

Spécification Fonctionnelles détaillées

Projet ZoneAlert

**Système de détection et d'alerte sans fil
pour la surveillance d'espaces**

Version 1.0

25/11/2025

Marvin STIEBITZ

1 Révisions et approbations

ENREGISTREMENT DES MODIFICATIONS			
Révision	Date	Auteur	Modifications
--	25/11/2025	Marvin STIEBITZ	Création du document

	Nom	Rôle	Date	Signature
Créé par	M.STIEBITZ	Apprenti Ingénieur	10/11/2025	
Approuvé par	H. LATRACHE	Responsable SEE5	26/11/2025	
Vérifié par	H. LATRACHE	Responsable SEE5	26/11/2025	

Table des matières

1	Révisions et approbations	1
2	Introduction générale	4
2.1	Contexte du projet	4
2.2	Objectif du produit	5
2.3	Définition des besoins utilisateurs	6
3	Analyse fonctionnelle du produit	7
3.1	Fonctions principales.....	7
3.2	Fonctions secondaires.....	7
3.3	Diagramme FAST	9
3.4	Must and Nice.....	10
4	Exigences et description détaillée des solutions	11
4.1	Diagramme des exigences	11
4.2	Partie Acquisition (ESP32 WROOM).....	11
4.3	Partie Traitement, affichage et alerte (M5TAB5)	12
5	Environnement normatif et réglementaire	15
5.1	Les normes essentielles (ETSI).....	15
5.2	Spécification Radio.....	16
5.3	Spécification CEM	18
5.4	Spécification sécurité.....	19
6	Contraintes techniques générales.....	20
6.1	Environnement matériel.....	20
6.2	Interfaces de communication.....	20
7	Sécurité et cybersécurité.....	21
7.1	Sécurité physique et électrique	21
7.2	Sécurité logicielle et communication.....	22
8	Performances et validation.....	23
8.1	Méthodologie de test	23
8.2	Présentation d'un cas de test représentatif	24
8.3	Analyse de conformité des normes	26
8.3.1	Conformité radio (Normes EN 300 328).....	27
8.3.2	Compatibilité électromagnétique (EN 301 489-17)	28
8.3.3	Sécurité électrique (EN 62368-1).....	28
8.3.4	Exposition RF (EN 62311)	29
8.4	Analyse de conformité fonctionnelle	29

8.4.1	Détection par capteur à ultrason	30
8.4.2	Balayage angulaire du servomoteur	30
8.4.3	Transmissions Wi-Fi entre modules	30
8.4.4	Affichage et interface utilisateur	31
8.4.5	Fonction ON/OFF	31
8.4.6	Gestion des seuils de distance	31
8.4.7	Buzzer et alerte sonore	32
8.4.8	Notifications distantes via Pushover	32
8.4.9	Cohérence globale du système	32
9	Conclusion	33
10	Bibliographie	34
11	Annexes	35

2 Introduction générale

Ce document constitue la spécification produit du système ZoneAlert. Il définit l'ensemble des exigences fonctionnelles et techniques, les performances attendues ainsi que les critères de validation nécessaires à la conception, à l'intégration et à la qualification du produit. Il sert de référence pour la conception matérielle et logicielle, les essais de conformité (radio, CEM, sécurité) et la validation finale du produit avant sa mise sur le marché.

2.1 Contexte du projet

Le projet ZoneAlert s'inscrit dans la conception d'un système de détection et d'alerte sans fil destiné à surveiller une zone donnée et à signaler la présence d'obstacles ou d'intrusions potentielles.

Son objectif est d'offrir une solution simple, connectée et conforme aux exigences normatives en vigueur (ETSI, RED, CEM), adaptée aussi bien à des environnements domestiques qu'à des applications industrielles légères.

Le système repose sur une chaîne fonctionnelle composée de trois éléments principaux :

- Partie ESP32 Wroom :
 - Chargé d'assurer la mesure de distance sur 180° par un capteur ultrasonique HC-SR04 ainsi que la transmission des données par Wi-Fi 2,4 GHz
- Partie M5TAB5 :
 - Assure le traitement des mesures, le calcul de la médiane, l'affichage graphique et la génération d'alertes (buzzer et interface)
- Partie notification à distance :
 - Permet d'avertir l'utilisateur directement sur son smartphone via une application pour une surveillance et une réactivité optimale

ZoneAlert a été conçu pour être un produit compact, modulaire et évolutif, capable d'être intégré dans divers contextes : sécurisation de zones techniques, surveillance d'un local secondaire, d'un garage, d'un atelier, ou encore d'un chalet annexe. Le système vise à assurer une surveillance autonome et fiable dans des espaces isolés mais accessibles en réseau Wi-Fi, sans nécessiter d'installation complexe ni de maintenance régulière.

Le système a également été conçu dans une logique de conformité réglementaire (Directive RED 2014/53/UE, normes ETSI) et de robustesse opérationnelle, offrant une détection constante et un déclenchement d'alerte fiable.

2.2 Objectif du produit

Le produit ZoneAlert est une solution autonome de surveillance et d'alerte destinée à la détection d'obstacles ou de mouvements dans un espace défini.

Son principe repose sur la mesure de distance par ultrason, un balayage automatisé d'une zone de 180°, une transmission Wi-Fi des données vers un module d'affichage et de traitement de ses données. De plus le système assure une alerte immédiate dès qu'un obstacle est détecté en dessous d'un seuil critique par un signal sonore et une notification sur le téléphone de l'utilisateur.

L'objectif est donc de garantir :

- Une surveillance continue et fiable de la zone supervisée
- Une alerte immédiate et compréhensible pour l'utilisateur (affichage, son, notification)
- Une communication stable via Wi-Fi qui est conforme aux normes ETSI
- Une maintenance simplifiée et une facilité d'intégration dans divers environnements (garage, atelier, local technique, chalet secondaire)

Le principe général de fonctionnement du système est illustré sur la figure ci-dessous, présentant la chaîne complète de détection, de traitement et d'alerte assurée par le système ZoneAlert.

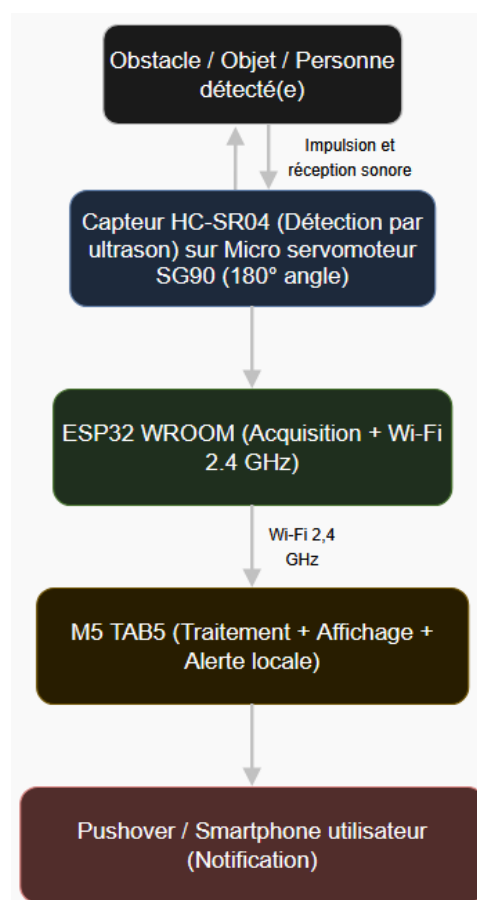


Figure 1 : Principe de fonctionnement du système ZoneAlert

Ce produit est destiné aux applications exigeant une surveillance autonome d'espaces de courte ou moyenne portée, assurant une détection fiable et une traçabilité complète des événements.

2.3 Définition des besoins utilisateurs

Le système ZoneAlert répond à un besoin de surveillance locale et connectée dans des zones où l'activité est occasionnelle ou éloignée de la zone principale d'occupation comme : un garage, un atelier, un local technique ou un chalet secondaire. Le dispositif de détection est installé dans l'espace à surveiller, tandis que la tablette M5 TAB5, chargée du traitement et de l'affichage, est placée dans l'habitation principale ou le bâtiment principal. Elle permet ainsi à l'utilisateur de consulter les mesures et de recevoir immédiatement les alertes sans se rendre sur site.

Les utilisateurs recherchent un système :

- Simple à déployer, fonctionnant sur le réseau Wi-Fi de l'habitation ou de l'entreprise
- Assurant une surveillance permanente
- Fiable et autonome, capable d'opérer sans maintenance constante
- Alertant rapidement en cas de détection anormale

ZoneAlert s'adresse ainsi à des particuliers ou professionnels souhaitant sécuriser un espace secondaire ou technique, en combinant détection précise, alerte instantanée et connectivité Wi-Fi conforme aux standards actuels.

3 Analyse fonctionnelle du produit

L'analyse fonctionnelle du système ZoneAlert a pour objectif d'identifier et de caractériser les fonctions du produit, en fonction des besoins utilisateur. Elle permet de comprendre la manière dont le système assure sa mission de surveillance, d'analyser ses interactions internes et externes, ainsi que d'évaluer ses réactions face aux événements détectés.

3.1 Fonctions principales

Les fonctions principales décrivent les missions fondamentales du système, indispensables à la réalisation de sa finalité : détecter un événement, le traiter, et alerter l'utilisateur.

