

ISTY/MECAVENIR
SEE5

Spécification système d'un dispositif de récupération de données environnementales

*Basé sur un coordinateur Zigbee SONOFF PMG24
et un capteur SONOFF SNZB-02*

Alexis AGGEY
Année : 2025–2026

Projet d'élève ingénieur
Encadrant : Mr LATRACHE

Date : 30 novembre 2025

Table des matières

1	Objet, périmètre et contexte	2
1.1	Objet du document	2
1.2	Périmètre du système	2
1.3	Contexte du projet	2
1.4	Audience visée	3
1.5	Références documentaires	3
2	Cadre normatif et réglementaire	4
2.1	Normes radio ETSI et CEPT	4
2.1.1	ETSI EN 300 328 – Systèmes large bande en 2,4 GHz	4
2.1.2	ETSI EN 300 440 – Dispositifs de faible portée (SRD)	5
2.1.3	ERC/CEPT Recommendation 70-03 – Short Range Devices	5
2.1.4	Résumé pour le système PMG24 + SNZB-02	5
2.2	Normes CEM applicables	6
2.3	Normes de sécurité électrique et autres exigences	8
3	Spécifications fonctionnelles	11
3.1	Vue d'ensemble du système de récupération de données	11
3.2	Acquisition et traitement des mesures	12
3.3	Stockage et consultation des données	12
4	Spécifications techniques	13
4.1	Architecture matérielle du système	13
4.2	Spécifications radio et contraintes issues des normes	14
4.3	Données échangées	16
5	Exigences non fonctionnelles	18
5.1	Performance	18
5.2	Fiabilité et aspects d'intégration	19
5.3	Sécurité minimale et exploitation	20

1 Objet, périmètre et contexte

1.1 Objet du document

L'objectif de ce document est de définir les **spécifications** du système de récupération de données environnementales basé sur :

- le dongle **SONOFF PMG24** (coordinateur Zigbee 2,4 GHz) ;
- les capteurs **SONOFF SNZB-02** (température / humidité) ;
- une **machine hôte** assurant l'acquisition, le stockage et la consultation des mesures.

Ce document sert de référence pour la conception, l'intégration et l'évaluation du prototype.

1.2 Périmètre du système

Le périmètre de cette spécification couvre uniquement le système suivant :

- la chaîne de mesure : capteurs SONOFF SNZB-02 → réseau Zigbee 2,4 GHz → dongle SONOFF PMG24 → machine hôte ;
- les paramètres radio associés (bande 2,4 GHz, puissance, contraintes issues des normes ETSI / CEPT) ;
- le traitement de base des données : acquisition, horodatage, stockage local et consultation simple ;
- les exigences non fonctionnelles minimales liées à la performance, à la fiabilité, à l'intégration et à la sécurité d'exploitation.

Les services cloud, la cybersécurité avancée et l'intégration mécanique détaillée ne sont pas inclus dans le périmètre de ce document.

1.3 Contexte du projet

Ce système de récupération de données est développé dans le cadre d'un projet d'élève ingénieur. L'objectif est de mettre en place un prototype simple de surveillance de la température et de l'humidité en utilisant des équipements du commerce :

- le dongle SONOFF PMG24 pour créer et gérer un réseau Zigbee 2,4 GHz ;
- d'un capteur SONOFF SNZB-02 pour mesurer la température et l'humidité ;
- une machine hôte pour recevoir, stocker et consulter les mesures.

Le projet a aussi pour but de se familiariser avec les normes radio, CEM et de sécurité applicables à ce type de système fonctionnant en bande 2,4 GHz.

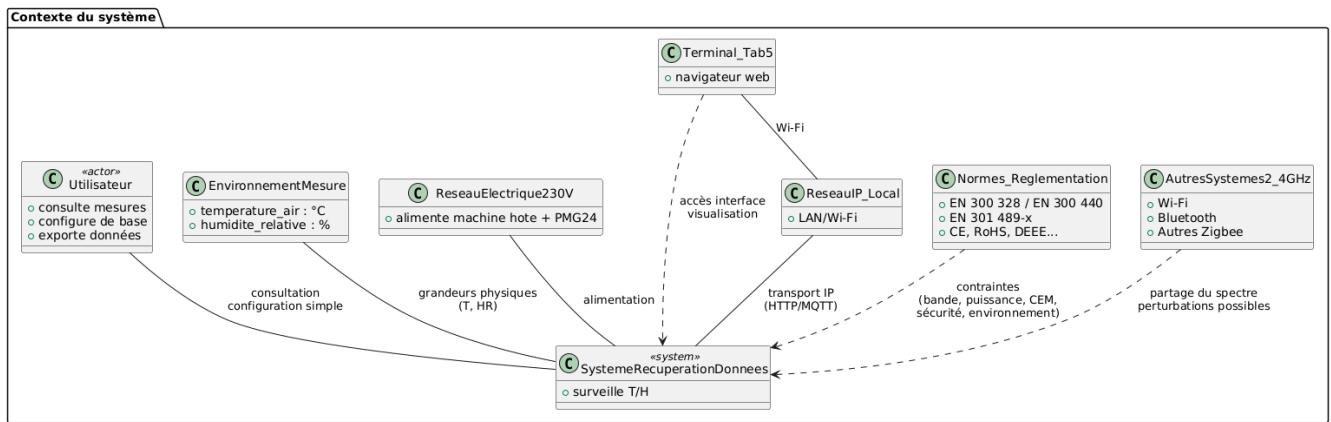


FIGURE 1.1 – diagramme de contexte

1.4 Audience visée

Ce document s'adresse principalement à :

- l'étudiant en charge du développement du prototype ;
- l'encadrant pédagogique qui suit et évalue le projet ;
- toute personne souhaitant comprendre les exigences techniques et réglementaires du système de récupération de données basé sur le PMG24 et les capteurs SNZB-02.

