application

People counting / building occupancy monitoring

Intended Use

Wi-Fi IoT sensor node (ESP32) reporting counters to tablet

Main Target Market

Europe (EU/CEPT), France

Operating Mode

Duplex (time-division, Wi-Fi TDD)

2. FREQUENCY SPECIFICATIONS

EFIS Verification: Use ECO Frequency Information System

[Open EFIS Database](#)

Frequency Range

2400.0 – 2483.5 MHz

Center Frequency

2437 MHz (Wi-Fi channel 6, typical)

Channel Spacing

5 MHz

Bandwidth

20 MHz (Wi-Fi 20 MHz channel)

☐ EFIS Verified

EFIS Notes

Licence-exempt ISM band per CEPT ERC/REC 70-03 Annex 3, max 100 mW e.i.r.p.

3. TRANSMITTER SPECIFICATIONS

Output Power

Typ. 15 dBm EIRP (max 20 dBm EIRP per CEPT / EN 300 328)

Frequency Stability

± 20 ppm (ESP32 internal oscillator, indoor use)

Spurious Emission

Compliant with ETSI EN 300 328

Modulation

IEEE 802.11 b/g/n (DSSS, OFDM)

4. RECEIVER SPECIFICATIONS

Sensitivity

≈ -85 dBm (robust low-rate modes)

Selectivity

> 35 dB to adjacent channels

Noise Figure

< 8 dB (typical 2.4 GHz Wi-Fi receiver)

Dynamic Range

≈ 80 dB (-90 dBm to -10 dBm)

5. ANTENNA SPECIFICATIONS

Implementation Type

Select

Type

PCB Inverted-F antenna (IFA) on ESP32-WROOM-32

Gain

$\approx +2$ dBi

VSWR

$< 2:1$ over 2400–2483.5 MHz

Polarization

Linear, approximately vertical

6. FEATURES & CHARACTERISTICS

Input Voltage

5 V DC (external) – on-board 3.3 V regulator for ESP32

Power Consumption

Average < 1 W; Wi-Fi TX peaks $\approx 2\text{--}3$ W at 5 V

Temperature Range

0 °C to +40 °C (indoor use)

Humidity

10 % to 90 % RH, non-condensing

Dimensions

$\approx 100 \times 60 \times 40$ mm (example enclosure)*

Weight

≈ 150 g

7. RF CHIPSET

Manufacturer

Espressif

Model

ESP32-WROOM-32

Details


2.4 GHz Wi-Fi (IEEE 802.11 b/g/n) + BT SoC, integrated PA, LNA and PCB antenna, up to 100 mW EIRP.

Application Note URL


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

[→ Open Application Note](#)


8. STANDARDS & CERTIFICATIONS

 **Genorma Standards Search:** Automatic search based on your Application field

[→ Search for "People counting / building occupancy monitoring" standards on Genorma](#)

 **Market Access Requirements:** Regulatory search by country (360compliance)

[→ Market access requirements for "Europe \(EU/CEPT\), France"](#)

 **FCC ID Report:** FCC certification report for chipset/radio module

FCC-ID (Chipset/Module Radio)

2AC7Z-ESPWROOM32

[→ View FCC ID report: 2AC7Z-ESPWROOM32](#)

IEC (Safety)

IEC 62368-1

IEC (EMC)

IEC 61000-6-3, IEC 61000-6-1

CENELEC (Safety)

EN 62368-1

CENELEC (EMC)

EN 55032, EN 55035

ETSI

ETSI EN 300 328, ETSI EN 301 489-1, ETSI EN 301 489-17

IEEE

IEEE 802.11

3GPP

N/A

Certifications

Intended for CE (RED) compliance – academic prototype

10. CYBERSECURITY

Common CyberSecurity Standards:

- IEC 62443-3/-4: Industrial Automation & Control Systems Security
- EN 18031-1/-2/-3: Consumer IoT Security
- ETSI EN 303 645: Cyber Security for Consumer IoT
- ISO/IEC 27001: Information Security Management Systems

Applicable CyberSecurity Standards

ETSI EN 303 645; IEC 62443-3-2, 62443-3-3, 62443-4-1; ISO/IEC 27001 (as guidance for secure design).