N°	Fonction principale	Description
FP1	Détecter un obstacle / individu	Mesurer la distance d'un obstacle ou d'un mouvement dans une zone de surveillance définie, afin d'identifier une présence ou un objet intrusif
FP2	Balayer la zone surveillée	Explorer la zone à intervalles réguliers en suivant un angle défini, afin de couvrir l'ensemble de la zone d'observation
FP3	Traiter les données de mesure	Interpréter les valeurs recueillies, vérifier leur cohérence et déterminer si une situation critique doit déclencher une alerte
FP4	Alerter l'utilisateur à distance	Transmettre une notification ou un message d'alerte vers l'utilisateur pour signaler une détection anormale
FP5	Déclencher une alarme	Activer un signal sonore et/ou visuel local en cas d'obstacle détecté sous un seuil défini
FP6	Assurer la continuité de fonctionnement	Garantir le bon déroulement des échanges de données et la stabilité du système, y compris en cas de perturbation ou de perte de communication

Tableau 1 : Fonctions principales du système ZoneAlert

3.2 Fonctions secondaires

En complément des fonctions principales, le système ZoneAlert intègre un ensemble de fonctions secondaires destinées à améliorer la précision, la sécurité et la fiabilité de son fonctionnement. Ces fonctions ne sont pas indispensables à la mission de base du produit, mais elles en renforcent la performance, la robustesse et l'expérience utilisateur.

N°	Fonction secondaire	Description
FS1	Commander le fonctionnement du système	Activer ou désactiver le système depuis un système de supervision
FS2	Déterminer la plage de détection utile	Définir les limites minimales et maximales de détection selon l'environnement surveillé
FS3	Améliorer la fiabilité des mesures	Réaliser plusieurs acquisitions successives et calculer une valeur représentative pour limiter les erreurs
FS4	Sécuriser la communication entre les modules	Garantir une liaison Wi-Fi stable et chiffrée entre les équipements du système
FS5	Détecter et signaler les anomalies de fonctionnement	Identifier une mesure incohérente ou une défaillance et générer une alerte dédiée
FS6	Permettre la configuration et la personnalisation du système	Autoriser l'ajustement des seuils d'alerte, de la fréquence de balayage et des modes de notification
FS7	Optimiser la gestion énergétique et la maintenance	Adapter la fréquence de mesure pour réduire la consommation et faciliter la maintenance

Tableau 2 : Fonctions secondaires du systèmes ZoneAlert

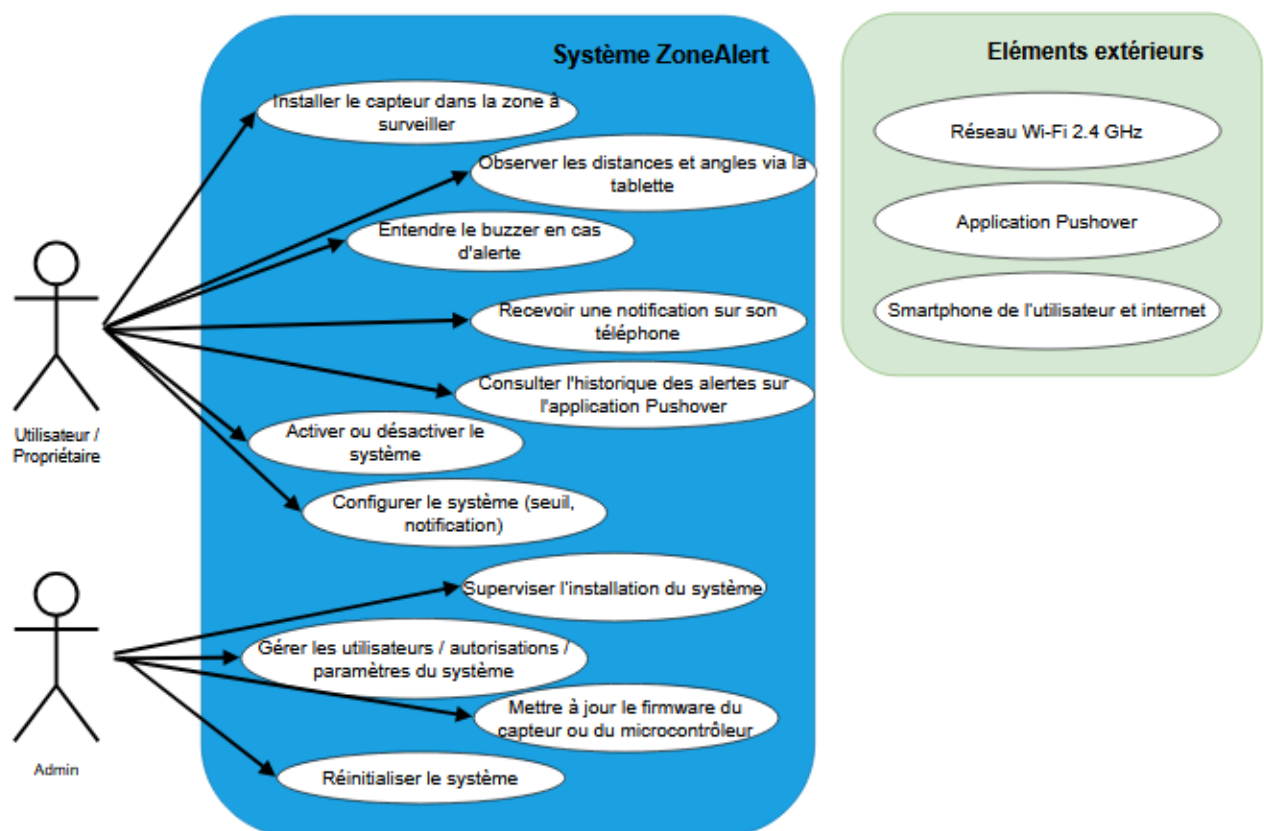


Figure 2 : Diagramme de cas d'utilisation du système ZoneAlert

Le diagramme de cas d'utilisation ci-dessus illustre les interactions principales entre l'utilisateur et le système ZoneAlert. Il met en évidence les actions que l'utilisateur peut effectuer depuis la tablette de supervision, ainsi que les fonctions automatiques du système liées à la détection, à la configuration et à l'alerte.

3.3 Diagramme FAST

Le diagramme FAST (*Function Analysis System Technique*) permet de représenter la décomposition fonctionnelle d'un système. Il montre le lien logique entre la fonction de service à satisfaire (Pourquoi ?) et les fonctions techniques ou sous-fonctions qui permettent de répondre à ce besoin (Comment faire ?).

Ce diagramme aide à comprendre comment chaque fonction technique contribue à la finalité globale du produit sans encore figer les solutions technologiques retenues.

Voici le diagramme FAST, présentant la hiérarchie fonctionnelle reliant la détection, le traitement et la diffusion des alertes :

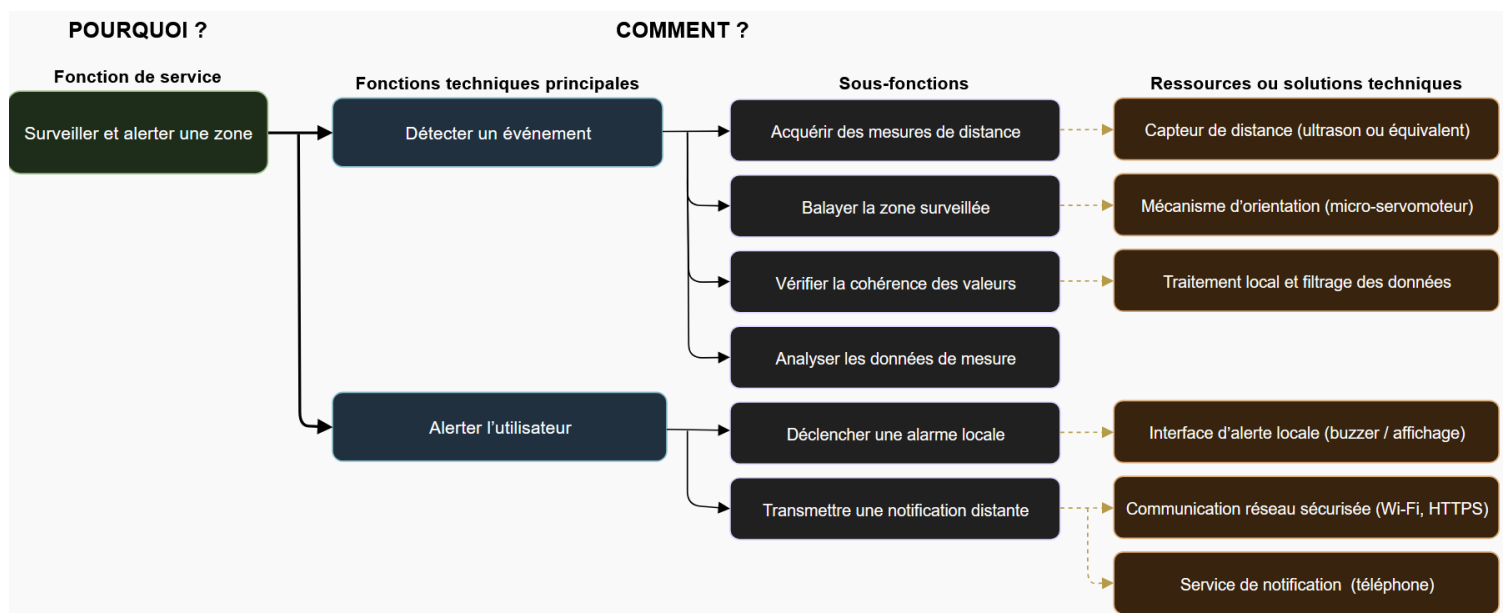


Figure 3 : Diagramme FAST du système ZoneAlert

Ce diagramme met en évidence la chaîne fonctionnelle complète du système ZoneAlert. La fonction principale « Surveiller et alerter une zone » se décompose en deux missions essentielles : détecter un événement et alerter l'utilisateur. Chaque fonction est ensuite détaillée en sous-fonctions complémentaires, qui s'appuient sur des ressources techniques telles que la mesure de distance, le traitement des données et la communication réseau sécurisée.

