

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université de Bordj Bou Arreridj



START-UP

En vue de l'obtention d'un diplôme de master en systèmes de télécommunications.
-Décret Exécutif no 1275-

Conception d'un réseau des capteurs intelligents pour la détection des gaz toxiques CO/Butane

GASGUARD HOME (GGH)

Présenté par :

FETHALLAH Abderrahim
ABLAOUI Ziad
BENMALEK Hocine
ATOUI Mohamed Lamine
CHETIOUI Mehdi

Sous la supervision de :

BELAZZOUG MASSINISSA
MCA à l'institut d'électronique et de télécommunications

Soutenu le 30.06.2026 devant le jury composé de :

Président : **Pr. Asbai Nassim**
Examinatrice : **Dr. Adoui Ibtissem**
Représentante de l'Incubateur d'Entreprises : **Dr. Loukrize Soumia**

Dédicaces

*Ce travail, aussi modeste soit-il,
est le reflet de cinq chemins qui se sont croisés,
portés par un même élan, une même passion.*

Nous le déposons humblement entre les mains de ceux qui ont éclairé notre route.

À nos parents, nos premiers soleils. Vous qui avez été, depuis l'aube de nos vies, une source intarissable de bonheur, de courage et de réussite. Merci pour cet amour qui ne pose jamais de conditions, pour les nuits sacrifiées, les prières murmurées et les encouragements qui ont pansé nos doutes. Aucun mot, dans aucune langue, ne pourra jamais porter tout le poids de notre reconnaissance. Nous espérons simplement que ces pages deviennent, à vos yeux, une petite fierté – un écho de tout ce que vous nous avez donné.

À nos frères et sœurs, complices de toujours. Pour votre présence tendre, votre affection sans calcul et ce soutien discret qui, dans les jours difficiles, nous a redonné l'élan de continuer. Vous avez été nos refuges et nos sourires de répit.

À tous les membres de nos familles. Pour votre confiance indéfectible, votre bienveillance et ce tissu de liens qui nous rappelait, à chaque étape, que nous n'étions jamais seuls.

À nos amis et collègues, compagnons de route. Avec vous, nous avons partagé bien plus que des bancs d'amphi. Nous avons tissé des souvenirs magnifiques, traversé des éclats de rire comme des nuits d'incertitude, célébré des victoires et pansé des échecs. Ces moments resteront gravés dans la trame de nos vies.

À toute la promotion de deuxième année Master. Merci pour cette aventure humaine et intellectuelle que nous avons eu la chance de vivre ensemble. Chaque visage, chaque voix, chaque geste a enrichi notre parcours.

À toutes les âmes bienveillantes. À ceux qui, de près ou de loin, ont offert un mot, une main, une présence – vous avez semé dans l'ombre et vos graines ont fleuri jusqu'ici.

C'est avec une gratitude infinie, un respect profond et une affection sincère

*que nous vous dédions ce mémoire,
fruit de cinq cœurs qui battent aujourd'hui à l'unisson.*

Remerciements

À Celui qui trace les chemins quand la nuit semble éternelle...

Avant toute chose, nous élevons nos plus humbles et sincères louanges vers **Allah**, le Très-Haut, le Tout-Miséricordieux. C'est Lui qui a insufflé en nous la santé, la patience face aux épreuves, la force de recommencer après chaque doute et la volonté tranquille de mener à terme ce modeste travail. Sans Sa lumière, rien n'aurait été possible.

Du fond du cœur, nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreur, **Monsieur Massinissa Belazzoug**. Par son encadrement d'une rare qualité, sa présence discrète mais constante, et son souci du détail jamais pris en défaut, il a guidé nos pas tout au long de cette aventure. Ses conseils précieux, ses orientations toujours justes et ses remarques constructives ont façonné bien plus qu'un projet : ils nous ont appris à voir plus loin. Merci pour sa patience infinie, son soutien sans faille et cet engagement qui, dans les moments d'incertitude, devenait une véritable bouffée de motivation.

Nous adressons également nos remerciements les plus sincères à l'ensemble des enseignants et au personnel administratif de l'**Institut d'Électronique et des Télécommunications**. Chaque cours, chaque mot d'encouragement, chaque geste d'entraide a tissé la trame de notre parcours universitaire. Vous avez fait bien plus que transmettre des connaissances : vous avez allumé en nous la flamme du savoir et la joie d'apprendre.

Aux membres du jury, nous disons toute notre reconnaissance pour avoir accepté d'examiner ce travail avec bienveillance. Le temps que vous consacrez à lire ces pages, à les questionner et à les évaluer est un honneur, et nous mesurons pleinement la valeur de votre regard.

Nos remerciements les plus tendres et les plus vibrants s'envolent vers nos parents et nos familles. Ils sont les piliers silencieux sur lesquels tout repose, ceux qui ont semé l'amour inconditionnel, offert leurs nuits en sacrifice et arrosé nos rêves d'encouragements quotidiens. Ce mémoire porte aussi leurs empreintes.

Enfin, nous n'oublions pas **Monsieur Ksouri Elhachemi**, et tous nos amis, nos chers collègues et toutes ces belles âmes qui, de près ou de loin, ont croisé notre route et partagé un peu de leur lumière. Chaque sourire, chaque main tendue, chaque conversation volée à la fatigue a nourri ce projet et l'a rendu plus humain.

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système intelligent de détection des fuites de gaz domestiques, dénommé GAS GUARD HOME (Gas Guard Home). Basé sur une architecture distribuée IoT utilisant des microcontrôleurs ESP32-S3 et ESP32-C3 Super Mini, le système intègre des capteurs MQ-4 (méthane) et MQ-7 (monoxyde de carbone), une communication Radio-Fréquence 433 MHz entre nœuds secondaires et nœud central, ainsi qu'un mécanisme d'alerte instantanée via un *Bot* Telegram. En cas de détection d'une concentration anormale, le système active automatiquement une alarme sonore et une électrovanne d'arrêt de gaz, assurant ainsi une protection efficace des occupants.

Mots-clés : détection de gaz, IoT, ESP32, MQ-4, MQ-7, sécurité domestique, Telegram, RF 433 MHz, électrovanne.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of an intelligent domestic gas leak detection system named GAS GUARD HOME (Gas Guard Home). Based on a distributed IoT architecture using ESP32-S3 and ESP32-C3 Super Mini microcontrollers, the system integrates MQ-4 (methane) and MQ-7 (carbon monoxide) gas sensors, a 433 MHz RF communication link between secondary and central nodes, and an instant alert mechanism via a Telegram bot. When an abnormal gas concentration is detected, the system automatically activates an audible alarm and a solenoid valve to shut off the gas supply, thereby providing effective protection for occupants.

Keywords : gas detection, IoT, ESP32, MQ-4, MQ-7, home safety, Telegram, RF 433 MHz, solenoid valve.

ملخص

تقدم هذه المذكرة تصميم وإنجاز نظام ذكي للكشف عن تسربات الغاز المنزلي، يحمل اسم Gas Guard Home . يعتمد النظام على بنية موزعة لإنترنت الأشياء (IoT) باستخدام متحكمات ESP32-S3 و ESP32-C3 Super Mini ، ويستعمل مستشعر MQ-4 للكشف عن غاز الميثان ومستشعر MQ-7 للكشف عن غاز أول أكسيد الكربون. كما يعتمد على الاتصال اللاسلكي بتقنية الترددات الراديوية 433 MHz بين العقد الثانوية والعقدة المركزية، مع إرسال تنبيهات فورية عبر بوت Telegram . وعند اكتشاف تركيز غير طبيعي للغاز، يقوم النظام تلقائياً بتفعيل إنذار صوتي وإغلاق صمام الغاز الكهربائي (الإلكتروفان)، مما يساهم في حماية السكان والحد من مخاطر الحوادث الناتجة عن تسربات الغاز.

الكلمات المفتاحية : الكلمات المفتاحية : كشف الغازات، إنترنت الأشياء، ESP32 ، MQ-

4 ، MQ-7 ، السلامة المنزلية، Telegram ، الترددات الراديوية 433 MHz ، الصمام الكهربائي (الإلكتروفان).