Il peut également servir de base à toute évolution future du prototype vers une version plus complète ou industrialisable.

1.5 Références documentaires

Les documents suivants sont utilisés comme références :

- ETSI EN 300 328 : équipements de transmission de données large bande opérant dans la bande 2,4 GHz ;
- ETSI EN 300 440 : dispositifs de faible portée (SRD) dans la gamme 1 GHz à 40 GHz ;
- ETSI EN 301 489-1 et EN 301 489-17 : exigences de CEM pour les équipements de transmission de données large bande ;
- ERC/CEPT Recommandation 70-03 : cadre d'utilisation des dispositifs de faible portée (SRD) en Europe ;
- Documentation constructeur du dongle SONOFF PMG24 ;
- Documentation constructeur des capteurs SONOFF SNZB-02 ;
- Documentation du chipset radio EFR32MG24 utilisé par le PMG24.

2 Cadre normatif et réglementaire

2.1 Normes radio ETSI et CEPT

Cette section présente les normes radio européennes qui encadrent l'utilisation de la bande 2,4 GHz par le système de récupération de données basé sur le dongle SONOFF PMG24 (coordinateur Zigbee) et les capteurs SONOFF SNZB-02 (capteurs température / humidité Zigbee).

L'objectif est de résumer, de manière simple, les textes principaux et ce qu'ils impliquent concrètement pour le projet.

2.1.1 ETSI EN 300 328 – Systèmes large bande en 2,4 GHz

Objet de la norme

EN 300 328 est la norme radio principale pour les équipements de transmission de données **large bande** opérant dans la bande **2400–2483,5 MHz** (bande ISM 2,4 GHz). Elle couvre notamment le Wi-Fi, le Bluetooth et les systèmes IEEE 802.15.4 / Zigbee utilisés dans ce projet.

Équipements concernés

Dans le cadre du projet, le dongle PMG24 et les capteurs SNZB-02 sont considérés comme des *systèmes de transmission de données large bande* en 2,4 GHz, fonctionnant en technologie Zigbee (802.15.4).

Points clés à retenir

- **Bande de fréquences** : le signal doit rester entièrement dans 2400–2483,5 MHz. Les canaux Zigbee utilisés par le PMG24 doivent respecter cette contrainte.
- **Puissance** : la puissance isotrope rayonnée équivalente (e.i.r.p.) de l'équipement ne doit pas dépasser **100 mW** (20 dBm) dans cette bande.
- **Spectre et émissions indésirables** : la largeur de bande occupée, les émissions hors bande et les émissions parasites doivent rester en dessous des valeurs limites spécifiées par la norme.
- **Partage du spectre** : l'équipement doit intégrer des mécanismes permettant de partager correctement la bande 2,4 GHz avec d'autres systèmes (accès au canal, comportement en cas de collisions).

Conséquences pour le projet

- Le PMG24 et les SNZB-02 doivent être utilisés avec leur configuration radio d'origine (firmware et antenne constructeur).
- Il est interdit d'ajouter un amplificateur RF ou une antenne de gain excessif qui ferait dépasser 20 dBm e.i.r.p.
- Le projet s'appuie sur des produits déjà marqués CE, dont la conformité EN 300 328 est assurée par le constructeur.

2.1.2 ETSI EN 300 440 – Dispositifs de faible portée (SRD)

Objet de la norme

EN 300 440 définit les exigences radio pour les *dispositifs de faible portée* (Short Range Devices) dans la plage de **1 GHz à 40 GHz**. Elle décrit différentes bandes et applications (télémesure, télécommande, etc.), y compris la bande 2400–2483,5 MHz.

Rôle par rapport au projet

- Elle situe le système dans la famille des **SRD** (dispositifs à courte portée).
- Elle rappelle les limites de puissance rayonnée et les règles générales d'utilisation de ces bandes.
- Pour un système de données large bande en 2,4 GHz, la norme de référence reste toutefois EN 300 328 ; EN 300 440 est surtout une norme de contexte SRD.

2.1.3 ERC/CEPT Recommendation 70-03 – Short Range Devices

Objet de la recommandation

La Recommandation ERC 70-03 est un document du CEPT qui fixe le **cadre d'utilisation des dispositifs de faible portée** dans les pays européens (bandes autorisées, puissances maximales, limitations éventuelles de duty cycle, renvoi aux normes ETSI, etc.).

Partie pertinente pour le projet

- L'annexe relative aux **systèmes de transmission de données large bande** autorise l'usage de la bande **2400–2483,5 MHz** avec une puissance maximale de **100 mW e.i.r.p.**
- Cette annexe renvoie directement à la norme EN 300 328 pour la démonstration de conformité.

Conséquences pour le projet

- Le système PMG24 + SNZB-02 est bien dans la catégorie des **Short Range Devices** fonctionnant en bande 2,4 GHz.
- L'utilisation est dite *licence-exempt* : aucune licence radio individuelle n'est nécessaire tant que les limites de puissance et de bande sont respectées.

2.1.4 Résumé pour le système PMG24 + SNZB-02

En synthèse :

- EN 300 328 est la **norme radio principale** qui encadre le fonctionnement Zigbee 2,4 GHz du dongle PMG24 et des capteurs SNZB-02 ;
- EN 300 440 et la Recommandation ERC 70-03 fournissent le **cadre SRD** (dispositif de faible portée) et confirment l'utilisation de la bande 2400–2483,5 MHz avec 100 mW e.i.r.p. max ;
- le projet doit donc s'assurer que l'intégration du PMG24 et des SNZB-02 ne modifie pas leurs paramètres radio (puissance, antenne, bande) afin de rester dans ce cadre réglementaire.