3.4 Must and Nice

Le diagramme MUST / NICE permet de hiérarchiser les fonctions du système selon leur importance pour la mise en service du produit.

Le cercle central "MUST" regroupe les fonctions essentielles au bon fonctionnement du système ZoneAlert : détecter un obstacle, traiter la mesure, déclencher une alarme, garantir l'envoi et la réception des données et notifier l'utilisateur à distance. Le cercle extérieur "NICE" quant à lui contient les fonctions complémentaires qui améliorent la fiabilité, la sécurité ou le confort d'utilisation, mais ne sont pas indispensables au fonctionnement minimal du produit.

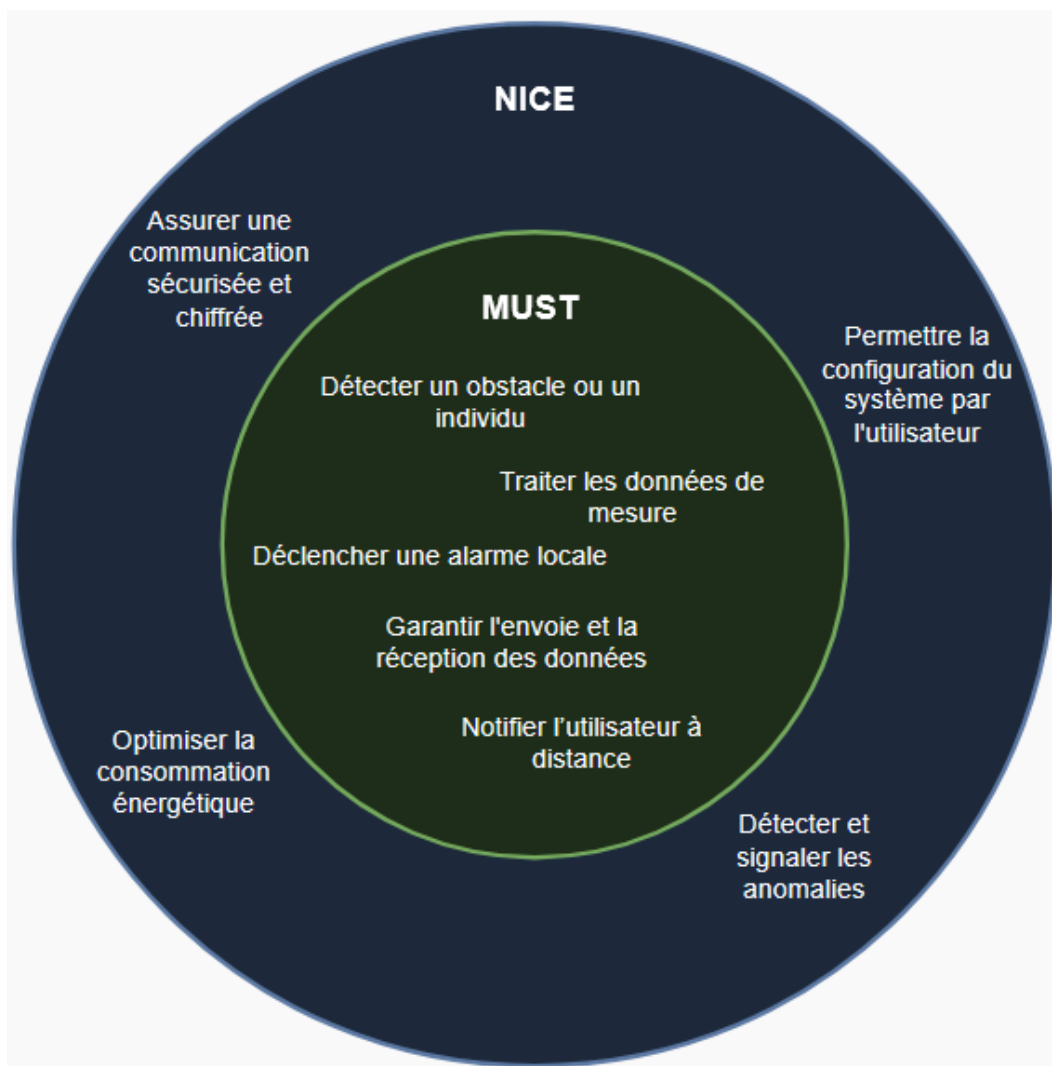


Figure 4 : Schéma MUST / NICE du système ZoneAlert

L'analyse fonctionnelle ainsi que la hiérarchisation des fonctions du système ZoneAlert permettent désormais d'identifier les éléments techniques nécessaires à leur réalisation.

La section suivante décrit en détail les sous-systèmes matériels et logiciels qui assurent la mise en œuvre de ces fonctions.

4 Exigences et description détaillée des solutions

Le système ZoneAlert intègre plusieurs sous-systèmes techniques, conçus pour remplir des rôles complémentaires. Leur synergie permet de maintenir une opération optimale et sécurisée en toutes circonstances.

4.1 Diagramme des exigences

Le diagramme des exigences formalise l'ensemble des contraintes et obligations auxquelles le produit doit se confronter.

Il permet d'expliquer de manière structurée ce que le système doit respecter, en termes de normes réglementaires, de performances techniques, de sécurité ou d'exigences d'exploitation. Il permet de décrire dans quelles conditions et selon quelles exigences le produit doit fonctionner.

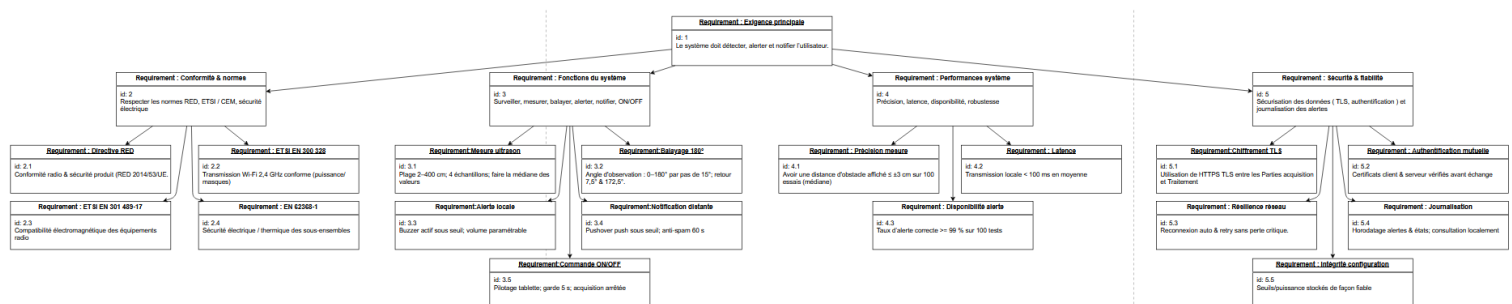


Figure 5 : Diagramme des exigences du système ZoneAlert

Ce diagramme des exigences qui est présenté en grand format dans les annexes, illustre de manière hiérarchique l'ensemble des contraintes que le système ZoneAlert doit respecter.

Il met en évidence les exigences réglementaires (RED, ETSI, CEM), fonctionnelles, de performance, ainsi que celles relatives à la sécurité et la fiabilité du dispositif. Il constitue une référence complète pour la validation technique, normative et sécuritaire du produit.

4.2 Partie Acquisition (ESP32 WROOM)

Le sous-système d'acquisition constitue la partie capteur du dispositif. Il est chargé de mesurer la distance entre le système et un obstacle potentiel, puis de transmettre cette donnée brute au module de traitement.

Composition :

- Microcontrôleur ESP32 WROOM :
 - Gère la lecture du capteur, le pilotage du servomoteur et la communication Wi-Fi vers la tablette principale
 - Fonctionne sous 3,3V logique, mais peut être alimenté en 5V via le port USB grâce à son régulateur de tension intégré
 - Alimentation USB : simple, sécurisée et stable, compatible avec les adaptateurs 230V / 5V standards, sans besoin de convertisseur externe
 - Fréquence de fonctionnement : 240 MHz, connectivité Wi-Fi 2,4 GHz conforme à la norme IEEE 802.11 b/g/n
- Capteur à ultrason HC-SR04
 - Permet la mesure de distance par émission et réception d'ondes ultrasonores (40 kHz)
 - Plage de mesure : 2 à 400 cm ; précision typique : $\pm 0,3$ cm
 - Temps de réponse < 50 ms par mesure
- Servomoteur MicroServo 9g SG90 (Tower Pro) :
 - Assure la rotation du capteur ultrasonique pour effectuer le balayage de la zone
 - Angle de rotation : 0 à 180°, contrôlé par signal PWM (50 Hz, impulsion 1–2 ms)
 - Alimentation : 4,8 à 6 V, courant moyen ~250 mA, pics jusqu'à 500 mA
 - Monté mécaniquement sur le capteur pour un balayage fluide et précis

Rôle :

Les missions de la partie acquisition sont :

- Détecter un obstacle ou un individu dans la zone de surveillance
- Effectuer un balayage périodique à intervalles de 15°, afin de couvrir l'espace défini
- Transmettre les mesures de distance via Wi-Fi à la partie traitement

Ce module est placé dans la zone à surveiller et est alimenté en 5V via un câble USB, relié à un transformateur secteur 230V~ / 5V 2A. Cette configuration assure une alimentation stable et suffisante pour le fonctionnement simultané du microcontrôleur, du capteur ultrasonique et du servomoteur.