Table des matières

Dédicaces	1
Remerciements	3
Résumé	4
Abstract	5
ملخص	6
Liste des Abréviations et Acronymes	12
Introduction Générale	13
1 État de l'Art et Positionnement Startup	15
1.1 Introduction	15
1.2 Problématique	15
1.2.1 Limites des détecteurs classiques	16
1.3 État de l'Art	16
1.3.1 Systèmes de détection du monoxyde de carbone (CO uniquement)	17
1.3.2 Systèmes de sécurité domestique à alimentation électrique dédiée	19
1.3.3 Systèmes de détection d'incendie et de fumée : des solutions coûteuses et réactives	21
1.3.4 Tableau comparatif synthétique des travaux de la littérature . .	24
1.3.5 Notre approche : le système GAS GUARD HOME	24
1.3.6 Modèle économique	26
1.4 Conclusion	26
2 Conception du Système Proposé	28
2.1 Introduction	28
2.2 Présentation générale du système	28
2.3 Architecture générale du système	28
2.3.1 Architecture générale	28
2.3.2 Architecture matérielle	29
2.4 Diagramme des cas d'utilisation (UML)	29
2.5 Spécifications du système	30

2.5.1	Exigences fonctionnelles	30
2.5.2	Exigences non fonctionnelles	30
2.6	Choix des composants matériels	31
2.6.1	Capteurs de gaz	31
2.6.2	Cartes de traitement	32
2.6.3	Module radio-fréquence 433 MHz	33
2.6.4	Les actionneurs	33
2.6.5	Alimentation HLK-PM01	34
2.7	Fonctionnement général du système	34
2.7.1	Phase 1 : Surveillance permanente par les capteurs	34
2.7.2	Phase 2 : Détection locale et génération de l'alerte RF	34
2.7.3	Phase 3 : Validation et déclenchement au nœud central	35
2.7.4	Phase 4 : Retour à la surveillance continue	36
2.8	Architecture logicielle	37
2.8.1	Environnement de développement	37
2.8.2	Protocoles de communication	37
2.9	Conclusion	38
3	Réalisation Pratique, Tests et Résultats	39
3.1	Introduction	39
3.2	Environnement de développement	39
3.2.1	Bibliothèques utilisées	39
3.2.2	Outils de test et de mesure	40
3.3	Réalisation matérielle	41
3.3.1	Schéma électronique du nœud secondaire	41
3.3.2	Schéma électronique du nœud central	42
3.3.3	Montage et réalisation du prototype	42
3.3.4	Évolution du système d'alimentation	44
3.4	Réalisation logicielle	45
3.4.1	Description fonctionnelle du firmware du nœud secondaire	45
3.4.2	Description fonctionnelle du firmware du nœud central	46
3.4.3	Configuration du Bot Telegram	46
3.4.4	Organigramme détaillé du système	46
3.5	Calibration des capteurs	48
3.5.1	Procédure de calibration en air propre	48
3.5.2	Détermination des seuils d'alarme	48
3.6	Tests et validation	49
3.6.1	Tests unitaires des capteurs	49
3.6.2	Tests de communication RF	50

3.6.3	Test de notification Telegram	51
3.6.4	Test d'activation de l'électrovanne	54
3.6.5	Test de fausse alarme	55
3.6.6	Test d'endurance (fonctionnement continu)	55
3.7	Analyse des résultats	56
3.7.1	Tableau récapitulatif des performances mesurées	56
3.7.2	Discussion et comparaison aux spécifications	57
3.7.3	Limitations observées	57
3.8	Améliorations envisagées	57
3.9	Conclusion	58
Conclusion Générale		59
Annexes		62
A Caractéristiques techniques des composants principaux		63
A.1	Fiche technique capteur MQ-4	63
A.2	Fiche technique capteur MQ-7	64
A.3	Fiche technique module HLK-PM01	64
B Schémas de connexion détaillés		65
B.1	Brochage ESP32-C3 Super Mini – Nœud secondaire	65
C Guide d'utilisation du système Gas Guard Home		66
C.1	Procédure de démarrage	66
C.2	Interprétation des alertes Telegram	67
C.3	Procédure de réinitialisation	67

Table des figures

2.1	Architecture générale du système GAS GUARD HOME	29
2.2	Diagramme des cas d'utilisation (UML) du système GAS GUARD HOME	30
2.3	Les capteurs utilisés dans le système GGH	31
2.4	Emplacement recommandé des capteurs MQ-4 et MQ-7 dans une habitation.	32
2.5	Organigramme du fonctionnement général du système GAS GUARD HOME	37
2.6	Architecture des protocoles de communication utilisés dans le système GGH	38
3.1	Contrôle des connexions électriques du système à l'aide d'un multimètre numérique	41
3.2	Schéma électronique du nœud secondaire	41
3.3	Schéma électronique du nœud central	42
3.4	Prototypes réalisés des nœuds du système GAS GUARD HOME	43
3.5	Prototype final du système GAS GUARD HOME	43
3.6	Organigramme général du système GAS GUARD HOME	47
3.7	Exemple de test du capteur MQ-4 à l'aide d'une source de gaz butane .	49
3.8	Messages de démarrage du système, connexion des capteurs et retour à l'état normal via Telegram	51
3.9	Notifications d'alerte de niveau 1 pour le gaz et le monoxyde de carbone	52
3.10	Notifications d'alerte critique (niveau 2) et fermeture automatique de l'électrovanne	53
3.11	Notifications de déconnexion et de reconnexion des capteurs	54

Liste des tableaux

1.1	Comparaison synthétique des systèmes existants avec le système GAS GUARD HOME	24
2.1	Comparaison technique : ESP32-S3 vs ESP32-C3 Super Mini	33
2.2	Architecture des protocoles de communication du système GAS GUARD HOME	38
3.1	Bibliothèques Arduino utilisées dans le projet GAS GUARD HOME	40
3.2	Comparaison des deux solutions d'alimentation testées	45
3.3	Seuils d'alarme implémentés pour les capteurs MQ-4 et MQ-7	48
3.4	Résultats du test du capteur MQ-4	50
3.5	Résultats du test du capteur MQ-7	50
3.6	Résultats des tests de communication RF	51
3.7	Résultats des essais du système de notification Telegram	54
3.8	Résultat du test d'activation de l'électrovanne	55
3.9	Résultats du test de fausse alarme	55
3.10	Résultats du test d'endurance	56
3.11	Tableau récapitulatif des performances mesurées du système GAS GUARD HOME	56
A.1	Caractéristiques principales du capteur MQ-4	63
A.2	Caractéristiques principales du capteur MQ-7	64
A.3	Caractéristiques principales du module d'alimentation HLK-PM01	64
B.1	Connexions ESP32-C3 Super Mini (nœud secondaire)	65
C.1	Guide d'interprétation des messages d'alerte Telegram	67

Liste des Abréviations et Acronymes

AC Courant Alternatif.

API Interface de Programmation Applicative.

CO Monoxyde de Carbone.

DC Courant Continu.

HTTPS Hypertext Transfer Protocol Secure.

IoT Internet des Objets.

MQTT Message Queuing Telemetry Transport.

ppm Parties Par Million.

RF Radio-Fréquence.

SPI Serial Peripheral Interface.

UML Unified Modeling Language.

Introduction Générale

La sécurité domestique constitue aujourd'hui un enjeu majeur en raison de l'évolution des modes de vie et de l'utilisation croissante des sources d'énergie dans les habitations, notamment le gaz naturel, principalement composé de méthane. Bien que cette source énergétique présente de nombreux avantages dans l'usage quotidien, elle peut représenter un danger important en cas de fuite non détectée.

Les fuites de gaz figurent parmi les incidents domestiques les plus dangereux, pouvant provoquer des accidents graves tels que l'asphyxie, les incendies ou encore les explosions. Ces risques deviennent plus critiques lorsque la fuite se produit en l'absence des occupants ou durant leur sommeil, limitant ainsi les possibilités d'intervention rapide et augmentant les dommages potentiels.

En Algérie, les services de la Protection Civile enregistrent chaque année plusieurs centaines d'accidents domestiques liés aux fuites de gaz butane et naturel, notamment en période hivernale. À l'échelle mondiale, selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le monoxyde de carbone cause plus de **100 000 décès annuels**, la majorité survenant dans les habitations. Ces chiffres justifient pleinement le développement de systèmes de détection proactifs et automatisés.

Avec le développement des technologies embarquées et des systèmes intelligents, il est désormais possible de concevoir des solutions capables d'assurer une surveillance continue de l'environnement domestique. Ces systèmes permettent de détecter rapidement toute anomalie, de réduire les risques et d'améliorer considérablement la sécurité des utilisateurs.

Ce projet a pour objectif de concevoir et de réaliser un système intelligent de détection des fuites de gaz destiné aux habitations. Le système proposé permet de surveiller en permanence la concentration de gaz dans l'air à l'aide de capteurs appropriés. En fonction de seuils prédéfinis et soigneusement étudiés, le système peut soit émettre une alerte sonore afin d'avertir les occupants, soit interrompre automatiquement l'alimentation en gaz pour prévenir tout risque d'accident. Par ailleurs, une notification est envoyée via l'application Telegram afin d'informer l'utilisateur en temps réel de l'état du système et des mesures prises.

Pour atteindre ces objectifs, une méthodologie basée sur l'étude théorique du problème, le choix des composants électroniques adaptés, la conception de l'architecture du système, ainsi que la réalisation pratique et les tests expérimentaux a été adoptée.