2.2 Normes CEM applicables

Cette section présente les normes de **Compatibilité ÉlectroMagnétique (CEM)** applicables au système de récupération de données basé sur le dongle SONOFF PMG24 et les capteurs SONOFF SNZB-02.

L'objectif est de résumer les textes principaux et d'expliquer ce qu'ils impliquent concrètement pour le projet.

ETSI EN 301 489-1 – Exigences CEM générales

Objet de la norme

ETSI EN 301 489-1 est la **partie générale** de la série 301 489. Elle définit les exigences CEM communes à tous les équipements radio :

- méthodes d'essais CEM (émissions et immunité) ;
- classification environnementale (équipement fixe, portable, véhiculé, etc.) ;
- types de ports à considérer : port d'alimentation DC, port secteur AC, ports de réseau filaire, boîtier (*enclosure*), etc. :contentReference[oaicite :0]index=0

Cette norme sert de **base commune** : les parties spécifiques, comme EN 301 489-17, renvoient à EN 301 489-1 pour les méthodes de mesure et les niveaux de sévérité, sauf indications contraires.

ETSI EN 301 489-17 – Conditions spécifiques pour systèmes large bande

Objet de la norme

ETSI EN 301 489-17 est la partie **spécifique** aux systèmes de transmission de données *broadband / wideband*, dont :

- les systèmes large bande 2,4 GHz conformes à EN 300 328 (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee, etc.) ;
- d'autres technologies large bande (5 GHz RLAN, 60 GHz, etc.).

Le système PMG24 + SNZB-02, basé sur Zigbee 2,4 GHz, entre donc dans le champ d'application de EN 301 489-17 comme *Broadband / Wideband Data Transmission System*. :contentReference[oaicite :2]index=2

Ce que précise EN 301 489-17

- Elle renvoie à EN 301 489-1 pour les **conditions d'essai**, les types de ports et les niveaux de sévérité, sauf cas particuliers.
- Elle définit des **critères de performance** A, B et C adaptés aux systèmes de données (PER, pertes de fonction, etc.).
- Elle précise les **phénomènes CEM** à tester : émissions conduites et rayonnées, immunité aux champs RF, ESD, transitoires, surtensions, creux et coupures de tension, selon le type d'équipement (fixe, portable, etc.).

Critères de performance (simplifiés)

Les critères définissent comment l'équipement doit se comporter pendant et après les essais d'immunité :

- **Critère A** : le système doit *continuer à fonctionner normalement pendant le test* sans perte de fonction ni transmission intempestive.
- **Critère B** : une perturbation temporaire est tolérée pendant le test (perte de liaison, erreur de trame), mais le système doit se *rétablir automatiquement* ensuite, sans perte de données critiques.
- **Critère C** : le système peut s'arrêter pendant le test (par exemple en cas de coupure secteur longue), mais il doit *repartir après intervention de l'opérateur* (redémarrage) sans perte de données critiques.

Pour les systèmes de données comme le Zigbee, “fonctionner comme prévu” signifie typiquement :

- taux d'erreur de paquets (PER) inférieur ou égal à une valeur fixée (par exemple 10 %) pendant les essais ;
- pas de blocage durable de la pile de communication ni de perte de la fonction radio. :contentReference[oaicite :7]index=7

Essais d'émission (exemples)

Selon le tableau 3 de EN 301 489-17, les essais d'**émission CEM** couvrent notamment :

- émissions rayonnées depuis le boîtier (*enclosure*) ;
- émissions conduites sur le port d'alimentation DC (pour le PMG24 via USB et pour la machine hôte) ;
- émissions conduites sur le port secteur AC de la machine hôte si elle est alimentée sur le réseau ;
- émissions conduites sur les ports de réseau filaire (Ethernet...) si présents.

Essais d'immunité (exemples)

Le tableau 5 de EN 301 489-17 reprend les essais d'**immunité** définis dans EN 301 489-1 :

- champs RF rayonnés (80 MHz à 6 GHz) appliqués sur le boîtier ;
- décharges électrostatiques (ESD) sur le boîtier et les points accessibles ;
- transitoires rapides (EFT/Burst) sur les câbles d'alimentation et de signaux ;
- RF en mode commun (0,15 MHz à 80 MHz) injectée sur les câbles ;
- creux et coupures de tension, et surtensions sur le port d'alimentation secteur (pour l'hôte) ;
- conditions particulières pour les surtensions sur les ports de données haut débit (cas des réseaux filaires rapides).

Conséquences pratiques pour le système PMG24 + SNZB-02

Dans le projet, on considère que le dongle PMG24 et les capteurs SNZB-02 sont des produits radio marqués CE, donc déjà testés selon EN 301 489-17 et EN 301 489-1 par le fabricant.

Pour l'**intégrateur du système de récupération de données**, les points clés sont les suivants :

- Utiliser des alimentations et une machine hôte conformes aux normes CEM usuelles (alimentation CE, câblage propre).

- Éviter d'ajouter des câbles très longs, non blindés, passant à proximité de sources de perturbations fortes (variateurs, relais de puissance, etc.).
- Installer le PMG24 et la machine hôte dans un environnement comparable à celui visé par la norme (bureaux, locaux techniques, etc.).
- Vérifier, lors des essais système, que la fonction principale (remontée de mesures des capteurs et stockage) reste opérationnelle après des perturbations typiques (coupure secteur courte, débranchement/rebranchement USB, etc.), en cohérence avec les critères A, B et C.

En résumé, la CEM du système repose sur :

- la conformité des produits radio PMG24 / SNZB-02 à EN 301 489-17 ;
- l'application correcte des règles d'intégration de EN 301 489-1 (câblage, alimentation, environnement) au niveau du système.