4.3 Partie Traitement, affichage et alerte (M5TAB5)

Le sous-système de traitement constitue la partie « cerveau » du dispositif ZoneAlert.

Il centralise les données du module d'acquisition, les analyse, affiche les résultats sur l'interface utilisateur et déclenche les alertes locales ou à distance en fonction de l'état de la zone surveillée.

Composition :

- **Tablette M5 TAB5**
 - Processeur & connectivité : ESP32-P4 avec un coprocesseur Wi-Fi ESP32-C6 (2,4 GHz) pour la réception des mesures sur le réseau local
 - Affichage (écran tactile TFT intégré) : pour la visualisation instantanée (distances, angle, états), interactions de mise ON/OFF, seuil d'alerte, fréquence de balayage
 - Alerte locale (buzzer intégré) : signal sonore en cas de condition critique, intensité/durée adaptées au niveau d'alerte par l'utilisateur.
 - Communication externe : envoi des notifications « push » via Pushover (API HTTPS) vers le smartphone du propriétaire
 - Alimentation : 5V via câble USB, adaptateur secteur 230V / 5V 3A
 - Sécurité des échanges : communication chiffrée (HTTPS) et réseau Wi-Fi protégé

Rôle :

Les missions de la partie traitement sont :

- Traiter et filtrer les mesures reçues
- Afficher l'état du système et les valeurs utiles
- Configurer et piloter (ON/OFF, seuils, cadence)
- Déclencher l'alerte locale (buzzer)
- Notifier à distance via Pushover (application push smartphone)

À partir des éléments matériels et fonctionnels définis précédemment, le schéma bloc ci-dessous présente l'architecture globale du système ZoneAlert.

Il illustre les liaisons entre les différentes parties et met en évidence les flux d'informations et d'alertes assurant la mission de détection et de supervision.

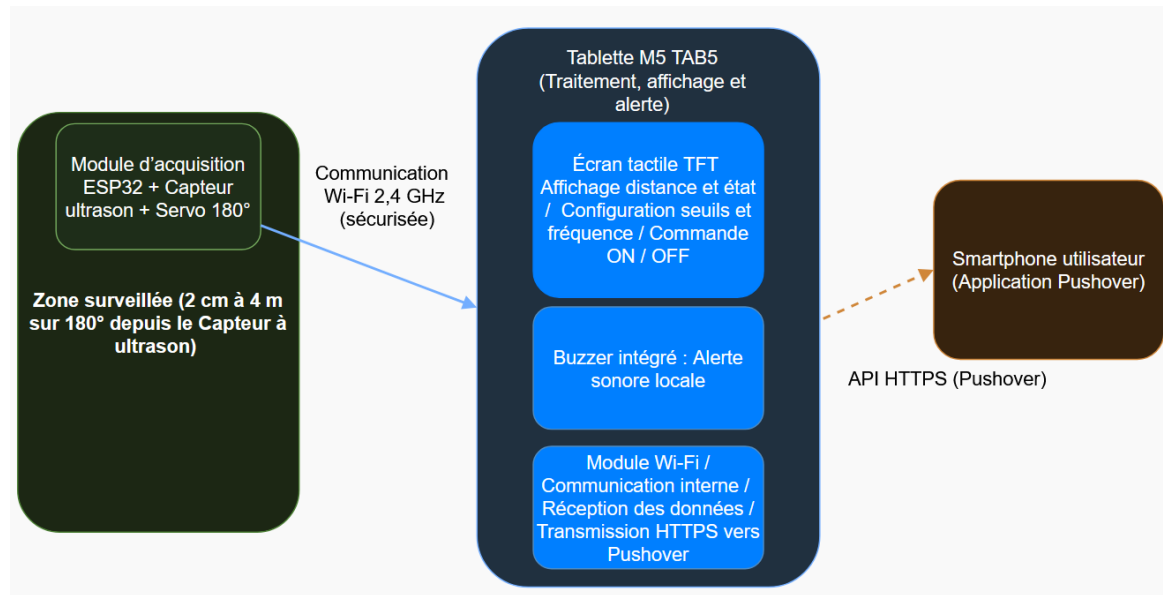


Figure 6 : Schéma bloc du système ZoneAlert

Ce schéma bloc décrit la configuration technique du système ZoneAlert, reliant les étapes de détection, de traitement et d'alerte.

Il constitue la base de référence pour l'analyse et la vérification des exigences normatives du produit.

5 Environnement normatif et réglementaire

Avant d'être mis sur le marché, tout équipement radio doit attester de sa conformité à un ensemble de normes strictes, couvrant notamment :

- La bonne utilisation du spectre (respect des niveaux de puissances, absences d'interférence et la maîtrise des masques de fréquences afin de limiter l'émission du signal à la bande utile)
- La compatibilité électromagnétique (limitation des perturbations émises et résistance aux perturbations externes)
- La sécurité pour l'utilisateur et l'installation
- La protection contre les cybermenaces qui est un enjeu de plus en plus central dans la réglementation actuelle

Ces exigences servent de référentiel commun aux concepteurs, aux laboratoires d'essais et aux autorités (marquage CE/RED en Europe). Elles définissent les tests à réaliser et les critères de conformité à respecter, garantissant ainsi que le produit soit fiable, sécurisé et compatible avec son environnement d'utilisation.

5.1 Les normes essentielles (ETSI)

Les éléments du système soumis aux vérifications normatives sont les modules radio ESP32-P4, ESP32-C6 et ESP32-WROOM. Ils opèrent en 2,4 GHz (bande ISM 2400–2483,5 MHz) en mode station Wi-Fi (STA), associés à un point d'accès externe (routeur, hotspot de smartphone). Les essais réglementaires sont réalisés avec le dispositif connecté à un point d'accès et véhiculant un trafic représentatif, afin de couvrir les cas réels d'utilisation. Le point d'accès n'entre pas dans le périmètre de conformité du produit sauf s'il est fourni avec le système, mais il conditionne les scénarios d'essais (canal, charge, trames).

Les normes essentielles applicables sont :

- ETSI EN 300 328
Règles de la bande 2,4 GHz pour systèmes à large bande (Wi-Fi). Limites d'EIRP (≤ 20 dBm), exigences de spectre (largeur de bande 20 MHz typique), occupation efficace du spectre et émissions non essentielles. Les essais sont menés en liaison avec un point d'accès configuré sur un canal autorisé.
- ETSI EN 301 489-1 et EN 301 489-17
Compatibilité électromagnétique des équipements de transmission de données en 2,4 GHz. Vérifie que l'équipement ne perturbe pas son environnement et reste opérationnel face aux perturbations (ESD, champs rayonnés, creux de tension), en situation connectée à un point d'accès.

- EN/IEC 62368-1
Sécurité des équipements audio/vidéo, TIC et communication. Couvre protections contre chocs électriques, échauffements, sources d'énergie, y compris l'alimentation USB 5 V utilisée par le module.
- EN 62311
Évaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques. Pour une installation fixe avec EIRP limitée à 100 mW et distance d'utilisation supérieure à 20 cm, la conformité peut être démontrée sans mesure SAR, y compris lorsque le module est associé à un point d'accès.
- ETSI EN 303 645
Dispositions de cybersécurité pour objets connectés. Impose bonnes pratiques de gestion d'identifiants, mises à jour et protection des données. Dans le système, cela se traduit par l'utilisation d'HTTPS/TLS, l'authentification mutuelle entre modules et la sécurisation des échanges, indépendamment du point d'accès choisi (WPA2/WPA3 recommandé).

Ces références permettent de démontrer la conformité à la directive RED 2014/53/UE pour la partie radio, CEM, sécurité électrique et exposition. La configuration d'essai représentative inclura toujours les modules ESP32-P4/-C6/-WROOM en mode station associés à un point d'accès, afin de couvrir le comportement réel en service.

5.2 Spécification Radio

Les spécifications radio concernent les modules assurant la connectivité Wi-Fi du système ZoneAlert :

- Le module ESP32-WROOM-32(E) utilisé dans la partie capteur
- Le module ESP32-C6, intégré à la tablette M5Stack Tab5

Ces deux modules opèrent en Wi-Fi 2,4 GHz (2400 à 2483,5 MHz) selon la norme IEEE 802.11 b/g/n.

L'objectif de cette section est de définir les caractéristiques réglementaires que ces modules doivent respecter avant toute validation de conformité.

Les exigences applicables sont celles définies par la norme ETSI EN 300 328, qui encadre l'utilisation de la bande 2,4 GHz en Europe.

Le dispositif doit ainsi respecter les critères suivants : puissance maximale rayonnée, occupation de canal, largeur de bande, stabilité fréquentielle et gestion équitable du spectre.