Afin de présenter les différentes étapes de ce travail, ce mémoire est organisé en **trois chapitres principaux**. Le premier chapitre présente le cadre général du projet ainsi

que les notions théoriques liées à la détection des fuites de gaz. Le deuxième chapitre est consacré à la conception et à l'architecture du système proposé. Enfin, le troisième chapitre décrit la réalisation pratique du système, les tests effectués ainsi que l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1

État de l'Art et Positionnement Startup

1.1 Introduction

Avec l'évolution rapide des technologies numériques et l'augmentation de l'utilisation du gaz dans les habitations, la sécurité domestique est devenue un enjeu majeur. Le gaz naturel et le gaz méthane sont largement utilisés dans les foyers pour la cuisson et le chauffage grâce à leur efficacité énergétique et leur coût relativement faible. Cependant, ces sources d'énergie peuvent représenter un danger important en cas de fuite.

Les gaz inflammables et toxiques tels que le méthane et le monoxyde de carbone (CO) peuvent provoquer des accidents graves comme les incendies, les explosions ou les intoxications. Dans plusieurs situations, les fuites ne sont détectées qu'après l'apparition de conséquences dangereuses, notamment durant le sommeil ou en l'absence des occupants.

Les systèmes classiques de détection restent généralement limités à une simple alarme sonore locale sans surveillance intelligente ni intervention automatique. Face à ces limitations, les technologies de l'[Internet des Objets \(IoT\)](#) permettent aujourd'hui de développer des solutions intelligentes capables d'assurer une surveillance continue, une détection précoce et une réaction rapide en temps réel [1].

Dans ce contexte, ce projet propose la conception d'un système intelligent de détection de gaz basé sur un microcontrôleur puissant (32-bits) et des capteurs de gaz (Méthane et CO), nommé **Gas Guard Home**, visant à assurer une détection précoce des fuites de gaz et à améliorer la sécurité domestique grâce aux technologies IoT.

1.2 Problématique

L'utilisation quotidienne du gaz dans les habitations expose les utilisateurs à plusieurs risques liés aux fuites accidentelles. Malgré l'existence de détecteurs classiques, plusieurs limitations importantes persistent.

1.2.1 Limites des détecteurs classiques

Systèmes isolés

La majorité des détecteurs actuels ne permettent pas une communication entre plusieurs dispositifs ni une surveillance distribuée dans différentes zones du domicile.

Détection tardive

Les détecteurs classiques réagissent souvent uniquement lorsque la concentration de gaz est déjà dangereuse, ce qui réduit considérablement le temps disponible pour intervenir.

Absence d'intelligence

La plupart des systèmes existants ne disposent pas d'analyse des données, d'historique des mesures, d'automatisation intelligente ni de communication en temps réel.

Absence d'intervention automatique

Même après la détection d'une fuite, l'utilisateur doit généralement intervenir manuellement pour couper le gaz ou contacter les secours.

Question de recherche

“ Comment concevoir un système intelligent capable de détecter précocement les gaz dangereux dans un environnement domestique tout en assurant une intervention automatique et une surveillance en temps réel ? ”

1.3 État de l'Art

La sécurité des habitations face aux risques gazeux constitue un axe de recherche actif depuis plusieurs décennies, dont l'intensité s'est considérablement accrue avec l'avènement des technologies de l'IoT et des systèmes embarqués connectés. Les travaux publiés dans les revues et conférences de référence (IEEE, Wiley, Elsevier, Springer, MDPI) révèlent trois grandes catégories de solutions, chacune apportant une réponse partielle au problème de la sécurité gazeuse domestique. L'analyse critique de ces catégories permet d'identifier avec précision le vide technologique que vient combler le système GAS GUARD HOME proposé dans ce travail.

1.3.1 Systèmes de détection du monoxyde de carbone (CO uniquement)

Le monoxyde de carbone (CO) est universellement reconnu comme l'une des principales causes de décès par intoxication à l'intérieur des bâtiments. Inodore, incolore et non irritant, il est souvent appelé le “*tueur silencieux*” car les victimes perdent conscience avant de réaliser le danger. L'Organisation Mondiale de la Santé estime que l'exposition chronique et aiguë au CO cause plus de **100 000 décès par an** dans le monde, la majorité survenant dans des espaces domestiques mal ventilés ou équipés d'appareils à combustion défectueux [2]. Cette réalité a généré un corpus scientifique conséquent autour de la détection spécialisée du CO.

Détecteurs de CO autonomes à base de capteurs électrochimiques

La technologie électrochimique constitue aujourd'hui l'approche de référence pour la détection du CO dans les applications résidentielles. Le principe repose sur une cellule composée de deux électrodes baignées dans un électrolyte liquide ou gel : le CO se fait oxyder à l'anode de travail, générant un courant électrique rigoureusement proportionnel à la concentration du gaz. Ce mécanisme confère à ces capteurs une excellente sélectivité, une grande linéarité de réponse et une bonne stabilité à long terme.

Parmi les travaux fondateurs de cette catégorie, Brudzewski *et al.* [3] ont proposé dans l'*IEEE Sensors Journal* un système de détection du CO basé sur un réseau de capteurs électrochimiques couplé à un algorithme de traitement du signal, visant à réduire la sensibilité croisée avec l'hydrogène et d'autres interférants. Leur prototype atteint une limite de détection de 5 ppm de CO avec un taux de fausses alarmes très faible. Néanmoins, leur système reste purement local : aucune transmission de données à distance ni intervention automatique n'est prévue en cas de dépassement du seuil. La notification de l'utilisateur dépend entièrement d'une alarme sonore locale, ce qui le rend inefficace lors d'une intoxication progressive conduisant à la perte de conscience.

Dans la même veine, Samuel *et al.* [4] ont développé un détecteur de CO domestique à très faible consommation, publié dans les actes de la conférence *IEEE SENSORS 2019*, qui utilise un capteur électrochimique et un microcontrôleur MSP430 opérant en mode d'interruption sur seuil. Le système assure une autonomie de plusieurs années sur deux piles AA grâce à des cycles de mesure espacés de 30 à 60 secondes. Si cette stratégie résout le problème d'autonomie, elle crée un angle mort de détection pouvant atteindre une minute, ce qui est incompatible avec la nature brusque de certains incidents gazeux domestiques.

Systèmes de détection CO avec connectivité IoT

L'émergence des microcontrôleurs Wi-Fi intégrés (famille ESP8266 et ESP32) a rendu possible une nouvelle génération de détecteurs de CO connectés à coût réduit. Harinee et Thilagam [5], dans une étude présentée lors de la conférence *IEEE International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICIICT) 2019*, ont conçu un système de surveillance du CO basé sur l'ESP8266 couplé à un capteur MQ-7. Les valeurs de concentration sont transmises toutes les 30 secondes à la plateforme cloud *ThingSpeak* ; une alerte est générée par e-mail dès que la concentration dépasse un seuil configurable. Leur système présente l'avantage d'une visualisation historique des données en ligne, mais il demeure mono-nœud et mono-gaz. En outre, aucune intervention physique automatique n'est prévue : l'utilisateur qui reçoit l'e-mail doit lui-même couper l'alimentation en gaz, ce qui peut s'avérer impossible en cas d'intoxication.

Une contribution plus élaborée est celle de Ammar *et al.* [6], publiée dans *Wireless Personal Communications* (Springer/Wiley), qui décrit un réseau de capteurs CO basé sur le protocole MQTT et une architecture publish/subscribe sur un broker Mosquitto. Chaque nœud capteur est basé sur un Raspberry Pi Zero W et un capteur électrochimique SPEC Sensors. Si cette architecture offre une meilleure scalabilité que les solutions mono-nœud, son coût unitaire (~ 40–60 USD par nœud, sans compter l'infrastructure serveur) la rend prohibitive pour un déploiement résidentiel généralisé. De plus, elle ne gère que le CO et ne dispose d'aucun mécanisme de coupure automatique du gaz.

Citons également les travaux de Sung-Jun Park *et al.* [7], publiés dans l'*IEEE Internet of Things Journal*, qui proposent un système de détection CO intégrant un algorithme de compensation de température et d'humidité pour améliorer la précision du capteur électrochimique dans des conditions ambiantes variables. Leur contribution est purement algorithmique ; l'architecture système reste mono-zone et sans action automatique.

Synthèse critique – Systèmes CO uniquement

L'analyse des travaux consacrés à la détection exclusive du CO révèle trois lacunes systémiques :

1. **Détection mono-gaz** : le CO représente un danger majeur, mais il n'est qu'un des deux types de gaz dangereux présents dans les habitations. L'absence de détection simultanée des gaz combustibles (méthane, butane) laisse les occupants exposés à un risque d'explosion non couvert.
2. **Absence d'intervention automatique** : qu'il s'agisse d'un système local ou connecté, aucun des travaux recensés n'intègre de mécanisme de coupure

automatique de l'alimentation en gaz. La réaction reste dépendante de l'utilisateur, qui peut être hors de portée ou déjà intoxiqué.

3. **Architecture mono-zone** : les solutions IoT recensées sont mono-nœud, incapables d'assurer une couverture multi-pièces d'une habitation sans multiplication coûteuse des systèmes.