2.3 Normes de sécurité électrique et autres exigences

Cette section ne repose pas sur les normes radio ETSI, mais sur les exigences générales de **sécurité électrique** et de **mise sur le marché** des équipements utilisés :

- dongle USB SONOFF PMG24 (coordinateur Zigbee) ;
- capteurs SONOFF SNZB-02 (capteurs température/humidité sur batterie) ;
- machine hôte (PC ou mini-PC) alimentant le dongle.

L'objectif est de préciser, à un niveau système, les points de vigilance à respecter pour garantir la sécurité des utilisateurs et la conformité réglementaire minimale.

Sécurité électrique de la machine hôte et du dongle PMG24

Le dongle PMG24 est un **périphérique USB** alimenté typiquement en 5 V par la machine hôte. La sécurité électrique globale dépend donc principalement :

- de la **machine hôte** (PC, mini-PC, SBC) ;
- de l'**alimentation secteur** de cette machine.

Points clés à respecter :

- Utiliser une machine hôte et une alimentation **marquées CE**, provenant de fabricants reconnus.
- Ne pas modifier le câblage interne ni les protections électriques (fusibles, terre, isolations) de la machine hôte.
- Ne pas alimenter le dongle PMG24 à partir de sources improvisées (montages non certifiés, alimentations “de labo” non protégées) dans la version destinée à un usage réel.
- S’assurer que le dongle est installé dans un environnement conforme aux conditions prévues : température ambiante, absence d’humidité excessive, ventilation suffisante autour de l’hôte.

Dans la plupart des cas, le PMG24 respecte les exigences de sécurité électrique en tant que périphérique USB basse tension. Le rôle de l'intégrateur est de **maintenir cette sécurité** en choisissant un hôte et une alimentation conformes, et en évitant toute modification non prévue (soudures, dérivations, alimentation directe des pistes, etc.).

Sécurité électrique et batterie des capteurs SNZB-02

Les capteurs SNZB-02 sont alimentés par une **pile bouton** (type CR2450 en général). Les risques principaux sont liés :

- à une mauvaise manipulation de la pile (inversion de polarité, court-circuit, tentative de recharge d'une pile non rechargeable) ;
- à l'ingestion accidentelle de la pile par des enfants ;
- à une utilisation hors de la plage de température spécifiée (risques de fuite ou de dégradation de la pile).

Recommandations au niveau système :

- Respecter les consignes du constructeur pour le remplacement des piles (type, polarité, procédure).
- Prévoir, dans la documentation du système, une mention claire du **risque lié aux piles bouton** (en particulier dans les environnements où des enfants peuvent être présents).
- Installer les capteurs dans des emplacements où ils ne sont pas facilement accessibles à des personnes non autorisées (enfants, public).
- Ne pas exposer les capteurs à des températures ou humidités extrêmes dépassant les spécifications (risques de fuite de pile, condensation, corrosion).

Autres exigences réglementaires (marquage CE, environnement, RoHS)

En plus des normes radio et CEM, les équipements du système doivent respecter les exigences générales associées au marquage CE et à la mise sur le marché d'équipements électroniques :

- **Marquage CE** : le PMG24 et les SNZB-02 doivent porter le marquage CE, attestant qu'ils sont conformes aux directives applicables (sécurité, CEM, utilisation du spectre, etc.).
- **Substances dangereuses (RoHS)** : les équipements ne doivent pas contenir de substances dangereuses au-delà des limites autorisées (plomb, mercure, cadmium, etc.). Cette conformité est en général prise en charge par le fabricant.
- **Environnement et fin de vie (DEEE, piles)** : les équipements et les piles doivent être éliminés dans des filières adaptées (déchetterie, collecte spécifique), conformément aux réglementations sur les déchets d'équipements électriques et électroniques et sur les piles.

Conséquences pour le projet :

- Le projet s'appuie volontairement sur des produits du commerce déjà **marqués CE**, ce qui simplifie la gestion des normes de sécurité électrique et environnementale.
- L'intégrateur ne doit pas modifier les produits de façon à remettre en cause ce marquage (ouverture permanente, ajout de circuits non prévus, suppression de protections).

- La documentation du système doit rappeler les règles de base de sécurité électrique (utiliser uniquement les alimentations recommandées, ne pas ouvrir les équipements, procédure de remplacement des piles, élimination des DEEE).

En résumé, la sécurité électrique et les autres exigences réglementaires sont principalement garanties par le choix de produits PMG24 / SNZB-02 déjà conformes. Le rôle de la spécification constructeur au niveau système est de s'assurer que l'intégration et l'utilisation ne détériorent pas cette conformité, et que les bonnes pratiques sont clairement communiquées à l'utilisateur final.

3 Spécifications fonctionnelles

3.1 Vue d'ensemble du système de récupération de données

Le système a pour rôle de récupérer des mesures de température et d'humidité dans un environnement intérieur, puis de les rendre disponibles sur une machine hôte.

Il est composé de trois éléments principaux :

- des capteurs SONOFF SNZB-02 qui mesurent la température et l'humidité ;
- un dongle SONOFF PMG24 qui crée un réseau Zigbee 2,4 GHz et reçoit les messages envoyés par les capteurs ;
- une machine hôte qui reçoit les données du PMG24, les enregistre et permet de les consulter.

La fonction globale du système est donc : mesure par les capteurs, transmission sans fil via Zigbee, puis récupération et stockage des données sur la machine hôte.