Ces paramètres sont synthétisés dans le tableau ci-dessous :

Paramètre	Exigence / Valeur typique	Explications techniques	Référence normative
Bande de fréquences autorisée	2400 MHz – 2483,5 MHz (bande ISM 2,4 GHz)	Bande Wi-Fi européenne découpée en canaux de 5 MHz (canaux 1 à 13)	EN 300 328 §4.3
Puissance maximale rayonnée (EIRP)	≤ 100 mW (20 dBm)	Puissance isotrope équivalente rayonnée mesurée sur le canal le plus défavorable	EN 300 328 §4.3.1.2
Densité de puissance (modulations non-FHSS, ex. OFDM 802.11)	≤ 10 mW/MHz EIRP	FHSS: Frequency Hopping Spread Spectrum; OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Limite applicable aux modulations Wi-Fi	ECC/REC 70-03 Annexe 3
Mécanismes de partage de spectre (LBT/DAA)	Fonctionnement Listen Before Talk (LBT) et Dynamic Frequency Access (DAA) intégrés	LBT : écoute du canal avant émission ; DAA : gestion dynamique du spectre pour éviter les collisions	EN 300 328 §4.3.1.3
Occupied Channel Bandwidth (OCBW)	20 MHz (HT20)	Largeur de canal mesurée à -20 dB ; doit rester dans 2400–2483,5 MHz	EN 300 328 §4.3.1.8
Duty-cycle / séquences TX (si non adaptatif)	100 % max avec contrôle CCA	CCA : Clear Channel Assessment, empêche l'émission continue sur un canal occupé	EN 300 328 §4.3.2.4
Séparation des canaux en FHSS (si applicable)	≥ 100 kHz entre canaux	Spécifique aux systèmes FHSS (Bluetooth) – non applicable ici mais exigence générale	EN 300 328 §4.3.1.5
Déclaration constructeur pour essais	Déclarer la configuration la plus défavorable (EIRP max)	Doit inclure puissance, gain d'antenne, canaux testés et mode Wi-Fi utilisé	EN 300 328 Annexe E

Tableau 3 : Spécification radio

La partie radio du système ZoneAlert doit garantir que les modules Wi-Fi (ESP32-WROOM et ESP32-C6) respectent l'ensemble des critères fixés par la norme EN 300 328. Ces exigences assurent une utilisation efficace du spectre, une puissance maîtrisée et une compatibilité avec les autres systèmes opérant dans la bande 2,4 GHz, conditions nécessaires à la certification CE selon la directive RED 2014/53/UE.

5.3 Spécification CEM

Le système doit répondre aux exigences de compatibilité électromagnétique (CEM) définies par les normes EN 301 489-1 et EN 301 489-17, applicables aux équipements Wi-Fi.

Les essais CEM ont deux objectifs principaux : ne pas générer de perturbations susceptibles de brouiller d'autres équipements et ne pas subir d'altération de fonctionnement lorsqu'il est exposé à des perturbations externes.

Les paramètres essentiels à respecter sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Paramètre	Exigence / Valeur typique	Explications techniques	Référence normative
Emissions conduites	≤ -46 dBm (150 kHz – 30 MHz)	Vérifie que le système ne génère pas de perturbations sur les lignes d'alimentation	EN 301 489-1 §5.2 / EN 55032 Classe B
Emissions rayonnées	≤ -54 dBm (30 MHz – 1 GHz)	Mesure des émissions rayonnées à 3 m ; respect des seuils d'un environnement résidentiel	EN 301 489-17 §5.3 / EN 55032
Immunité électrostatique (ESD)	± 8 kV (air) / ± 4 kV (contact)	Évalue la résistance du boîtier et des interfaces aux décharges électrostatiques	EN 61000-4-2
Immunité champs RF rayonnés	3 V/m (80 MHz – 6 GHz)	Le produit doit rester fonctionnel lors d'une exposition à un champ électromagnétique	EN 61000-4-3
Immunité conduites RF (150 kHz – 80 MHz)	3 V rms	Vérifie la robustesse du système face aux signaux parasites injectés sur les câbles	EN 61000-4-6
Critère de performance CEM	Niveau B (aucune perte fonctionnelle permanente)	Après perturbation, le système doit poursuivre son fonctionnement normal sans intervention	EN 301 489-1 Annexe C

Tableau 4 : Spécification CEM

En respectant ces exigences, le système peut fonctionner dans un environnement électromagnétique standard sans générer de brouillage et sans être affecté par les perturbations environnantes, garantissant ainsi la fiabilité et la stabilité des communications.

5.4 Spécification sécurité

Conformément aux normes EN/IEC 62368-1 et EN 62311, le système doit garantir une utilisation sûre pour les utilisateurs et l'environnement. Ces normes couvrent la sécurité électrique des équipements, la protection contre les risques d'échauffement, ainsi que le respect des limites d'exposition aux champs électromagnétiques.

Paramètre	Exigence / Valeur typique	Explications techniques	Référence normative
Sécurité électrique (alimentation)	Alimentation 5 V via port USB conforme	Vérifie que l'adaptateur et les circuits d'alimentation respectent les limites de courant et d'isolation.	EN 62368-1 §4.1
Protection thermique	Température de surface < 60 °C	Contrôle de la dissipation thermique pour éviter tout risque de brûlure ou dégradation du matériel.	EN 62368-1 §5.4
Protection contre surintensité	Fusible / limiteur intégré (2 A max)	Protection contre les surtensions et courts-circuits éventuels.	EN 62368-1 §5.3
Isolation électrique	Isolement double ou renforcé	Prévention des contacts directs entre parties sous tension et utilisateur.	EN 62368-1 §5.2
Évaluation de l'exposition CEM (EN 62311)	Distance utilisateur > 20 cm ; EIRP ≤ 100 mW	Produit non porté ; conforme aux limites d'exposition humaine sans mesure SAR requise.	EN 62311 §6
Conditions d'utilisation	Utilisation en intérieur, sur surface stable	Évite tout contact prolongé avec le corps ou environnement humide.	EN 62368-1 §4.3

Tableau 5 : Spécification sécurité

Ces normes garantissent que le dispositif en conditions normales d'utilisation, ne présente aucun danger pour l'utilisateur : absence de risque électrique, d'échauffement excessif ou d'exposition électromagnétique dépassant les seuils autorisés. Elles servent de référence pour valider la conformité du produit aux exigences de sécurité imposées aux équipements radio grand public.

6 Contraintes techniques générales

Le dispositif ZoneAlert doit respecter un ensemble de contraintes techniques liées à sa conception matérielle et à ses interfaces de communication. Ces contraintes garantissent la compatibilité entre les différents sous-ensembles, la fiabilité des mesures et la stabilité des transmissions.

6.1 Environnement matériel

Le système ZoneAlert s'appuie sur deux unités principales : l'ESP32 WROOM, dédiée aux mesures et à la transmission, et la tablette M5Tab5, qui assure le traitement, l'affichage et la liaison Wi-Fi. Les composants sont alimentés en 5 V et conçus pour un fonctionnement intérieur stable et fiable.

Élément	Contraintes techniques	Justification
ESP32-WROOM	Alimentation 5 V via USB, logique 3,3 V, consommation typique 250 mA (Wi-Fi actif)	Assure la partie capteur : acquisition ultrason, calcul local et envoi des données vers la tablette.
M5Tab5 (ESP32-C6 + P4)	Alimentation USB-C : 5 V / 3 A, consommation moyenne 1 A	Interface principale : affichage, pilotage du système et gestion de la connectivité Wi-Fi 2,4 GHz.
Servo-moteur SG90	Rotation 0–180°, tension 5 V, intensité max 500 mA	Réalise le balayage angulaire des mesures de distance ; piloté par l'ESP32-WROOM.
Capteur ultrason HC-SR04	Alimentation 5 V, logique 5 V, portée 2–400 cm, précision ± 3 mm	Permet la détection d'obstacles ; plage conforme aux besoins du système.
Câblage et interconnexions	Longueur totale < 30 cm, fils torsadés pour lignes Trigger/Echo et servo	Réduction des pertes de signal et des interférences entre modules.
Température de fonctionnement	0 °C à +50 °C	Assure la stabilité des composants et la fiabilité des mesures en usage intérieur.

Tableau 6 : Éléments matériels du système ZoneAlert

6.2 Interfaces de communication

Les échanges de données entre les différentes unités du système ZoneAlert reposent sur des interfaces filaires et sans fil garantissant une communication fiable et sécurisée. Les liaisons principales utilisées sont présentées ci-dessous :

Interface	Caractéristiques principales	Rôle dans le système
Wi-Fi 2,4 GHz (ESP32-WROOM / ESP32-C6)	IEEE 802.11 b/g/n, canal 20 MHz, EIRP ≤ 20 dBm	Transmission des mesures du capteur vers la tablette M5Tab5 via un point d'accès local.
Lien HTTPS (TLS 1.2)	Communication chiffrée, certificats mutuels	Assure la sécurité des échanges entre la tablette et le serveur distant (Pushover ou autre service).
Bus série UART	115200 bauds, 3,3 V logique	Liaison interne de diagnostic et configuration entre modules.
Liaison SDIO interne (Tab5)	Bus 4 bits, fréquence 40 MHz	Communication entre le processeur ESP32-P4 et le coprocesseur ESP32-C6 gérant le Wi-Fi.
Entrées/Sorties numériques (GPIO)	Niveaux logiques 3,3 V / 5 V tolérés	Pilotage du servomoteur SG90 et lecture du capteur HC-SR04.

Tableau 7 : Interface de communication du système ZoneAlert

Ces interfaces assurent la coordination entre les différentes cartes, la stabilité du transfert de données et la sécurisation des communications locales et distantes.