12. SAR SAFETY

Important: SAR measures RF energy absorption (EU: 2 W/kg head/body, 4 W/kg limbs)

Foreseeable Use Cases

- ☐ Head Contact
- ☒ Body Contact
- ☐ Arms/Legs Contact

SAR Limit

2.0 W/kg EU Head/Body

SAR Notes

Fixed indoor installation; antenna typically > 20 cm from body. Max EIRP \leq 100 mW, far below public SAR

FIGURE 3 – Exemples d'écrans de l'outil de spécification RF (1/2).

Ces captures illustrent la manière dont sont regroupés et renseignés :

- la bande de fréquence utilisée (2400–2483,5 MHz) ;
- la puissance d’émission / EIRP ;
- les caractéristiques d’antenne (gain, type, VSWR) ;
- les hypothèses de portée et de pertes de propagation utilisées pour le bilan de liaison.

B.2 Capture du formulaire CEPT / ERC 70-03

	Frequency Band	Power / Magnetic Field	Spectrum access and mitigation requirements	Channle spacing	ECC/ERC Decision	Notes
a	2400.0–2483.5 MHz	100 mW e.i.r.p.	Adequate spectrum sharing mechanism (e.g. Listen-before-Talk, Detect-And-Avoid) shall be implemented by the equipment	No spacing		For wide band modulations other than FHSS, the maximum e.i.r.p. density is limited to 10 mW/MHz

FIGURE 4 – Extrait de l’Annexe 3 de la recommandation CEPT ERC/REC 70-03 : la bande 2400–2483,5 MHz est autorisée pour des systèmes de transmission large bande (WLAN/RLAN) avec une puissance maximale de 100 mW e.i.r.p., sous réserve de mécanismes de partage du spectre, et renvoie à la norme harmonisée ETSI EN 300 328.

La capture du formulaire CEPT met en évidence :

- le **statut** de la bande 2400–2483,5 MHz (bande ISM) ;
- les **puissances maximales** autorisées pour les dispositifs de type RLAN / SRD ;
- les conditions d’utilisation générales (bande libre de licence, absence de protection individuelle, coexistence avec d’autres systèmes).

B.3 Lien avec la spécification du projet

Les captures présentées dans cette annexe servent de **trace documentaire** pour :

- montrer comment les paramètres RF retenus dans le rapport (bande, puissance, antenne, portée) ont été saisis et structurés dans l’outil de spécification ;
- illustrer le lien direct entre la **bande utilisée** par le système (Wi-Fi 2,4 GHz) et les **références réglementaires** de la recommandation CEPT ERC 70-03 ;
- faciliter, le cas échéant, une mise à jour ultérieure des paramètres si le projet évolue (autre bande, autre technologie radio).

En pratique, lors de la mise en forme finale du rapport, il suffira de :

- placer les fichiers `outil_spec.f.pnget`
 - adapter les chemins dans les commandes `\includegraphics` en conséquence.

C Détails des calculs de bilan de liaison

Cette annexe présente les calculs détaillés du **bilan de liaison** pour la liaison Wi-Fi 2,4 GHz entre le dispositif de comptage (ESP32) et le point d’accès. L’objectif est de justifier numériquement la *marge de liaison* annoncée dans le corps du rapport.

C.1 Rappel des formules utilisées

Longueur d'onde

La longueur d'onde associée à la fréquence de travail f est donnée par :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

où :

- $c \approx 3 \times 10^8$ m/s : vitesse de la lumière dans l'air,
- f : fréquence en Hz.

Pour $f = 2,437$ GHz (canal Wi-Fi 6 typique) :

$$f = 2,437 \times 10^9 \text{ Hz} \quad \Rightarrow \quad \lambda = \frac{3 \times 10^8}{2,437 \times 10^9} \approx 0,123 \text{ m}$$

Perte de propagation en espace libre (FSPL)

La perte en espace libre (*Free Space Path Loss*) entre un émetteur et un récepteur séparés par une distance d est donnée par :

$$L_{\text{FSPL}}(d) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) \quad [\text{dB}]$$

En pratique, on utilise souvent la forme normalisée (avec d en km et f en MHz) :

$$L_{\text{FSPL}}(d) = 32,44 + 20 \log_{10}(d \text{ [km]}) + 20 \log_{10}(f \text{ [MHz]})$$

Bilan de liaison

La puissance reçue P_{RX} (en dBm) s'écrit :

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} + G_{\text{RX}} - L_{\text{FSPL}}(d) - L_{\text{env}}$$

où :

- P_{TX} : puissance de sortie de l'émetteur (dBm),
- G_{TX} : gain de l'antenne d'émission (dBi),
- G_{RX} : gain de l'antenne de réception (dBi),
- $L_{\text{FSPL}}(d)$: perte en espace libre (dB),
- L_{env} : pertes supplémentaires dues à l'environnement (murs, mobilier, etc.) (dB).