1.3.2 Systèmes de sécurité domestique à alimentation électrique dédiée

La problématique de l'alimentation électrique des systèmes de sécurité domestique est une contrainte d'ingénierie fondamentale qui conditionne directement la fiabilité et la continuité de service. Les solutions de détection gazeuse nécessitent généralement une alimentation continue en raison du filament chauffant (heater) intégré aux capteurs de type MQ, qui consomme de l'énergie en permanence pour maintenir l'oxyde métallique sensible à sa température de fonctionnement optimale (environ 300 °C). Cette contrainte a fait l'objet de nombreux travaux spécifiques dans la littérature.

Limitation des systèmes alimentés par piles ou batteries

La majorité des systèmes de détection domestiques de bas de gamme sont commercialisés avec une alimentation par piles alcalines ou batteries lithium-ion. Cette solution, si elle offre une flexibilité d'installation remarquable (absence de câblage secteur), se heurte à des contraintes fondamentales dans le cas des systèmes IoT intégrant des capteurs chauffants.

Mainetti *et al.* [8], dans une étude publiée dans l'*International Journal of Distributed Sensor Networks* (SAGE/Wiley), ont réalisé une analyse énergétique détaillée de différents nœuds de capteurs IoT destinés à la surveillance environnementale intérieure. Leurs mesures montrent qu'un nœud intégrant un capteur de type MQ (consommation du heater : 250–900 mW selon le modèle), un microcontrôleur ESP32 (consommation moyenne en fonctionnement actif : 60–100 mA à 3.3 V) et un module de communication RF (10–40 mA) totalise une consommation moyenne de **350 à 450 mA** sous 5 V en régime de surveillance continue. Avec une batterie Li-Ion 18650 standard (capacité : 3 000–3 400 mAh), l'autonomie résultante est de **6 à 10 heures seulement**, ce qui est totalement incompatible avec une application de sécurité devant fonctionner 24h/24 et 7j/7 sans intervention humaine.

Rault *et al.* [9], dans un article de synthèse publié dans l'*IEEE Communications Surveys & Tutorials*, ont confirmé ce constat en analysant les stratégies de gestion d'énergie pour les réseaux de capteurs sans fil. Ils soulignent que les capteurs à oxyde métallique (classe incluant les MQ) sont particulièrement coûteux énergétiquement

et ne peuvent bénéficier des stratégies de *duty cycling* classiques (réduction de la fréquence d'acquisition) sans dégrader significativement leurs performances de détection, le filament chauffant devant rester actif en permanence pour maintenir la sensibilité du matériau.

Des approches hybrides alimentant le heater par le secteur et le microcontrôleur par batterie ont été proposées [10] mais introduisent une complexité supplémentaire sans résoudre la question de la fiabilité globale du système.

Systèmes à alimentation solaire : une solution inadaptée aux espaces intérieurs

L'alimentation photovoltaïque a été explorée comme alternative à l'alimentation secteur pour les systèmes de détection en zones isolées. Mainetti *et al.* [8] et Piyare *et al.* [11] montrent que cette approche, si elle résout le problème d'autonomie en extérieur ou dans des pièces fortement ensoleillées, est **mal adaptée à la majorité des espaces intérieurs domestiques** (cuisine, couloir, chambre) où l'irradiance lumineuse disponible est insuffisante pour assurer une charge continue du système de stockage. De plus, la puissance photovoltaïque disponible est fortement variable selon les saisons et les conditions météorologiques, ce qui engendre des risques de défaillance système lors des périodes hivernales, précisément lorsque la ventilation réduite augmente le risque de concentration gazeuse.

Impact de la stabilité de tension sur la précision des capteurs MQ

Au-delà de la seule autonomie, la qualité de la source d'alimentation a un impact direct et mesurable sur la précision des capteurs à oxyde métallique. Figaro Engineering [12], fabricant pionnier des capteurs TGS (famille équivalente aux MQ), a démontré dans ses notes d'application officielles que la résistance de sortie R_S du capteur varie non linéairement avec la tension d'alimentation du filament chauffant. Une variation de $\pm 10\%$ de la tension d'alimentation par rapport à la valeur nominale entraîne une déviation de la résistance de référence R_0 pouvant atteindre **15 à 25%**, soit une erreur comparable sur la concentration estimée en ppm. Ce phénomène est particulièrement problématique pour les systèmes alimentés par batteries, dont la tension diminue de 4.2 V à 2.7 V au cours de leur décharge, créant une dérive progressive et systématique des mesures et pouvant générer des **fausses alarmes croissantes** au fur et à mesure de la décharge.

Cette observation est corroborée par Hašan *et al.* [13], dans un article publié dans *Sensors and Actuators B : Chemical* (Elsevier), qui ont réalisé une caractérisation systématique de l'influence de la tension d'alimentation sur les capteurs MQ-4, MQ-7 et MQ-135. Leurs résultats confirment qu'une alimentation régulée et stable constitue une

condition nécessaire à l'obtention de mesures fiables, indépendamment de l'algorithme de traitement utilisé.

Synthèse critique – Alimentation et fiabilité

L'analyse des travaux sur l'alimentation des systèmes de détection gazeuse établit quatre éléments clés :

1. Les capteurs MQ (heater actif) **consomment 350–450 mA** en fonctionnement continu, rendant l'autonomie sur batteries inférieure à 10 heures.
2. L'alimentation solaire est **inadéquate en intérieur** et structurellement non fiable pour une application de sécurité.
3. Une **instabilité de tension de $\pm 10\%$** engendre une erreur de mesure de 15 à 25% sur les capteurs MQ, source de fausses alarmes.
4. L'alimentation secteur via un module AC-DC compact et régulé (type HLK-PM01, sortie $5\text{ V} \pm 2\%$) est la **seule solution** garantissant simultanément la continuité de service et la précision de mesure requises.

Ces conclusions scientifiques ont directement guidé notre décision d'adopter le module HLK-PM01 comme solution d'alimentation définitive en Phase 2 du projet.

1.3.3 Systèmes de détection d'incendie et de fumée : des solutions coûteuses et réactives

La détection des incendies et de la fumée constitue le domaine de sécurité domestique le plus anciennement règlementé et le mieux couvert par la littérature scientifique. Ces systèmes sont généralement plus élaborés et bénéficient de normes strictes (EN 54, UL 217, UL 268), mais leur objectif est fondamentalement différent de celui de la détection préventive des fuites de gaz : ils interviennent **après** le début d'une combustion, et non **avant** l'ignition.

Détecteurs de fumée optiques et ioniques

Les détecteurs de fumée optiques (photoionisation) et ioniques (chambres d'ionisation) sont les catégories les plus représentées dans le domaine résidentiel.

Gottuk *et al.* [14], dans une étude clé publiée dans le *Fire Safety Journal* (Elsevier), ont comparé les performances de ces deux technologies face à sept scénarios d'incendie représentatifs (feu couvant, combustion vive, feu de literie, etc.). Leurs résultats montrent que les détecteurs optiques offrent une détection plus précoce pour les feux lents à fumée dense, tandis que les capteurs à ionisation réagissent plus rapidement aux feux vifs.

Aucun des deux types ne présente de performance universellement supérieure, ce qui a conduit à la généralisation des détecteurs multi-critères. Cruciale pour notre propos, cette étude souligne qu'**aucun de ces dispositifs ne détecte les gaz combustibles ou le CO avant l'ignition** : ils ne constituent donc pas une protection préventive contre les fuites de gaz.

Renni *et al.* [15] ont analysé, dans le *Journal of Fire Sciences* (SAGE), les délais de détection et les taux de fausses alarmes de vingt-deux modèles de détecteurs de fumée résidentiels dans des conditions réelles (cuisson, vapeur, poussière). Leurs résultats révèlent des taux de fausses alarmes pouvant atteindre 40% dans les cuisines, illustrant la difficulté de discriminer un incendie réel des émissions normales d'une habitation.

Systèmes multi-capteurs intelligents connectés

La tendance vers l'intégration de plusieurs technologies au sein d'un même dispositif connecté est représentée par des solutions commerciales haut de gamme (Google Nest Protect, Kidde FireX) et par de nombreux travaux académiques.

Risteiu *et al.* [16], dans un article publié dans la revue *Sensors* (MDPI), ont présenté un système multi-capteurs intégrant un détecteur optique de fumée, un capteur de CO électrochimique et un capteur de température, communiquant sur un réseau ZigBee et notifiant l'utilisateur via une passerelle Wi-Fi. Leur système couvre plusieurs pièces et transmet des alertes codées en JSON vers un serveur MQTT. Cependant, malgré sa sophistication, ce système **ne détecte pas les gaz combustibles (méthane, propane, butane)** et **ne possède aucun mécanisme de coupure automatique** de l'alimentation en gaz. Il notifie, mais n'intervient pas.