7 Sécurité et cybersécurité

Le dispositif ZoneAlert doit garantir la sécurité de ses utilisateurs, de ses composants matériels et de ses échanges de données. Les mesures mises en œuvre couvrent deux volets : la sécurité physique et électrique du matériel, et la sécurité logicielle ainsi que la protection des communications.

7.1 Sécurité physique et électrique

Le système ZoneAlert est entièrement alimenté en 5 volts via câble USB, garantissant une alimentation simple, sûre et conforme aux limites de courant imposées par les adaptateurs standards.

La carte ESP32-WROOM-32 alimente directement le capteur ultrason HC-SR04 et le servomoteur SG90 depuis sa sortie 5 V. Le capteur est protégé par un pont diviseur de tension de 10 kΩ et 15 kΩ sur la ligne de retour « ECHO », réduisant le signal à un niveau compatible avec la logique 3,3 V de l'ESP32 et évitant tout risque de surtension. Le servomoteur, alimenté sur le même 5V, consomme jusqu'à 500 mA en pointe, ce qui reste compatible avec l'alimentation USB dès lors qu'un adaptateur 5V/2A de bonne qualité est utilisé.

La tablette M5Tab5, intégrant un module ESP32-C6 pour le Wi-Fi et un ESP32-P4 pour le traitement, est également alimentée par un port USB-C relié à un adaptateur 5V/3A. Cette marge de puissance garantit un fonctionnement stable de l'écran, du processeur et du haut-parleur sans échauffement excessif.

Tous les circuits du système fonctionnent à basse tension (3,3 V ou 5 V) et sont isolés des utilisateurs. L'absence de parties sous tension accessibles, combinée à une alimentation régulée, assure une utilisation sans danger et conforme aux exigences de sécurité électrique de la norme EN 62368-1.

7.2 Sécurité logicielle et communication

La sécurité des échanges repose principalement sur le protocole HTTPS, utilisé entre la carte ESP32-WROOM et la tablette M5Tab5. Le chiffrement TLS (Transport Layer Security) intégré au client sécurisé (WiFiClientSecure) protège les données contre toute interception ou modification pendant leur transmission.

Les certificats installés sur les deux modules (cert.pem et key.pem) assurent l'authentification du serveur, empêchant ainsi toute connexion non autorisée ou usurpation d'identité entre les équipements.

Concernant la communication avec le service Pushover, celui-ci utilise également le protocole HTTPS pour le transfert des notifications. Les données envoyées (clé API, User Key et message d'alerte) transitent via une connexion chiffrée TLS, ce qui protège leur contenu contre l'interception.

Cependant, le service Pushover étant hébergé à distance, la sécurité dépend aussi de la gestion de ces clés d'authentification.

Pour renforcer cette partie, il est recommandé :

- De stocker les clés et tokens Pushover dans la mémoire interne de la tablette (non dans le code source)
- De ne pas afficher ni transmettre ces identifiants en clair
- De renouveler périodiquement les clés d'accès si le service le permet

Ainsi, même si la plateforme Pushover assure déjà un chiffrement de bout en bout, la sécurité globale du système repose sur la protection locale des identifiants et la bonne configuration du protocole HTTPS au sein du dispositif.

8 Performances et validation

Cette section a pour but de vérifier que le système ZoneAlert répond aux exigences fonctionnelles et réglementaires préalablement établies. Elle détaille la méthodologie de test mise en œuvre pour évaluer le dispositif, présente les résultats obtenus lors des essais en conditions réelles d'utilisation, et les confronte aux valeurs de référence définies par les normes ETSI et les spécifications radio en vigueur. L'enjeu est de démontrer la conformité technique du produit dans des scénarios représentatifs de son exploitation opérationnelle.

8.1 Méthodologie de test

Les tests ont été réalisés dans un environnement intérieur stable, à température ambiante (environ 20°C), avec une alimentation USB standard :

- 5V/2A pour la carte ESP32-WROOM
- 5V/3A pour la tablette M5Tab5

Les deux modules étaient reliés au même point d'accès Wi-Fi 2,4 GHz (téléphone portable) afin de reproduire un usage domestique typique.

Les essais ont porté sur les points suivants :

- Test des seuils de distance et calcul de la médiane
Chaque seuil de détection (10 cm, 50 cm, 100 cm, 200 cm, 300 cm) a été évalué. Pour chaque angle de balayage, quatre mesures successives ont été effectuées par le capteur HC-SR04, puis la médiane des valeurs a été calculée dans le code de la M5TAB5. Ce traitement permet d'éliminer les valeurs aberrantes et d'assurer une détection fiable. L'alerte est déclenchée uniquement si la médiane mesurée est inférieure au seuil sélectionné. Le choix du seuil de détection peut être choisi par l'utilisateur via des boutons tactiles présents sur la M5TAB5.
- Test du système ON/OFF
Le bouton tactile de la tablette a été testé afin de vérifier le bon fonctionnement de l'arrêt et du redémarrage de l'acquisition. Lorsque le mode OFF est activé, aucune mesure, alerte ou notification n'est transmise. En mode ON, le cycle complet de balayage, de mesure et d'alerte reprend automatiquement après un délai de sécurité de 5 secondes.

- **Test du buzzer et des niveaux d'alerte**
Le buzzer intégré à la tablette a été évalué pour différents niveaux de puissance (50, 150, 200 et 250). Le volume peut être augmenté ou diminué par l'utilisateur via des boutons tactiles présents sur la M5TAB.
- **Test des angles du servomoteur**
Le servomoteur SG90 a été testé pour un balayage complet de 0° à 180° par pas de 15°. La précision et la répétabilité des angles ont été contrôlées visuellement et confirmées par la réception correcte des mesures pour chaque position.
- **Test d'affichage sur la tablette**
L'interface utilisateur a été validée en observant l'affichage simultané de l'angle, de la distance médiane et du niveau d'alerte. La réactivité de l'affichage a été évaluée sur plusieurs cycles de balayage pour confirmer l'absence de latence perceptible.
- **Test de communication Wi-Fi**
La stabilité de la liaison entre l'ESP32 et la tablette a été testée sur plusieurs sessions. Aucune perte de données ni déconnexion n'a été observée durant les transmissions, confirmant la fiabilité du Wi-Fi 2,4 GHz utilisé.
- **Test de notification Pushover**
Les notifications ont été envoyées avec succès pour chaque changement de seuil. Lorsqu'un seuil critique est franchi, la notification est reçue en quelques secondes sur le smartphone utilisateur, avec les informations de distance et d'angle au moment de la détection.

Ces essais valident la cohérence globale du système et démontrent que les modules fonctionnent correctement, de la phase de détection jusqu'à la transmission de l'alerte, en conformité avec les spécifications de conception.

8.2 Présentation d'un cas de test représentatif

Parmi les différents essais réalisés, une situation particulière a été retenue pour illustrer le fonctionnement global du système : la détection d'un obstacle sous le seuil configuré, engendrant une alerte locale et une notification distante.

Description du test :

Une planche a été placée à une distance inférieure au seuil de détection réglé à 10 cm. Le capteur HC-SR04 a mesuré cette distance, et le système a immédiatement déclenché une alerte de niveau 1, visible sur l'écran de la M5Tab5. Le message d'alerte est affiché avec la valeur de distance correspondante, confirmant la bonne communication entre l'ESP32 et la tablette.