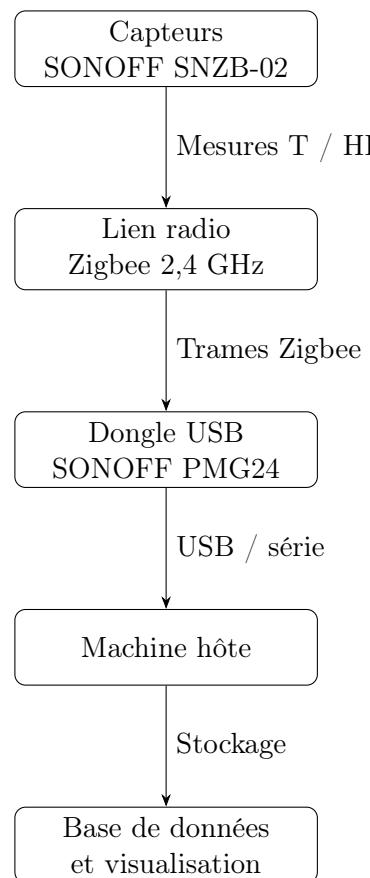


FIGURE 3.1 – Vue fonctionnelle du système de récupération de données

3.2 Acquisition et traitement des mesures

Les fonctions suivantes sont définies comme exigences fonctionnelles du système :

- **F-01** : le système doit recevoir, via le dongle SONOFF PMG24, les messages envoyés par chaque capteur SONOFF SNZB-02 contenant les valeurs de température et d'humidité.
- **F-02** : le système doit associer à chaque mesure un identifiant de capteur et un horodatage sur la machine hôte.
- **F-03** : le système doit vérifier que les valeurs reçues se trouvent dans des plages raisonnables définies pour le projet et marquer ou rejeter les valeurs manifestement incohérentes.
- **F-04** : le système doit préparer les mesures dans un format homogène afin qu'elles puissent être stockées et consultées facilement.

3.3 Stockage et consultation des données

Les exigences fonctionnelles liées au stockage et à la consultation des mesures sont les suivantes :

- **F-05** : le système doit enregistrer chaque mesure dans une base de données ou un fichier structuré en mémorisant au minimum l'identifiant du capteur, la date et l'heure de la mesure, la température et l'humidité relative.
- **F-06** : le système doit conserver un historique des mesures sur une durée suffisante pour permettre l'analyse (par exemple plusieurs jours ou semaines, selon l'espace disponible).
- **F-07** : le système doit permettre la consultation des mesures par capteur et par période, sous forme de tableau ou de graphique simple.
- **F-08** : le système doit offrir une possibilité d'export des données (par exemple au format CSV) pour une exploitation dans d'autres outils.

4 Spécifications techniques

4.1 Architecture matérielle du système

L'architecture matérielle du système de récupération de données est basée sur trois types de blocs principaux :

- le **dongle SONOFF PMG24**, utilisé comme coordinateur du réseau Zigbee 2,4 GHz ;
- les **capteurs SONOFF SNZB-02**, qui mesurent la température et l'humidité dans les différentes zones ;
- la **machine hôte**, qui exécute le logiciel de récupération et de stockage des données.

Dongle SONOFF PMG24

Le PMG24 est une clé USB radio Zigbee. Dans le cadre du projet, il assure les fonctions suivantes :

- création et gestion du réseau Zigbee 2,4 GHz (coordinateur du réseau) ;
- communication radio bidirectionnelle avec tous les capteurs SNZB-02 ;
- transfert des trames Zigbee vers la machine hôte via une interface série virtuelle sur le port USB.

Il est alimenté en 5 V par le port USB de la machine hôte et utilise l'antenne fournie par le constructeur, conformément aux contraintes de puissance et de bande de fréquences définies dans les normes radio étudiées au chapitre précédent.

Capteurs SONOFF SNZB-02

Les SNZB-02 sont des capteurs terminaux Zigbee alimentés par une pile bouton. Leur rôle dans le système est :

- mesurer la **température** de l'air (en °C) ;
- mesurer l'**humidité relative** (en %) ;
- transmettre ces mesures, à intervalles réguliers ou lorsqu'une variation significative est détectée, au coordinateur PMG24 via le réseau Zigbee.

Chaque capteur est identifié de manière unique dans le réseau (identifiant Zigbee) et sera associé à un nom logique et à une localisation dans la base de données (par exemple « Salle serveur », « Couloir 1 », etc.).

Machine hôte

La machine hôte (PC ou mini-PC) assure la partie traitement :

- pilotage du dongle PMG24 via le pilote USB et le middleware Zigbee ;
- exécution du *service d'acquisition* qui reçoit les mesures, les valide et les stocke ;

- hébergement de la base de données et, le cas échéant, d'une interface de consultation (interface web ou outil de visualisation).

Les ressources minimales requises sont modestes (quelques coeurs CPU, 2 à 4 Go de RAM), le système étant principalement limité par le nombre de capteurs à gérer et l'historique conservé.

4.2 Spécifications radio et contraintes issues des normes

Cette section précise les paramètres radio retenus pour le réseau Zigbee 2,4 GHz du projet, ainsi que les principales contraintes imposées par les normes étudiées au chapitre *Cadre normatif et réglementaire*.

Paramètres radio du réseau Zigbee

Dans le projet, le dongle PMG24 est configuré comme coordinateur d'un réseau Zigbee 2,4 GHz auquel sont rattachés les capteurs SNZB-02. Les paramètres radio essentiels sont les suivants :

- **Technologie physique** : IEEE 802.15.4, profil *Zigbee 3.0* en bande 2,4 GHz.
- **Bandes de fréquences utilisées** : 2400–2483,5 MHz (bande ISM 2,4 GHz autorisée pour les systèmes de transmission de données large bande).
- **Canal Zigbee** : canal unique choisi dans la plage standard (par exemple canal 11 à 26), de façon à rester entièrement dans la bande 2400–2483,5 MHz et à limiter le recouvrement avec les canaux Wi-Fi les plus chargés.
- **Topologie du réseau** : réseau en étoile ou maillé léger, avec le PMG24 en coordinateur et les capteurs SNZB-02 en nœuds terminaux.
- **Puissance d'émission configurée** : valeur par défaut du constructeur, de manière à ce que la puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP) de l'ensemble émetteur + antenne reste inférieure ou égale à 100 mW (20 dBm).