On définit la **marge de liaison** M comme :

$$M = P_{\text{RX}} - P_{\text{sens}}$$

où P_{sens} est la sensibilité (niveau minimal détectable) du récepteur.

C.2 Paramètres numériques utilisés

Pour le dimensionnement, on retient les valeurs suivantes (ordres de grandeur typiques) :

- fréquence centrale : $f = 2,437$ GHz (canal 6) ;
 - puissance de sortie ESP32 : $P_{\text{TX}} \approx +13$ dBm (valeur typique) ;
 - gain antenne ESP32 : $G_{\text{TX}} \approx +2$ dBi ;
 - gain antenne point d'accès (ou Tab5) : $G_{\text{RX}} \approx +2$ dBi (ordre de grandeur) ;
 - EIRP typique : $P_{\text{EIRP}} = P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} \approx +15$ dBm ;
 - sensibilité cible récepteur : $P_{\text{sens}} \approx -85$ dBm (mode bas débit robuste) ;
 - pertes environnementales : L_{env} de l'ordre de 10 à 15 dB en intérieur (murs, mobilier).
- Dans les calculs suivants, on supposera pour simplifier :

$$G_{\text{RX}} \approx 0 \text{ dBi}$$

(cela revient à considérer que le gain côté réception est nul ou inclus dans la marge globale).

C.3 Calculs détaillés pour 10 m et 20 m

C.3.1 Cas 1 : distance 10 m

Étape 1 : perte en espace libre On convertit la distance en km :

$$d = 10 \text{ m} = 0,01 \text{ km}$$

et la fréquence en MHz :

$$f = 2437 \text{ MHz}$$

On applique la formule normalisée :

$$L_{\text{FSPL}}(10 \text{ m}) = 32,44 + 20 \log_{10}(0,01) + 20 \log_{10}(2437)$$

Calcul intermédiaire :

$$20 \log_{10}(0,01) = 20 \times (-2) = -40 \text{ dB}$$

$$20 \log_{10}(2437) \approx 20 \times 3,387 \approx 67,74 \text{ dB}$$

Donc :

$$L_{\text{FSPL}}(10 \text{ m}) \approx 32,44 - 40 + 67,74 \approx 60,18 \text{ dB}$$

On arrondit :

$$L_{\text{FSPL}}(10 \text{ m}) \approx 60 \text{ dB}$$

Étape 2 : ajout des pertes environnementales On ajoute une marge L_{env} pour tenir compte d'un environnement intérieur (un mur, mobilier) :

$$L_{\text{env}} \approx 10 \text{ dB}$$

Perte totale :

$$L_{\text{chemin}}(10 \text{ m}) = L_{\text{FSPL}} + L_{\text{env}} \approx 60 + 10 = 70 \text{ dB}$$

Étape 3 : puissance reçue et marge de liaison On calcule la puissance reçue :

$$P_{RX}(10 \text{ m}) = P_{EIRP} - L_{\text{chemin}} \approx 15 \text{ dBm} - 70 \text{ dB} = -55 \text{ dBm}$$

Marge de liaison :

$$M_{10\text{m}} = P_{RX}(10 \text{ m}) - P_{\text{sens}} = -55 - (-85) = 30 \text{ dB}$$

C.3.2 Cas 2 : distance 20 m

Étape 1 : perte en espace libre

$$d = 20 \text{ m} = 0,02 \text{ km}$$

$$L_{\text{FSPL}}(20 \text{ m}) = 32,44 + 20 \log_{10}(0,02) + 20 \log_{10}(2437)$$

Calcul intermédiaire :

$$20 \log_{10}(0,02) = 20 \times \log_{10}(2 \times 10^{-2}) = 20 \times (\log_{10} 2 - 2) \approx 20 \times (0,301 - 2) \approx 20 \times (-1,699) \approx -34 \text{ dB}$$

Donc :

$$L_{\text{FSPL}}(20 \text{ m}) \approx 32,44 - 34 + 67,74 \approx 66,18 \text{ dB}$$