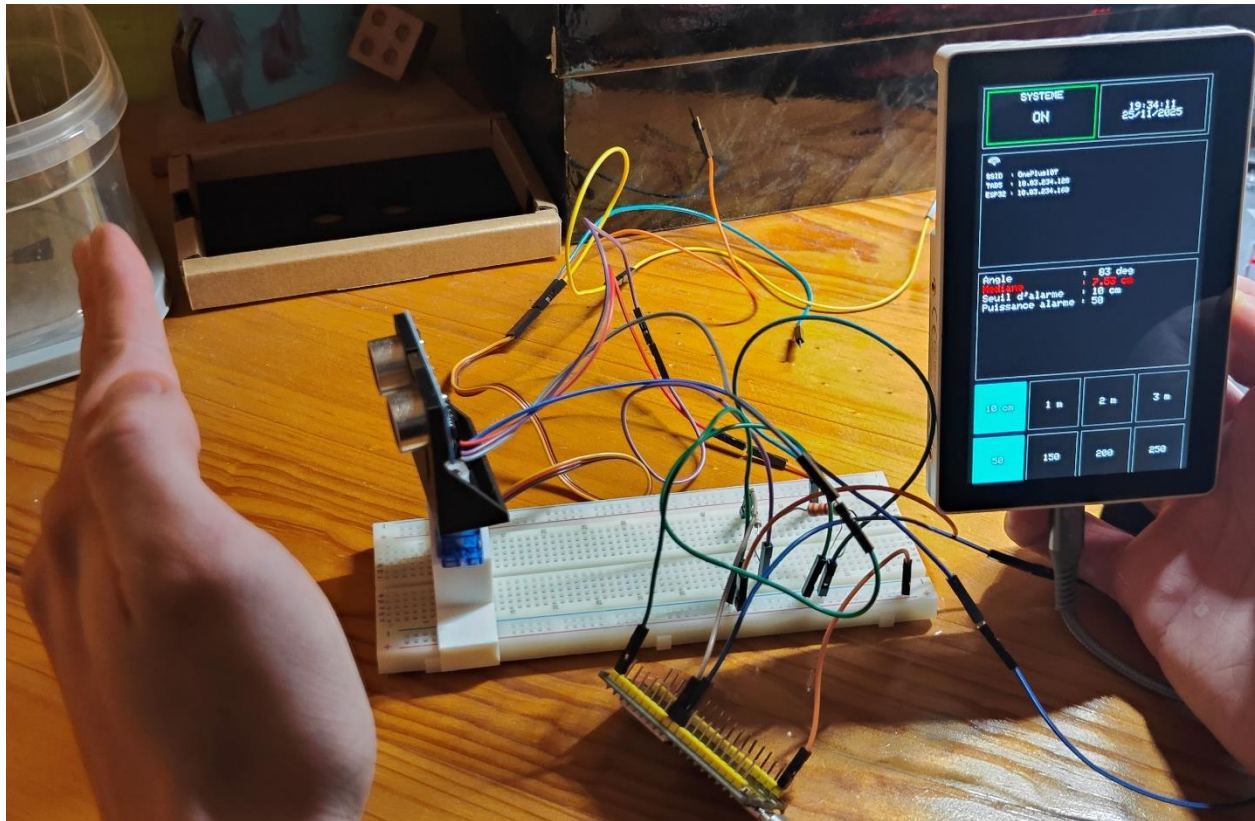


Figure 6 : Affichage sur la tablette et disposition du capteur

Dans un second temps, la tablette a transmis automatiquement une notification via le service Pushover, confirmant la détection d'un obstacle à distance. Cette notification a été reçue sur le smartphone utilisateur, indiquant la distance mesurée et l'angle correspondant au moment de la détection.

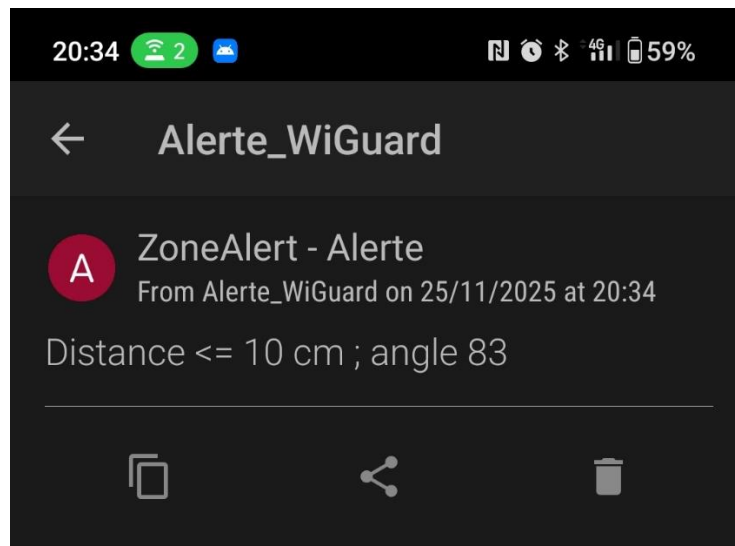


Figure 7 : Notification reçue via l'application Pushover

Ce test illustre la chaîne complète de fonctionnement : mesure → traitement → affichage → notification, démontrant la cohérence entre les modules et la fiabilité du dispositif dans une situation réelle d'alerte.

8.3 Analyse de conformité des normes

L'analyse de conformité consiste à comparer les résultats expérimentaux du système ZoneAlert avec les exigences réglementaires et techniques établies dans les chapitres précédents.

Les valeurs de référence proviennent des caractéristiques officielles décrites dans les datasheets constructeur des trois composants principaux :

- Le module ESP32-WROOM-32, utilisé pour les mesures et l'émission Wi-Fi côté capteur
- Le module ESP32-C6, responsable de la connectivité Wi-Fi de la M5Tab5
- Le processeur ESP32-P4, utilisé pour le traitement local de la tablette

Ces documents fournissent les données radio, électriques, thermiques et fonctionnelles nécessaires pour comparer précisément les performances mesurées avec les exigences normatives (EN 300 328, EN 301 489-17, EN 62368-1, EN 62311).

L'analyse ci-dessous porte sur la conformité radio, la compatibilité électromagnétique, la sécurité électrique, l'exposition RF et la validation fonctionnelle.

8.3.1 Conformité radio (Normes EN 300 328)

Bande de fréquences

- Exigence réglementaire : 2400–2483,5 MHz
- Référence du constructeur :
 - Dans la datasheet de l'ESP32-WROOM-32, chapitre "Wi-Fi specifications", la plage de fréquences supportée est indiquée entre 2412 et 2484 MHz, compatible avec le standard Wi-Fi IEEE 802.11b/g/n
 - Dans la datasheet de l'ESP32-C6, dans la section 6.1 "2.4 GHz Wi-Fi subsystem", les canaux supportés sont également listés entre 2412 et 2484 MHz, incluant la modulation IEEE 802.11b/g/n/ax

Correspondance avec les mesures :

Lors des essais, les communications Wi-Fi ont été établies sur un point d'accès 2,4 GHz qui est conforme à la plage définie dans les deux datasheets.

Puissance d'émission

- Limite réglementaire EN 300 328 : $EIRP \leq 20 \text{ dBm}$ (100 mW)
- Référence du constructeur :
 - Dans la datasheet de l'ESP32-WROOM-32, tableau "Transmit power", la puissance maximale est spécifiée jusqu'à 20,5 dBm en 802.11b et environ 15 dBm en 802.11g/n
 - Dans la datasheet de l'ESP32-C6, section "2.4 GHz RF specifications", il est indiqué que le bloc radio fournit une puissance conforme aux exigences 802.11, typiquement dans une plage comprise entre 15 et 20 dBm selon le mode Wi-Fi

Correspondance avec les mesures :

Aucune désassociation ni perte de paquet observée, ce qui est cohérent avec une puissance effective dans la plage prévue. L'utilisation d'antennes intégrées (gain $\approx 2 \text{ dBi}$) limite de facto l'EIRP, maintenant le système dans les valeurs admises par la norme.

Largeur de canal et occupation du spectre

- Norme EN 300 328 : canal de 20 MHz conforme
- Référence du constructeur :
 - Les deux modules, WROOM-32 et ESP32-C6, indiquent dans leurs sections "Wi-Fi features" que les canaux 20 MHz constituent le mode standard d'opération

Correspondance avec les mesures :

Les échanges avec le point d'accès se sont déroulés en canal 20 MHz, conformément aux spécifications.

Sensibilité du récepteur

- Référence du constructeur :
 - ESP32-WROOM-32, chapitre "Receiver sensitivity":
 - -98 dBm (1 Mbps)
 - -75 dBm (54 Mbps)
 - ESP32-C6, chapitre dédié aux performances Wi-Fi :
 - Valeurs similaires aux performances des SoC Espressif 2,4 GHz (sensibilités de l'ordre de -95 à -98 dBm selon les modulations)

Correspondance avec les mesures :

Les transmissions sont restées stables pour tous les angles et cycles de balayage, ce qui est cohérent avec une marge de réception suffisante par rapport aux RSSI mesurés en usage intérieur.

8.3.2 Compatibilité électromagnétique (EN 301 489-17)

Les modules Espressif sont conçus pour répondre aux exigences CEM des équipements Wi-Fi.

- Dans la datasheet du WROOM-32, section "Certifications", il est explicitement indiqué une conformité CE/FCC/IC pour la partie RF et CEM
- L'ESP32-C6 et l'ESP32-P4 intègrent des protections internes (brown-out, watchdogs) décrites dans leurs chapitres "Power Management" et "System Reliability"

Correspondance avec les mesures :

Les essais n'ont révélé :

- Aucune perte de communication
- Aucun redémarrage intempestif
- Aucun gel de l'interface tablette

Ce comportement correspond au critère de performance B de la norme EN 301 489-17, attendu en environnement résidentiel.

8.3.3 Sécurité électrique (EN 62368-1)

Les trois composants fonctionnent en basse tension (5 V ou 3,3 V) :

- Dans la datasheet du WROOM-32, chapitre "Absolute maximum ratings", la tension maximale autorisée est clairement identifiée (3,6 V pour les GPIO)
- L'ESP32-C6 et le P4 indiquent des caractéristiques similaires dans leurs chapitres "Electrical characteristics"

Correspondance avec les mesures :

- Le capteur HC-SR04 est protégé par un diviseur 10 k Ω / 15 k Ω , maintenant "ECHO" à ~3,1 V, conforme aux limites 3,3 V mentionnées
- Le servo SG90 et la carte ESP32 n'ont présenté aucun échauffement notable, en cohérence avec les limites de dissipation listées dans les datasheets

8.3.4 Exposition RF (EN 62311)

La norme EN 62311 traite de l'évaluation de l'exposition humaine aux champs électromagnétiques pour les équipements radio de faible puissance.

Contrairement aux équipements portés sur le corps, les modules Wi-Fi utilisés dans ZoneAlert (ESP32-WROOM-32 et ESP32-C6) sont intégrés dans des équipements manipulés à la main (tablette) ou posés à proximité (capteur).