Contraintes issues des normes radio

Les normes radio applicables (principalement EN 300 328 et la Recommandation ERC 70-03) imposent les contraintes suivantes, que le système doit respecter :

- **Bandes autorisées** : les signaux émis par le PMG24 et les capteurs SNZB-02 doivent rester entièrement dans la bande 2400–2483,5 MHz.
- **Puissance maximale** : la puissance isotrope rayonnée équivalente (EIRP) de chaque équipement ne doit pas dépasser 100 mW (20 dBm). Le projet s'engage à ne pas modifier la puissance d'émission prévue par le constructeur.
- **Densité de puissance et spectre** : la densité de puissance émise et la largeur de bande occupée doivent rester compatibles avec les limites fixées pour les systèmes de transmission de données large bande (respect des masques d'émission et des niveaux d'émissions hors bande et parasites).

- **Partage du spectre** : le comportement radio doit permettre la cohabitation avec d'autres systèmes fonctionnant en 2,4 GHz (Wi-Fi, Bluetooth, autres Zigbee). Le réseau Zigbee du projet s'appuie sur les mécanismes d'accès au canal prévus par la pile Zigbee (écoute de canal, back-off, etc.).

Contraintes d'intégration liées aux normes

À partir de ces exigences, les contraintes d'intégration retenues dans la spécification technique sont les suivantes :

- le dongle PMG24 est utilisé avec son **firmware radio d'origine** et l'antenne fournie ; aucune modification matérielle (amplificateur RF, antenne à gain élevé) n'est autorisée ;
- les capteurs SNZB-02 sont utilisés sans modification de leur partie radio (puissance, bande, firmware) ;
- le positionnement du PMG24 est choisi pour assurer une couverture radio suffisante sans nécessiter d'augmentation de puissance (éloignement des armoires métalliques fermées, possibilité d'utiliser une petite rallonge USB pour dégager l'antenne) ;
- les modes de test radio continus (émission permanente, canaux de test) éventuellement disponibles ne sont utilisés qu'en laboratoire, jamais en situation normale d'exploitation du système.

Ces choix garantissent que le système de récupération de données respecte, au niveau intégration, les contraintes de bande, de puissance et de comportement radio définies par les normes applicables, tout en restant cohérent avec le matériel constructeur : :contentReference[oaicite :0]index=0

RF chipset

Le dongle SONOFF PMG24 utilise un système sur puce radio (SoC) **EFR32MG24** de chez **Silicon Labs**. Ce composant intègre à la fois le microcontrôleur et la partie RF 2,4 GHz.

- **Fabricant** : Silicon Labs (SiLabs) ;
- **Référence** : EFR32MG24 (famille MG24) ;
- **Cœur MCU** : Arm Cortex-M33, fréquence typique 78 MHz ;
- **Mémoire** : environ 1,5 Mo de Flash et 256 ko de RAM (valeurs typiques pour les variantes utilisées dans le PMG24) ;
- **Bandé RF** : 2,4 GHz, support IEEE 802.15.4 ;
- **Protocoles pris en charge par le SoC** : Zigbee 3.0, Thread/OpenThread, Matter (via 802.15.4), Bluetooth Low Energy, autres protocoles propriétaires 2,4 GHz ;
- **Protocole utilisé dans ce projet** : uniquement **Zigbee 3.0** pour la communication avec les capteurs SONOFF SNZB-02.

L'utilisation d'un SoC EFR32MG24 permet de bénéficier d'une plateforme radio moderne, avec des ressources mémoire suffisantes pour supporter à la fois la pile Zigbee et les futures évolutions logicielles, tout en restant conforme aux normes ETSI applicables en bande 2,4 GHz.

4.3 Données échangées

Cette section décrit uniquement les informations essentielles échangées entre les capteurs SONOFF SNZB-02, le dongle PMG24 et la machine hôte, du point de vue du système de récupération de données.

Nature des données

Chaque capteur SNZB-02 transmet périodiquement des mesures environnementales au coordinateur Zigbee (PMG24), qui les relaie vers la machine hôte. Les informations utiles pour le système sont :

- l'identifiant du capteur (adresse Zigbee ou identifiant logique associé dans la base de données) ;
- un horodatage de la mesure (date et heure) ;
- la **température** de l'air, exprimée en degrés Celsius (°C) ;
- l'**humidité relative** de l'air, exprimée en pourcentage (%) ;
- éventuellement un indicateur d'état de **batterie** (par exemple « OK » / « faible ») ;
- éventuellement un indicateur de **qualité radio** (RSSI ou LQI) associé à la trame reçue.

Utilisation des données côté système

Les données reçues sont :

- validées (plages de valeurs cohérentes, capteur reconnu) ;
- enregistrées dans la base de données avec leur horodatage et l'identifiant de capteur ;
- mises à disposition des fonctions de consultation et d'analyse (courbes de température/humidité, suivi de l'état des capteurs).

Les détails d'implémentation logicielle (protocoles internes, format exact des trames) ne sont pas figés dans cette spécification et peuvent varier selon les choix de développement, tant que les informations ci-dessus sont correctement transportées et stockées.