Pan *et al.* [17], dans un article de l'*IEEE Transactions on Industrial Informatics*, ont proposé un système de détection d'incendie embarqué utilisant une fusion de capteurs (fumée, CO, température, CO₂) couplée à un algorithme de décision basé sur la logique floue. Ce système améliore considérablement la discrimination entre vraies alarmes et fausses alarmes, mais son coût de déploiement reste élevé (microcontrôleur Cortex-M4, quatre capteurs distincts, infrastructure serveur). Aucune électrovanne ni mécanisme d'intervention physique automatique n'est mentionné.

Systèmes de détection d'incendie par vision artificielle

L'intelligence artificielle appliquée à la vidéo-surveillance a produit une sous-catégorie de systèmes de détection d'incendie par traitement d'images. Chino *et al.* [18], dans les actes de la conférence *IEEE SIBGRAPI*, ont présenté **BoWFire**, un classificateur d'images basé sur des descripteurs de couleur et de texture capables de distinguer les pixels de feu des pixels similaires (couchers de soleil, éclairages oranges). Ces travaux, représentatifs d'une littérature plus large sur la détection vidéo d'incendies, partagent la

même limitation fondamentale : ils ne détectent que le feu **déjà visible**, ne constituent aucune protection préventive contre les fuites de gaz, et nécessitent une infrastructure caméra et une puissance de calcul (GPU ou NPU) incompatibles avec un déploiement domestique abordable.

Analyse coût-performance et accessibilité

La barrière économique constitue l'obstacle le plus significatif à l'adoption généralisée des systèmes de détection multi-capteurs intelligents dans les pays à revenus intermédiaires. Brushlinsky *et al.* [19], dans un rapport publié par la *Geneva Association* repris dans *Fire Technology* (Springer), ont analysé les coûts d'installation et de maintenance de systèmes de détection certifiés EN 54 dans des bâtiments résidentiels européens. Leurs données indiquent un coût d'installation de **800 à 2 500 EUR par logement** pour une couverture complète multi-zones, auquel s'ajoutent des coûts de maintenance annuels de 150 à 400 EUR. Ces chiffres sont structurellement incompatibles avec le pouvoir d'achat des ménages algériens ou des pays à revenus similaires, où le salaire minimum national garanti (SNMG) était de 20 000 DZD (~ 135 EUR) en 2023.

Synthèse critique – Systèmes incendie et fumée

L'analyse de la littérature sur les systèmes de détection d'incendie et de fumée met en évidence trois obstacles structurels à leur adoption comme solution de sécurité gazeuse domestique :

1. **Nature réactive, non préventive** : tous les systèmes recensés détectent la *conséquence* (fumée, chaleur, feu visible) plutôt que la *cause* (fuite de gaz avant ignition). Ils n'empêchent pas l'explosion ou l'incendie ; ils le détectent après déclenchement.
2. **Absence de coupure automatique du gaz** : aucun des systèmes commerciaux ou académiques recensés (Nest Protect, Kidde, ZigBee multi-capteurs) ne dispose d'un mécanisme de coupure automatique de l'alimentation en gaz. L'intervention physique reste à la charge de l'utilisateur.
3. **Coût prohibitif** : les solutions certifiées et multi-capteurs coûtent de 800 à 2 500 EUR par logement [19], les rendant inaccessibles pour le marché domestique des pays en développement.

1.3.4 Tableau comparatif synthétique des travaux de la littérature

TABLE 1.1 – Comparaison synthétique des systèmes existants avec le système GAS GUARD HOME

Système	Multi-gaz	Notif. dist.	Coupure auto.	Multi-zones	Alim. stable	Coût
Délect. CO élec-trocim. [3]	✗	✗	✗	✗	Pile	Faible
CO + IoT (ESP8266) [5]	✗	✓	✗	✗	Pile	Faible
CO + MQTT (RPi) [6]	✗	✓	✗	✗	Secteur	Moyen
Syst. solaire (PIC) [8]	✓	✗	✗	✗	Variable	Moyen
Fum. + CO + T° (ZigBee) [16]	Partiel	✓	✗	✓	Secteur	Élevé
Fus. capteurs (Logique floue) [17]	Partiel	✓	✗	✓	Secteur	Élevé
Syst. certifié EN 54 [19]	✓	✓	✗	✓	Secteur	Très élevé
Gas Guard Home (ce travail)	✓	✓	✓	✓*	Secteur	Faible

*Multi-zones : validé sur un même niveau d'habitation ; voir section 3.6.2 pour la limitation de portée observée entre étages.

1.3.5 Notre approche : le système Gas Guard Home

Vide technologique identifié

L'analyse critique des trois catégories de systèmes présentées ci-dessus fait émerger un **vide technologique clair et non comblé** dans la littérature : aucun des travaux recensés ne réunit simultanément les six critères nécessaires à une protection domestique

complète, accessible et autonome contre les risques gazeux. En particulier, la combinaison (1) *détection multi-gaz simultanée ($CH_4 + CO$)* + (2) *architecture distribuée multi-zones* + (3) *intervention physique automatique (coupure gaz)* + (4) *notification temps réel à distance* + (5) *alimentation secteur stable* + (6) *coût accessible aux marchés à revenus intermédiaires* n'a **pas été atteinte** par les travaux antérieurs.

C'est précisément dans cette lacune que s'inscrit le système GAS GUARD HOME que nous proposons dans ce travail.

Contributions originales du système Gas Guard Home

Par rapport à l'ensemble des travaux recensés dans la littérature, notre approche se distingue par les six contributions originales suivantes :

1. **Détection multi-gaz simultanée ($CH_4 + CO$)** : contrairement aux systèmes mono-gaz du premier paragraphe de cet état de l'art [3, 5, 6], le système GAS GUARD HOME intègre en parallèle un capteur MQ-4 dédié au méthane et aux gaz combustibles [20] et un capteur MQ-7 dédié au CO [21], couvrant simultanément les deux risques gazeux les plus fréquents dans les habitations utilisant le gaz naturel ou butane.
2. **Architecture distribuée multi-zones à communication RF** : contrairement aux systèmes mono-nœud dominants dans la littérature [5, 8], le système GAS GUARD HOME repose sur une architecture à trois nœuds – un nœud central (ESP32-S3) et deux nœuds secondaires autonomes (ESP32-C3 Super Mini) – communiquant par liaison RF 433 MHz. Cette architecture offre une couverture multi-pièces d'une même habitation sans démultiplier les connexions Wi-Fi ni le coût par zone.
3. **Intervention physique automatique par électrovanne** : c'est la contribution la plus différenciante par rapport à l'ensemble de la littérature recensée. Contrairement aux systèmes qui notifient sans intervenir [6, 16, 17], le système GAS GUARD HOME intègre une électrovanne de sécurité commandée automatiquement par relais dès la confirmation d'une concentration critique, coupant l'alimentation en gaz **sans aucune intervention humaine**. Cette approche est fondamentale en cas d'intoxication de l'utilisateur.
4. **Notification bidirectionnelle en temps réel via Telegram Bot API** : la solution de notification retenue – un Bot Telegram communiquant via l'API officielle de Telegram – offre un canal gratuit, chiffré, bidirectionnel et disponible sur toutes les plateformes mobiles. Elle est qualitativement supérieure aux notifications par e-mail [5] (délai variable, non temps réel) et par SMS [10] (coût récurrent). La bidirectionnalité permet de surcroît un contrôle à distance du système (commandes `/status`, `/reset`).

5. **Alimentation secteur stable et justifiée par la littérature (module HLK-PM01)** : tirée des enseignements des travaux de Mainetti [8], Rault [9] et Hašan [13] sur l'impact de la tension d'alimentation sur la précision des capteurs MQ, notre solution adopte une alimentation par le réseau secteur (220 V AC) via le module HLK-PM01 (5 V DC, $\pm 2\%$, 3W). Cette alimentation élimine les dérives de mesure observées lors de notre Phase 1 (alimentation par batteries) et garantit une disponibilité illimitée du système.
6. **Coût accessible aux marchés à revenus intermédiaires** : en s'appuyant sur des composants open-hardware (ESP32) et des protocoles ouverts (Telegram API, RF 433 MHz, Arduino IDE), le système GAS GUARD HOME atteint un niveau de fonctionnalité comparable aux solutions professionnelles certifiées EN 54 [19], à un coût total de prototype significativement inférieur, le rendant accessible au marché résidentiel algérien et des pays à revenus similaires.

Positionnement normatif du système Gas Guard Home

Le système GAS GUARD HOME vise à respecter l'esprit des normes EN 50194 (gaz combustibles) et EN 50291 (CO) [22, 23], ainsi que les exigences de l'arrêté interministériel algérien du 10 novembre 2020 [24], en assurant :

- Surveillance **continue** (absence d'interruption de détection 24h/7j) ;
- Temps de réponse **inférieur à 30 secondes** après dépassement du seuil de détection ;
- Alerte **multi-canal** : alarme sonore locale (buzzer) et notification Telegram à distance ;
- **Coupure automatique** de l'alimentation en gaz via électrovanne commandée par relais.