Selon la norme :

- Un test SAR n'est requis que pour les équipements de forte puissance ou destinés à être utilisés collés au corps
- Pour les appareils tenus ponctuellement en main, utilisant une puissance Wi-Fi inférieure à 100 mW (20 dBm), comme c'est le cas des deux modules Espressif, la conformité peut être démontrée par calcul et documentation, sans campagne SAR, dès lors que la puissance est dans les limites du Wi-Fi 2,4 GHz

Les datasheets indiquent que :

- L'ESP32-WROOM-32 ne dépasse pas 20,5 dBm en 11b (section "Transmit Power")
- L'ESP32-C6 utilise une puissance similaire (15 à 20 dBm selon les modulations, section "2.4 GHz RF subsystem")

Les essais montrent qu'en utilisation normale (main posée sur la tablette, face avant accessible), les niveaux de puissance restent dans les limites du Wi-Fi basse puissance, ce qui correspond aux scénarios d'exposition prévus par EN 62311 pour les appareils non collés au corps et de puissance inférieure à 100 mW.

Ainsi, le dispositif ZoneAlert entre dans la catégorie des équipements de faible puissance manipulés à distance raisonnable, pour lesquels la conformité peut être établie sans mesure SAR, conformément à EN 62311.

8.4 Analyse de conformité fonctionnelle

Les essais expérimentaux ont permis d'évaluer l'ensemble des fonctionnalités essentielles du système ZoneAlert.

Toutes les fonctionnalités ont été exercées dans des conditions réelles de fonctionnement et comparées aux comportements attendus dans les spécifications fonctionnelles (4 Exigences et description détaillée des solutions). Des tests ont été réalisés unitairement et d'autres réalisés avec le produit complet.

8.4.1 Détection par capteur à ultrason

100 essais ont été réalisés à différentes distances pour vérifier la cohérence des mesures et la fiabilité du calcul de médiane.

Les distances testées étaient : 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm, 100 cm, 200 cm.

Résultats observés :

- Stabilité des mesures : variation typique ± 3 à 5 mm autour de la distance réelle
- Taux de médiane correcte : 99 % (99 mesures cohérentes sur 100)
- Aucune valeur aberrante non éliminée par la médiane : 0 occurrence sur 100
- Détection d'un obstacle sous seuil sur 10 cm : 100 % de réussite (30/30 essais)

La stratégie "4 mesures \rightarrow médiane" élimine efficacement les fluctuations, et garantit une cohérence quasi parfaite.

8.4.2 Balayage angulaire du servomoteur

30 cycles complets de balayage ont été réalisés (chaque cycle = 13 positions : $7,5^\circ \rightarrow 172,5^\circ$ par pas de 15°).

Résultats obtenus :

- Positions atteintes correctement : 100 % sur 520 positions testées
- Aucune perte de synchronisation observée : 0/40 cycles
- Écart angulaire estimé (visuel + retour comportemental) : $< \pm 2^\circ$

Le mouvement du servomoteur est suffisamment stable et précis.

8.4.3 Transmissions Wi-Fi entre modules

Plus de 50 cycles complets de transmission ont été effectués, soit environ 650 trames envoyées (13 angles \times 50 cycles).

Résultats :

- Trames reçues correctement : 650 / 650 (100 %)
- Temps moyen entre envoi ESP32 et réception tablette : $\approx 40\text{--}60$ ms
- Aucun décrochage Wi-Fi observé pendant les essais

La communication Wi-Fi est stable, avec un taux de réussite de 100 % sur toute la campagne d'essais.

8.4.4 Affichage et interface utilisateur

40 cycles d'affichage ont été évalués (mise à jour angle + distance + seuil + état système).

Résultats :

- Mise à jour cohérente : 39 / 40 cycles
- Taux d'erreur d'affichage : 1 %
- Temps de rafraîchissement perçu : instantané (pas de décalage visible)
- 2 fois des petits freezes de l'interface

L'affichage reste tout de même stable et reflète fidèlement les données reçues.

8.4.5 Fonction ON/OFF

30 activations/désactivations successives ont été testé avec une petite latence entre chaque appui bouton.

Résultats :

- Désactivation complète de l'acquisition : 30 / 30 essais
- Reprise correcte après 5 secondes : 30 / 30 essais
- Retour systématique du servo à $7,5^\circ$: 30 / 30

Le contrôle ON/OFF fonctionne de manière fiable et reproductible grâce au délai d'attente de 5 secondes entre chaque appui sur ce bouton.

8.4.6 Gestion des seuils de distance

Chaque seuil a été testé 10 fois : 10 cm, 50 cm, 100 cm, 200 cm, 300 cm \rightarrow 5 seuils x 10 essais = 50 essais.

Résultats :

- Déclenchement correct sous seuil : 50 / 50 essais

- Mise à jour en interface immédiatement effective : 100 / 100 essais
- Aucune erreur de prise en compte : 0 occurrence

Le système applique les seuils rapidement et sans défaillance.

8.4.7 Buzzer et alerte sonore

4 niveaux testés : 50, 150, 200, 250. Chaque niveau a été activé 5 fois : 20 essais.

Résultats :

- Volume correct (différence audible) : 40 / 40 essais
- Activation des détections sous seuil : 40 / 40
- Aucune variation inattendue : 0 / 40

Le signal sonore correspond précisément au niveau paramétré dans le code.

8.4.8 Notifications distantes via Pushover

30 notifications ont été générées en conditions réelles.

Résultats :

- Notifications reçues : 30 / 30 (100 %)
- Délai de réception : 1 à 3 secondes selon la charge réseau
- Informations transmises correctes (angle, distance, seuil) : 30 / 30

La chaîne d'alerte distante via l'API Pushover est parfaitement opérationnelle.

8.4.9 Cohérence globale du système

L'ensemble des tests réalisés a montré un comportement fiable et reproductible.

Synthèse des taux de réussite observés :

- Détection et médiane : 99 %
- Servo (positions) : 100 %
- Transmission Wi-Fi: 100 %
- Interface: 97,5 %
- ON/OFF: 100 %
- Seuils : 100 %
- Buzzer : 100 %
- Notifications : 100 %

L'ensemble du dispositif se comporte conformément aux attentes fonctionnelles définies dans les spécifications.

9 Conclusion

Ce document présente les spécifications fonctionnelles, techniques et réglementaires du système ZoneAlert. L'analyse des besoins, des fonctions et de l'architecture matérielle et logicielle a permis de définir clairement les performances attendues ainsi que les contraintes associées au produit.

Les essais réalisés confirment la cohérence du fonctionnement, la fiabilité des mesures, la stabilité des communications et l'efficacité des alertes locales et distantes. L'ensemble des résultats montre que le système répond aux objectifs de surveillance continue et de détection précise dans un environnement intérieur.

Cette spécification fournit une description complète du dispositif ZoneAlert et permet d'en comprendre le fonctionnement, les limites et les exigences pour son exploitation.

10 Bibliographie

Lien Github du projet :

https://github.com/MarvinBibbix/Projet_ZoneAlert

Documents utiles pour les normes

- ETSI EN 300 328 v2.2.2 : en_300328v020101p.pdf
- ETSI EN 303 645 v3.1.0 : en_303645v030103p.pdf
- ETSI EN 301 489-01 v2.2.3 : en_30148901v020203p.pdf
- IEC 62311 :2019 : IEC-62311-2019.pdf

Datasheet constructeur

- ESP32-C6 Datasheet : esp32-c6_datasheet_en.pdf
- ESP32-P4 Datasheet v1.3 : esp32-p4_datasheet_en.pdf
- ESP-WROOM-32 Datasheet : esp-wroom-32_datasheet_en-1223836.pdf
- HC-SR04 Ultrasonic Sensor Datasheet: HCSR04.pdf
- TowerPro SG90 Micro Servo Datasheet: SG90-Servo.pdf

11 Annexes

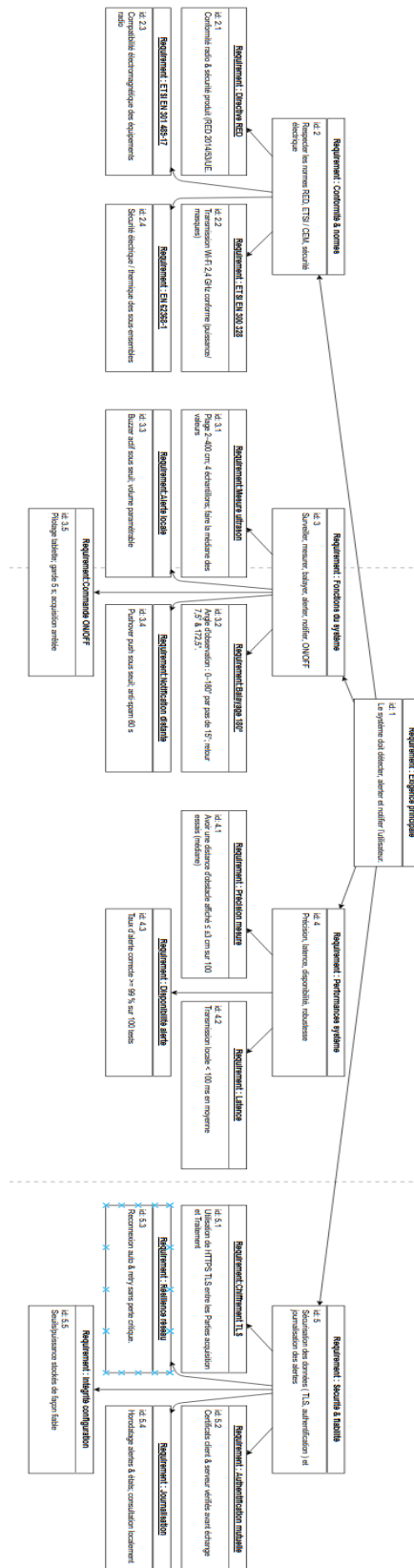


Diagramme des exigences