Spécifications générales	
Type de système	Passerelle Zigbee USB (SONOFF PMG24) + capteurs T/H Zigbee (SONOFF SNZB-02)
Application	Supervision de température et d'humidité en intérieur (locaux techniques, pièces, couloirs)
Mode de fonctionnement	Transceiver duplex (émission / réception Zigbee)
Spécifications de fréquence	
Bande de fréquences	2400 MHz à 2483,5 MHz (bande ISM 2,4 GHz)
Standard radio	IEEE 802.15.4 / Zigbee 3.0
Canaux Zigbee	Canaux 11 à 26 (2,4 GHz), canal nominal configurable selon l'environnement
Spécifications émetteur (PMG24 / SNZB-02)	
Puissance de sortie RF (PMG24)	≤ 10 dBm (valeur typique EU, firmware constructeur) ; EIRP totale ≤ 20 dBm avec antenne d'origine
Modulation	DSSS/O-QPSK à 2,4 GHz (IEEE 802.15.4)
Emissions parasites	Conformes aux limites des normes EN 300 328 / EN 300 440 (émissions hors bande et spurious)
Spécifications récepteur (indicatif)	
Récepteur PMG24	Sensibilité de l'ordre de -100 dBm à 250 kb/s (valeur typique pour SoC EFR32MG24, à confirmer par la fiche constructeur)
Récepteur SNZB-02	Caractéristiques radio basées sur le même standard Zigbee 3.0 (sensibilité comparable, cf. documentation SONOFF)
Spécifications d'antenne (PMG24)	
Type d'antenne	Antenne externe type monopôle/dipôle fournie (connecteur SMA)
Gain d'antenne	Gain typique 3 dBi (optimisable jusqu'à environ 4,5 dBi avec antenne compatible)
Polarisation	Principalement verticale (dépend de l'orientation mécanique de l'antenne)
Caractéristiques environnementales	
Alimentation PMG24	5 V DC via USB, courant max. typique 500 mA, consommation en veille ≈ 40 mW
Alimentation SNZB-02	Pile bouton 3 V type CR2450
Plage de température (SNZB-02)	Environ -10 °C à +40 °C (utilisation intérieure)
Plage d'humidité (SNZB-02)	10 % à 90 % HR (sans condensation)
Chipset RF	
SoC radio PMG24	Silicon Labs EFR32MG24 (SoC multiprotocole 2,4 GHz)
Protocole	Zigbee 3.0 (compatibilité avec diverses passerelles et stacks open source)
Normes et certifications (rappel)	
Normes ETSI	EN 300 328 (radio 2,4 GHz), EN 300 440 (SRD), EN 301 489-1 / -17 (CEM)
Autres	Marquage CE, conformité FCC pour les versions destinées au marché nord-américain

TABLE 4.1 – Résumé des principales spécifications du système PMG24 + SNZB-02

5 Exigences non fonctionnelles

Les exigences non fonctionnelles définissent le niveau de qualité attendu pour le système de récupération de données, au-delà de ce qu'il doit faire fonctionnellement. Elles sont importantes pour ce projet car il ne suffit pas que les capteurs envoient des mesures : il faut que ces mesures arrivent à temps, de manière fiable, et que le système reste exploitable dans la durée.

5.1 Performance

Cette section regroupe les exigences liées aux performances du système, principalement en termes de **latence** de remontée des données et de **capacité** (nombre de capteurs supportés).

Latence de remontée des données

L'objectif de la latence est de s'assurer que les données mesurées par les capteurs sont disponibles suffisamment rapidement sur la machine hôte pour que la supervision ait un intérêt pratique.

— NF-01 – Latence bout-en-bout

Le délai entre l'émission d'une mesure par un capteur SNZB-02 et la disponibilité de cette mesure dans la base de données de la machine hôte doit être inférieur ou égal à **5 secondes** en conditions nominales (réseau Zigbee stable, charge normale).

— NF-02 – Variabilité de la latence

La latence ne doit pas être extrêmement variable : en fonctionnement normal, au moins 95 % des mesures doivent être disponibles en moins de 5 secondes.

Ces exigences sont cohérentes avec la nature du projet : il ne s'agit pas de contrôle temps réel strict, mais d'un système de supervision environnementale. Une latence de quelques secondes est acceptable, mais des délais de plusieurs minutes ne le seraient pas.

Capacité en nombre de capteurs

Le système doit être capable de gérer un certain nombre de capteurs sans dégradation notable des performances.

— NF-03 – Nombre de capteurs par coordinateur

Le système doit pouvoir gérer au moins **50 capteurs SNZB-02** actifs simultanément sur un même dongle PMG24, avec une période nominale de mesure de 60 s, sans perte systématique de données.

— NF-04 – Charge processeur et mémoire

Le traitement de ces 50 capteurs ne doit pas saturer les ressources de la machine hôte : le logiciel d'acquisition et de stockage doit fonctionner correctement sur une configuration minimale de type mini-PC (quelques coeurs CPU, 2 à 4 Go de RAM).

Cohérence avec le projet

Ces exigences de performance sont directement liées à l'objectif du système :

- la **latence** garantit que les données récupérées par le pivot PMG24 sont exploitables en quasi temps réel pour la surveillance des locaux ;
- la **capacité** garantit que la solution reste utilisable même si le nombre de capteurs augmente (extension à plusieurs pièces ou couloirs) sans devoir changer d'architecture.

Elles complètent les exigences fonctionnelles (qui décrivent le *quoi*) en fixant clairement le *niveau de qualité* attendu pour le fonctionnement du système de récupération de données.

5.2 Fiabilité et aspects d'intégration

Cette section regroupe les exigences non fonctionnelles liées :

- à la **fiabilité** du système de récupération de données (comportement en cas de petits incidents) ;
- aux **aspects d'intégration** matériels de base (câblage, alimentation, positionnement des équipements), en cohérence avec les contraintes CEM et de sécurité vues au chapitre précédent.

L'objectif est de fixer un niveau minimal de qualité attendu pour le prototype : le système doit rester utilisable et compréhensible dans un contexte réel, même si des fonctions avancées ne sont pas encore mises en œuvre.