Une certification formelle selon ces normes constituerait la prochaine étape naturelle pour la commercialisation du produit sur le marché algérien et régional.

1.3.6 Modèle économique

Le modèle économique repose sur la vente du système GAS GUARD HOME sous forme de kit de sécurité domestique intelligent, complété par des services de maintenance, de mises à jour logicielles et de supervision intelligente.

1.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté le contexte général du projet, les risques liés aux fuites de gaz, l'état de l'art des technologies de détection, le cadre normatif applicable et

le positionnement startup du système GAS GUARD HOME. L'analyse des besoins a permis de déterminer les fonctions principales du système : détection précoce, alertes instantanées, surveillance à distance et coupure automatique du gaz. Le chapitre suivant présente la conception et l'architecture détaillée du système proposé.

Chapitre 2

Conception du Système Proposé

2.1 Introduction

Afin d'apporter une solution plus efficace et plus intelligente aux problèmes identifiés, nous proposons le système **Gas Guard Home**, basé sur les technologies embarquées et l'**IoT**. Le système est conçu autour d'une architecture distribuée composée d'une unité centrale principale et de deux unités secondaires intelligentes chargées de surveiller différentes zones de l'habitation.

Les échanges de données entre les différentes unités sont assurés par des modules de communication **Radio-Fréquence (RF)** à 433 MHz, tandis que l'envoi des alertes à distance est réalisé grâce à un *Bot Telegram* connecté via le réseau Wi-Fi [25].

2.2 Présentation générale du système

Le système **GAS GUARD HOME** est une solution intelligente conçue pour réagir rapidement aux fuites de gaz domestiques, depuis leur détection jusqu'à la coupure automatique de l'alimentation. Son architecture repose sur trois unités : un **nœud central** et des **nœuds secondaires** placés dans différentes zones de l'habitation.

Chaque nœud secondaire intègre un capteur spécifique (Methane, CO...etc.) et transmet les données au nœud principal via des modules **RF**. L'unité centrale analyse alors les données reçues et déclenche automatiquement les dispositifs de sécurité [26].

2.3 Architecture générale du système

2.3.1 Architecture générale

L'architecture générale repose sur une structure distribuée intelligente composée de :

- Les **nœuds secondaires** : détection des gaz, analyse locale, transmission RF.
- Le **nœud central** : traitement principal, activation buzzer, commande électro-vanne, envoi notifications Telegram.

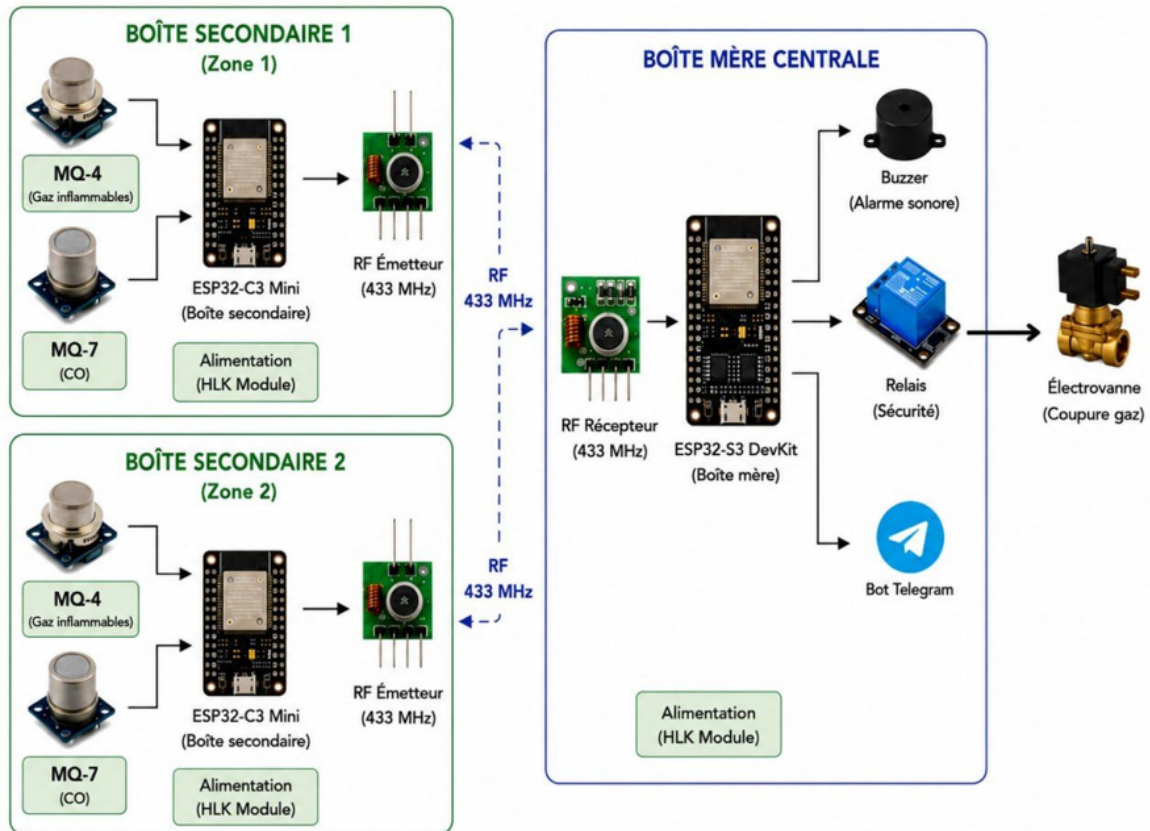


FIGURE 2.1 – Architecture générale du système GAS GUARD HOME

Justification de l'architecture distribuée

Le choix d'une architecture distribuée apporte : résilience (détection autonome en cas de panne du nœud central), latence réduite (edge computing sur ESP32-C3), couverture étendue (plusieurs pièces simultanément) et coût optimisé (ESP32-C3 moins coûteux pour les nœuds secondaires).

2.3.2 Architecture matérielle

Chaque **nœud secondaire** regroupe : ESP32-C3 Super Mini, capteur MQ-4, capteur MQ-7, module RF émetteur, alimentation HLK-PM01.

Le **nœud central** intègre : ESP32-S3, module RF récepteur, buzzer 5V, relais de commande, électrovanne de sécurité, alimentation HLK-PM01.

2.4 Diagramme des cas d'utilisation (UML)

Le diagramme **UML** représente les interactions entre l'utilisateur et le système. Les fonctions automatiques du système incluent : détection des gaz, analyse des données, transmission RF, activation du buzzer, fermeture de l'électrovanne et envoi des

notifications.

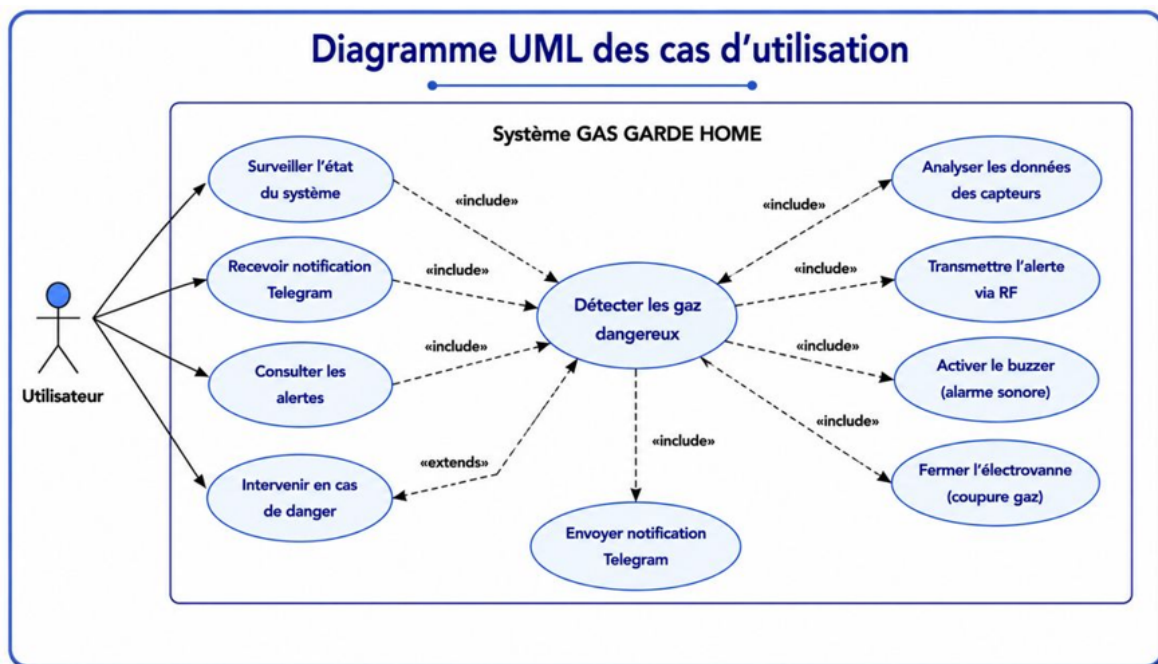


FIGURE 2.2 – Diagramme des cas d'utilisation (UML) du système GAS GUARD HOME

2.5 Spécifications du système

2.5.1 Exigences fonctionnelles

Le système doit : identifier rapidement les gaz nocifs grâce aux capteurs MQ-4 et MQ-7, effectuer une surveillance constante de l'environnement, transmettre les données via RF vers le nœud central, activer automatiquement le buzzer, l'électrovanne et les notifications Telegram [27].