On arrondit :

$$L_{\text{FSPL}}(20 \text{ m}) \approx 66 \text{ dB}$$

Étape 2 : ajout des pertes environnementales Pour une distance plus grande et des obstacles possibles supplémentaires, on peut prendre une marge environnementale un peu plus pessimiste, par exemple :

$$L_{\text{env}} \approx 14 \text{ dB}$$

Perte totale :

$$L_{\text{chemin}}(20 \text{ m}) = 66 + 14 = 80 \text{ dB}$$

Étape 3 : puissance reçue et marge de liaison

$$P_{RX}(20 \text{ m}) = P_{EIRP} - L_{\text{chemin}} \approx 15 \text{ dBm} - 80 \text{ dB} = -65 \text{ dBm}$$

Marge de liaison :

$$M_{20\text{m}} = P_{RX}(20 \text{ m}) - P_{\text{sens}} = -65 - (-85) = 20 \text{ dB}$$

C.4 Tableau récapitulatif

Distance	L_{FSPL}	L_{env}	P_{RX}	Marge M
10 m	$\approx 60 \text{ dB}$	10 dB	-55 dBm	30 dB
20 m	$\approx 66 \text{ dB}$	14 dB	-65 dBm	20 dB

C.5 Commentaire sur les résultats

Les calculs montrent que :

- à 10 m en intérieur, la marge de liaison est de l'ordre de **30 dB**, ce qui laisse une grande tolérance aux variations de l'environnement (personnes, mobilier, fluctuations de puissance) ;
- à 20 m, une marge de l'ordre de **20 dB** reste disponible, ce qui est encore confortable pour une liaison Wi-Fi fonctionnant en modes de modulation robustes ;
- ces marges expliquent pourquoi la portée cible de **10 à 20 m** est réaliste pour le système de comptage, en cohérence avec les exigences RF fixées dans le rapport principal.

Ces calculs peuvent être complétés, si besoin, par des **mesures de RSSI** et de taux d'erreur en conditions réelles, afin de confronter les résultats théoriques aux performances observées sur site.

D Tableaux complets d'exigences RF

Cette annexe regroupe les **exigences RF** définies dans le rapport sous forme de tableaux synthétiques : 1) liste des exigences, 2) mode de vérification associé.

D.1 Liste des exigences RF

ID	Intitulé	Catégorie	Description synthétique
RF-01	Bande de fonctionnement	Spectre	Le système doit fonctionner dans la bande ISM 2400–2483,5 MHz (Wi-Fi 2,4 GHz).
RF-02	Utilisation efficace du spectre	Spectre / Normes	La liaison doit respecter les mécanismes d'accès 802.11 (CSMA/CA) et les contraintes EN 300 328.
RF-03	EIRP maximale	Puissance	L'EIRP doit rester ≤ 20 dBm (100 mW) en bande 2,4 GHz.
RF-04	Émissions hors bande / spurious	CEM / Spectre	Les émissions hors bande et parasites doivent respecter les limites d'EN 300 328.
RF-05	Compatibilité électromagnétique	CEM	Le système doit répondre aux exigences CEM des normes EN 301 489-1 et EN 301 489-17.
RF-06	Sensibilité minimale	Réception	La chaîne RX doit permettre la réception de signaux d'au moins -85 dBm dans les modes utilisés.
RF-07	Portée utile	Performance	La liaison doit être opérationnelle sur 10–20 m en intérieur, avec un taux de trames reçues $\geq 99\%$ à 10 m NLOS typique.
RF-08	Robustesse aux interférences	Performance / CEM	Le système doit rester fonctionnel en présence d'autres réseaux Wi-Fi / équipements 2,4 GHz (environnement tertiaire standard).
RF-09	Antenne et adaptation	Antenne	L'antenne doit présenter un gain $\approx +2$ dBi, une impédance $50\ \Omega$ et un VSWR $< 2:1$.
RF-10	Intégration mécanique de l'antenne	Antenne / Mécanique	L'antenne doit être intégrée dans un boîtier non métallique, avec dégagement vis-à-vis des masses métalliques.
RF-11	Sécurité / exposition EM	Sécurité	Le dispositif doit respecter les principes EN 62368-1 (basses tensions, boîtier fermé) et garantir une exposition très inférieure aux limites SAR usuelles.