Fiabilité de fonctionnement

— NF-05 – Conservation de la configuration minimale

La configuration de base du système (identifiant du réseau Zigbee, liste des capteurs connus, paramètres généraux) doit être conservée sur un support non volatile. Après un redémarrage de la machine hôte, cette configuration doit être restaurée automatiquement, afin d'éviter de devoir reconfigurer le système à chaque démarrage.

— NF-06 – Journalisation des incidents

En cas d'incident simple (perte de communication avec le dongle PMG24, absence prolongée de mesures, erreur d'accès à la base de données), le logiciel doit au minimum écrire un message explicite dans un fichier de *log*. Cette trace doit permettre de comprendre a posteriori ce qui s'est passé.

Ces exigences restent compatibles avec l'état actuel du projet : même si l'appairage et toutes les fonctions ne sont pas encore opérationnels, la spécification fixe un objectif clair de fiabilité minimale pour le prototype (ne pas repartir de zéro à chaque reboot, et ne pas rester silencieux en cas de problème).

Aspects d'intégration

Les aspects d'intégration visent à respecter, au niveau système, les contraintes issues des normes CEM et de sécurité électrique, sans entrer dans le détail des essais de laboratoire.

— **NF-07 – Alimentation et câblage du PMG24**

Le dongle PMG24 doit être alimenté par un port USB d'une machine hôte marquée CE, avec un câblage propre (éviter les rallonges multiples, adaptateurs de mauvaise qualité) afin de limiter les risques de perturbations CEM et de coupures intempestives.

— **NF-08 – Positionnement du PMG24**

Le PMG24 doit être positionné de manière à garantir une couverture radio correcte des capteurs (éviter les armoires métalliques fermées, les écrans massifs) tout en restant cohérent avec les recommandations CEM (éviter les sources de perturbations très fortes à proximité).

— **NF-09 – Installation des capteurs SNZB-02**

Les capteurs doivent être installés dans des conditions compatibles avec leurs spécifications (plages de température et d'humidité, accès raisonnable pour le remplacement des piles) et fixés de façon à ne pas tomber ou être manipulés par inadvertance.

Ces aspects d'intégration complètent les normes CEM et de sécurité : au lieu de refaire toute la théorie, la spécification précise simplement comment le PMG24, les capteurs SNZB-02 et la machine hôte doivent être installés pour que le système reste fiable et conforme dans un contexte réel.

5.3 Sécurité minimale et exploitation

Cette section définit un niveau de **sécurité minimale** pour le système de récupération de données, ainsi que quelques règles d'exploitation. L'objectif n'est pas de faire de la cybersécurité avancée, mais de garantir que le système ne peut pas être modifié ou utilisé n'importe comment, et que les données restent raisonnablement protégées.

Ces exigences sont importantes pour ce projet car :

- le système repose sur une machine hôte accessible (PC, mini-PC) ;
- une mauvaise manipulation (suppression de données, changement de configuration, arrêt du service) pourrait rendre la supervision inopérante ;
- les données stockées (température, humidité) ne sont pas sensibles au sens strict, mais elles doivent rester fiables et traçables.

Contrôle d'accès de base

— **NF-10 – Protection de l'accès à la machine hôte**

L'accès au système d'exploitation de la machine hôte doit être protégé par un compte utilisateur avec mot de passe. Les comptes par défaut sans mot de passe ou en accès libre ne sont pas acceptables pour l'exploitation du système.

— **NF-11 – Accès à l'interface de supervision**

Si une interface de supervision (interface web ou autre outil graphique) est mise en place, l'accès aux fonctions sensibles (modification de la configuration, arrêt/reprise du service d'acquisition, suppression de données) doit être protégé au minimum par un identifiant et un mot de passe.

Ces exigences restent simples mais elles évitent que n'importe qui puisse arrêter le système ou modifier les paramètres critiques depuis la machine hôte.

Intégrité et traçabilité des données

— NF-12 – Protection contre les modifications non contrôlées

Les fichiers ou bases de données contenant l'historique des mesures ne doivent pas être modifiés directement par l'utilisateur final (pas de modification « à la main » dans les fichiers bruts). Les opérations de maintenance (purge, export, sauvegarde) doivent passer par des outils ou procédures identifiés.

— NF-13 – Sauvegarde minimale

Une procédure simple de sauvegarde périodique des données (par exemple copie de la base ou des fichiers de mesures sur un support externe) doit être prévue pour éviter une perte totale en cas de panne de la machine hôte.

Ces points garantissent que les données de température/humidité, même si elles ne sont pas critiques, restent cohérentes et peuvent être exploitées dans le temps (historique fiable).

Règles d'exploitation normales

— NF-14 – Conditions normales d'utilisation

Le système doit être exploité dans les conditions environnementales prévues pour les équipements utilisés (température ambiante typique, absence d'humidité excessive sur la machine hôte et le PMG24).

— NF-15 – Manipulations autorisées

Les manipulations sur les capteurs (remplacement de pile, repositionnement) et sur le PMG24 (branchements, débranchements) doivent être réalisées par une personne informée de la procédure, de manière à ne pas endommager le matériel ni perturber la configuration logicielle.

Lien avec le projet

Pour ce système basé sur le PMG24 et les capteurs SNZB-02, ces exigences de sécurité minimale et d'exploitation permettent :

- d'éviter des arrêts intempestifs ou des changements de configuration non maîtrisés ;
- de garantir un minimum de protection des données collectées (intégrité, sauvegarde) ;
- de montrer, dans le cadre du dossier de spécification, que l'intégration ne se limite pas aux aspects radio et CEM, mais prend aussi en compte l'utilisation réelle du système par un opérateur.

Elles complètent ainsi les exigences de performance (5.1) et de fiabilité / intégration (5.2) pour donner une vision globale de la qualité attendue du système de récupération de données.