2.5.2 Exigences non fonctionnelles

- **Faible consommation** : ESP32-S3 et ESP32-C3 à haute efficacité.
- **Sécurité** : détection rapide et fermeture automatisée de l'électrovanne.
- **Fiabilité** : fonctionnement constant des capteurs et communications RF.
- **Rapidité** : détection des anomalies via RF et Wi-Fi.
- **Évolutivité** : intégration future de plateformes Cloud ou de capteurs supplémentaires [26].

2.6 Choix des composants matériels

2.6.1 Capteurs de gaz

Capteur MQ-4

Détecte le méthane, le gaz naturel et les gaz inflammables [28]. Choisi pour sa bonne sensibilité aux gaz combustibles domestiques et sa facilité d'intégration.

Capteur MQ-7

Spécialement conçu pour la détection du CO [29]. Sélectionné pour sa capacité à détecter efficacement les concentrations anormales de CO.

Principe de fonctionnement

Les capteurs MQ-4 et MQ-7 sont basés sur l'oxyde d'étain (SnO_2) dont la conductivité varie en présence de certains gaz. La variation de résistance électrique est convertie en un signal analogique exploité par le microcontrôleur.



FIGURE 2.3 – Les capteurs utilisés dans le système GGH

Calibration et conversion ppm

Pour convertir la tension analogique en concentration en ppm :

$$C_{\text{ppm}} = a \cdot \left(\frac{R_S}{R_0} \right)^b \quad (2.1)$$

où R_S est la résistance en présence du gaz, R_0 est la résistance de référence en air propre, et a , b sont des constantes empiriques du fabricant. Une phase de **calibration en air propre** est obligatoire avant la mise en service.

Emplacement optimal des capteurs

- **MQ-4** (méthane, moins dense que l'air) : installer en **hauteur** (près du plafond, à 20–30 cm).

- **MQ-7** (CO, densité proche de l'air) : installer à **hauteur de respiration** ($\approx 1,5$ m du sol).

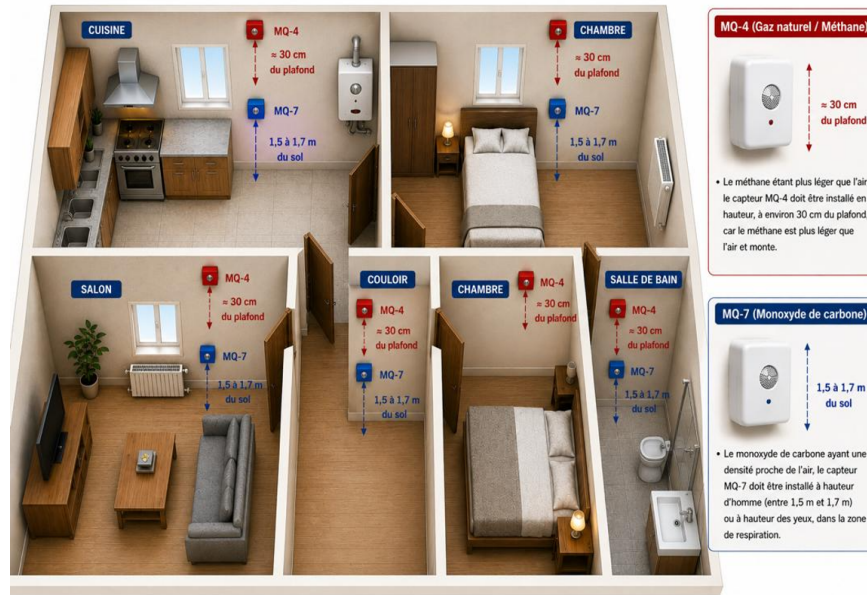


FIGURE 2.4 – Emplacement recommandé des capteurs MQ-4 et MQ-7 dans une habitation.

2.6.2 Cartes de traitement

L'ESP32-S3 (nœud central) intègre une connectivité Wi-Fi et des ressources matérielles adaptées aux applications intelligentes [30].

L'ESP32-C3 Super Mini (nœuds secondaires) est basé sur l'architecture RISC-V, spécialement conçu pour les applications embarquées à faible consommation énergétique [31].

Tableau comparatif ESP32-S3 vs ESP32-C3

TABLE 2.1 – Comparaison technique : ESP32-S3 vs ESP32-C3 Super Mini

Caractéristique	ESP32-S3	ESP32-C3 SM
Architecture CPU	Xtensa LX7 dual-core	RISC-V single-core
Fréquence max.	240 MHz	160 MHz
RAM	512 Ko	400 Ko
Wi-Fi	802.11 b/g/n	802.11 b/g/n
ADC (canaux)	20 canaux	6 canaux
Consommation typ.	~100 mA	~40 mA
Rôle dans GAS GUARD HOME	Nœud central	Nœuds secondaires

2.6.3 Module radio-fréquence 433 MHz

Assure la communication sans fil entre nœuds secondaires et nœud central. Offre une faible consommation, une communication rapide et une installation simple [27].

Plusieurs technologies de liaison inter-nœuds ont été envisagées lors de la conception : le Wi-Fi, le Bluetooth et le RF 433 MHz. Le Wi-Fi a été écarté pour les nœuds secondaires car il aurait imposé une consommation énergétique plus élevée et une dépendance accrue à la stabilité du réseau domestique pour une simple transmission locale de quelques octets. Le Bluetooth, bien qu'économe en énergie, limite la portée utile et le nombre de nœuds pouvant communiquer simultanément avec l'unité centrale. Le module RF 433 MHz a été retenu pour son faible coût, sa simplicité d'intégration avec les microcontrôleurs ESP32 et sa consommation réduite, adaptée à une transmission ponctuelle d'alertes plutôt qu'à un flux de données continu. Cette solution présente toutefois une portée plus sensible aux obstacles (dalles en béton armé, structures métalliques) que des technologies à plus longue portée comme LoRa, dont l'intégration constitue une piste d'amélioration pour les environnements multi-étages (voir section 3.8).

2.6.4 Les actionneurs

- **Relais 5V** : gère l'alimentation des équipements.
- **Buzzer 5V** : produit un signal sonore pour alerter les habitants.
- **Électrovanne** : interrompt automatiquement l'approvisionnement en gaz.

2.6.5 Alimentation HLK-PM01

Module AC-DC compact convertissant 100–240 V en 5 V DC (3W max). Garantit isolation électrique, excellent rendement et fiabilité exceptionnelle.

2.7 Fonctionnement général du système

Le fonctionnement du système GAS GUARD HOME repose sur une chaîne d'actions coordonnées et entièrement automatisées, conçue pour réagir le plus rapidement possible à toute situation dangereuse, même en l'absence totale des occupants. Chaque étape est pensée pour assurer à la fois une détection fiable, une transmission rapide de l'information et une intervention immédiate avant que la situation ne devienne incontrôlable.

2.7.1 Phase 1 : Surveillance permanente par les capteurs

En régime normal, les deux nœuds secondaires assurent une **surveillance continue et silencieuse** de l'environnement intérieur. Chacun d'eux est équipé de deux capteurs complémentaires qui couvrent l'ensemble des risques gazeux domestiques.

Le capteur **MQ-4** est chargé de détecter le méthane, le gaz naturel et tout autre gaz combustible susceptible de s'enflammer ou d'exploser [20]. Il est positionné en hauteur dans chaque pièce, car le méthane est moins dense que l'air et tend à s'accumuler près du plafond. Le capteur **MQ-7**, quant à lui, est spécialisé dans la détection du monoxyde de carbone (**CO**), ce gaz toxique, inodore et invisible qui peut provoquer une perte de connaissance rapide puis la mort sans que la victime n'en ait conscience [21]. Contrairement au méthane, le CO a une densité proche de celle de l'air ; le capteur MQ-7 est donc placé à hauteur de respiration, là où le risque d'inhalation est le plus élevé.

Ces deux capteurs fonctionnent en permanence, échantillonnant l'air ambiant de manière continue. Leurs sorties analogiques sont lues périodiquement par le microcontrôleur ESP32-C3 Super Mini de chaque nœud secondaire, qui convertit les tensions mesurées en concentrations exprimées en parties par million (**ppm**) à l'aide de la courbe de caractérisation fournie par le fabricant.

2.7.2 Phase 2 : Détection locale et génération de l'alerte RF

Tant que les concentrations mesurées restent en dessous des seuils de sécurité définis, le système demeure silencieux et continue sa surveillance. Dès qu'une valeur dépasse l'un des seuils programmés – que ce soit pour le gaz combustible ou pour le CO – l'ESP32-C3 Super Mini identifie immédiatement la situation comme potentiellement dangereuse.