D.2 Modes de vérification associés

ID	Type d'exigence	Mode de vérification	Remarques
RF-01	Spécification / Normative	Analyse documentaire (datasheet ESP32, doc Wi-Fi)	Vérification que le module opère bien en 2,4 GHz.
RF-02	Normative	Analyse documentaire + configuration PA	Vérification des modes 802.11 utilisés et des paramètres de canal.
RF-03	Spécification quantitative	Analyse constructeur + mesure éventuelle	Utilisation du profil de puissance standard ESP32 (≤ 20 dBm EIRP).
RF-04	Normative	Analyse constructive (module certifiable)	Confiance dans le design RF intégré de l'ESP32 conforme EN 300 328.
RF-05	Normative CEM	Analyse documentaire	Référence aux normes EN 301 489-1 / -17 (pas de tests labo complets dans le projet).
RF-06	Performance RX	Analyse datasheet + bilan de liaison	Utilisation de la sensibilité typique ESP32 et vérification par calcul.
RF-07	Performance / Portée	Essais terrain (tests de portée et taux de trames)	Mesures à 5, 10, 15, 20 m en LOS/NLOS.
RF-08	Robustesse interférences	Essais terrain	Tests en environnement 2,4 GHz chargé (autres Wi-Fi, trafic).
RF-09	Antenne	Inspection matérielle + éventuellement mesure VSWR (optionnel)	Respect des règles d'intégration recommandées pour le module ESP32.
RF-10	Antenne / mécanique	Inspection de l'intégration	Vérification boîtier non métallique, position du module, dégagement autour de l'antenne.
RF-11	Sécurité / exposition EM	Analyse documentaire	Puissance limitée, installation fixe, boîtier fermé; cohérence avec EN 62368-1 et limites SAR.

Ces tableaux fournissent une vue d'ensemble structurée des **exigences RF** du projet, du type d'exigence (spectre, puissance, CEM, antenne, sécurité) et des **modes de vérification** envisagés dans le cadre du projet académique.

E Glossaire des acronymes RF et réseaux

Cette annexe regroupe les principaux acronymes utilisés dans la spécification RF.

RF Radio Frequency : radiofréquence.

ISM Industrial, Scientific and Medical : bande de fréquences libre de licence pour des usages industriels, scientifiques et médicaux.

Wi-Fi Wireless Fidelity : technologie de réseau local sans fil basée sur la famille de normes IEEE 802.11.

WLAN Wireless Local Area Network : réseau local sans fil.

LAN Local Area Network : réseau local (filaire ou sans fil).

ESP32 Microcontrôleur de la société Espressif intégrant Wi-Fi 2,4 GHz, Bluetooth et une pile TCP/IP.

ETSI European Telecommunications Standards Institute : organisme européen de normalisation pour les télécommunications.

RED Radio Equipment Directive (2014/53/UE) : directive européenne sur les équipements radio.

CEPT European Conference of Postal and Telecommunications Administrations : conférence européenne des administrations des postes et télécoms.

EIRP Equivalent Isotropically Radiated Power : puissance isotrope rayonnée équivalente (dBm).

dBm Puissance exprimée en décibels par rapport à 1 mW.

dB_i Gain d'antenne exprimé en décibels par rapport à une antenne isotrope.

FSPL Free Space Path Loss : perte de propagation en espace libre.

LOS Line Of Sight : visibilité radio directe entre émetteur et récepteur.

NLOS Non Line Of Sight : absence de visibilité directe (présence d'obstacles).

RSSI Received Signal Strength Indicator : indicateur de niveau de signal reçu.

CEM / EMC Compatibilité électromagnétique (*ElectroMagnetic Compatibility*) : cohabitation des équipements du point de vue des perturbations électromagnétiques.

SAR Specific Absorption Rate : débit d'absorption spécifique (exposition du corps aux champs EM).

PA Power Amplifier : amplificateur de puissance RF en émission.

LNA Low Noise Amplifier : amplificateur à faible bruit en réception.

VSWR Voltage Standing Wave Ratio : rapport d'ondes stationnaires en tension (qualité d'adaptation).

IFA Inverted-F Antenna : antenne en F inversé, souvent intégrée sur PCB.

TCP/IP Transmission Control Protocol / Internet Protocol : pile de protocoles de base des réseaux IP.

HTTP HyperText Transfer Protocol : protocole applicatif utilisé pour le Web et les API REST.

MQTT Message Queuing Telemetry Transport : protocole de messagerie publish/subscribe léger pour l'IoT.

SSID Service Set Identifier : nom logique d'un réseau Wi-Fi.