Le nœud secondaire construit alors une **trame d'alerte** contenant l'identifiant du capteur concerné, le type de gaz détecté (méthane ou CO) et le niveau d'alarme déclenché (vigilance ou critique). Cette trame est transmise sans délai au nœud central via le **module RF émetteur 433 MHz**. Le choix de la communication RF plutôt que du Wi-Fi pour cette liaison locale est délibéré : il garantit une transmission rapide et fiable même en l'absence de réseau Internet, évitant ainsi toute dépendance à une infrastructure externe pour l'alerte d'urgence immédiate.

2.7.3 Phase 3 : Validation et déclenchement au nœud central

Le nœud central, piloté par l'ESP32-S3, est en écoute permanente des transmissions RF en provenance des nœuds secondaires. À la réception d'une trame d'alerte, l'ESP32-S3 analyse les informations reçues et applique une **logique de confirmation** permettant d'éliminer les faux positifs éventuels avant de déclencher les actions de sécurité.

Une fois la présence du danger confirmée, le nœud central déclenche simultanément et automatiquement les trois actions de protection suivantes :

1. **Activation du buzzer d'alarme** : un signal sonore puissant est immédiatement émis afin d'alerter les occupants présents dans l'habitation, leur permettant d'évacuer rapidement les lieux avant que la concentration de gaz n'atteigne un niveau critique pour la santé ou avant tout risque d'ignition.
2. **Commande de l'électrovanne via le relais** : le relais 5V reçoit l'ordre de commutation de l'ESP32-S3 et coupe immédiatement l'alimentation électrique de l'électrovanne, provoquant sa fermeture mécanique et l'interruption totale de l'arrivée de gaz. Cette action est fondamentale : elle supprime la source du danger à la racine, réduisant drastiquement les risques d'incendie ou d'explosion, **sans qu'aucune intervention humaine ne soit nécessaire**.
3. **Envoi d'une notification Telegram** : grâce à la connexion Wi-Fi intégrée de l'ESP32-S3, le système contacte les serveurs de l'API Telegram et envoie à l'utilisateur un message d'alerte instantané sur son smartphone [27]. Ce message précise la nature du gaz détecté (méthane ou CO), le nœud concerné (zone de l'habitation) et le niveau d'alarme, permettant à l'utilisateur de comprendre immédiatement la gravité de la situation et d'agir en conséquence, même s'il se trouve à distance de son domicile.

Pourquoi Telegram plutôt que les SMS ou les e-mails ?

Le choix du Bot Telegram comme canal de notification repose sur plusieurs avantages concrets par rapport aux alternatives classiques :

- **Instantané** : la latence de livraison est de l'ordre de 1 à 3 secondes, contre

plusieurs dizaines de secondes à quelques minutes pour un e-mail ou un SMS.

- **Gratuit** : aucun coût par notification, contrairement aux solutions GSM/SMS qui nécessitent un abonnement téléphonique actif.
- **Bidirectionnel** : l'utilisateur peut interroger le système à distance en envoyant des commandes (`/status` pour connaître l'état courant, `/reset` pour réinitialiser le système après intervention).
- **Multi-destinataires** : plusieurs membres d'une famille peuvent recevoir simultanément la même alerte sans configuration supplémentaire.
- **Historique horodaté** : toutes les alertes sont conservées avec leur date et heure exactes dans la conversation Telegram, constituant un journal d'événements utile pour l'analyse post-incident.

2.7.4 Phase 4 : Retour à la surveillance continue

Après l'exécution des actions de sécurité, le système ne s'arrête pas : il continue à surveiller en temps réel l'évolution de la concentration gazeuse. Si les capteurs constatent un retour à des niveaux normaux – indiquant que la fuite a cessé ou que la pièce a été ventilée – le système envoie une notification de retour à la normale et signale que l'air est propre. L'électrovanne peut alors être réouverte à distance par l'utilisateur via la commande `/reset`, une fois qu'il a vérifié que la situation est sous contrôle.

Ce cycle continu de surveillance, détection, intervention et retour à la normale constitue le cœur opérationnel du système GAS GUARD HOME, conçu pour assurer une protection domestique robuste et autonome 24 heures sur 24, 7 jours sur 7.

L'organigramme de la figure 2.5 illustre de manière synthétique l'ensemble de ce processus, depuis l'acquisition des données par les capteurs jusqu'à l'activation des dispositifs de sécurité et l'envoi des notifications à l'utilisateur, en passant par la logique de décision interne aux deux types de nœuds.

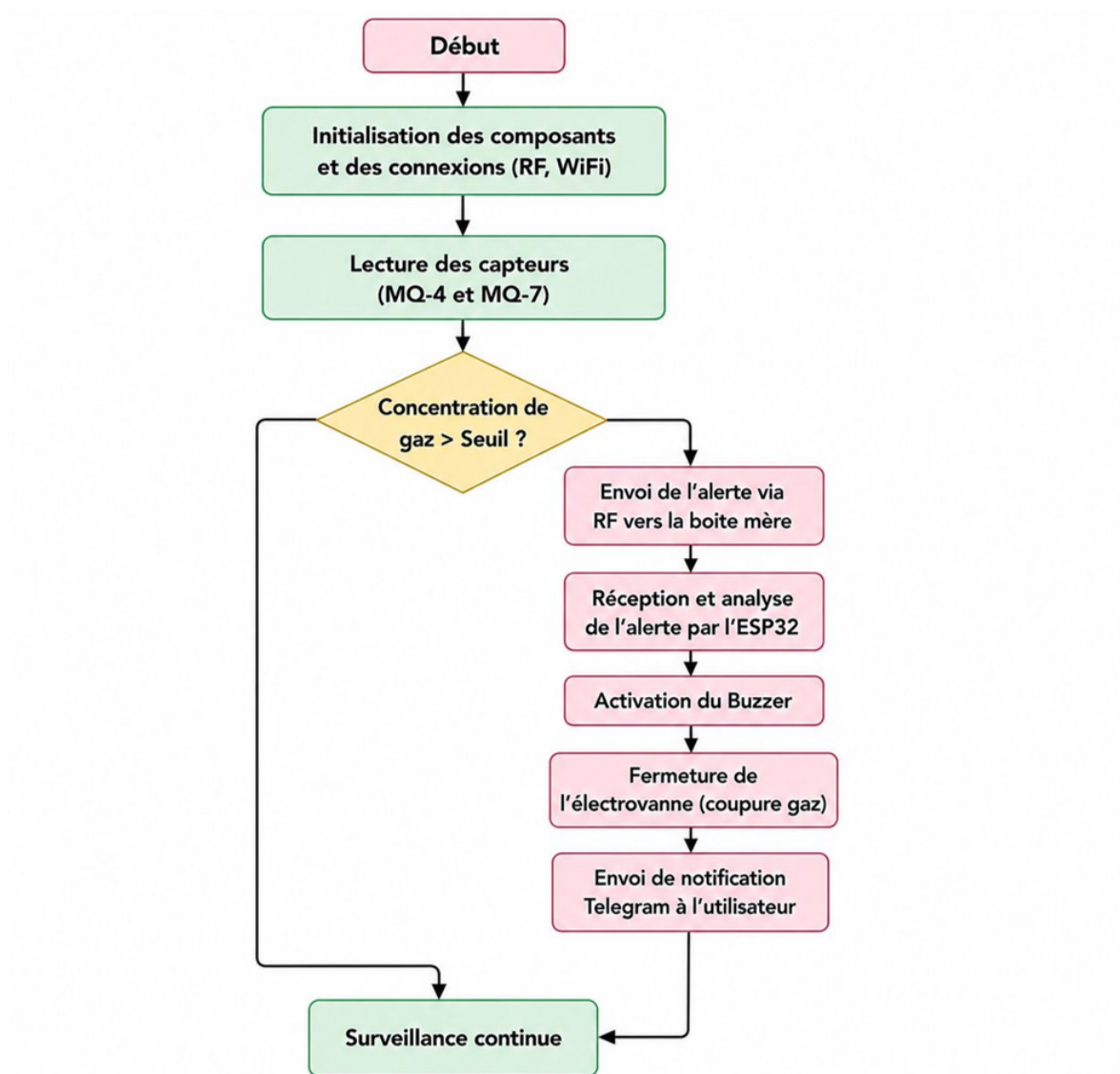


FIGURE 2.5 – Organigramme du fonctionnement général du système GAS GUARD HOME

2.8 Architecture logicielle

2.8.1 Environnement de développement

Le système a été développé sous **Arduino IDE** en raison de sa compatibilité avec les cartes ESP32 [26].

2.8.2 Protocoles de communication

La communication au sein du système GGH repose sur une architecture multicouche permettant la collecte, la transmission et la supervision des données. La figure suivante illustre les principales couches de communication du système.

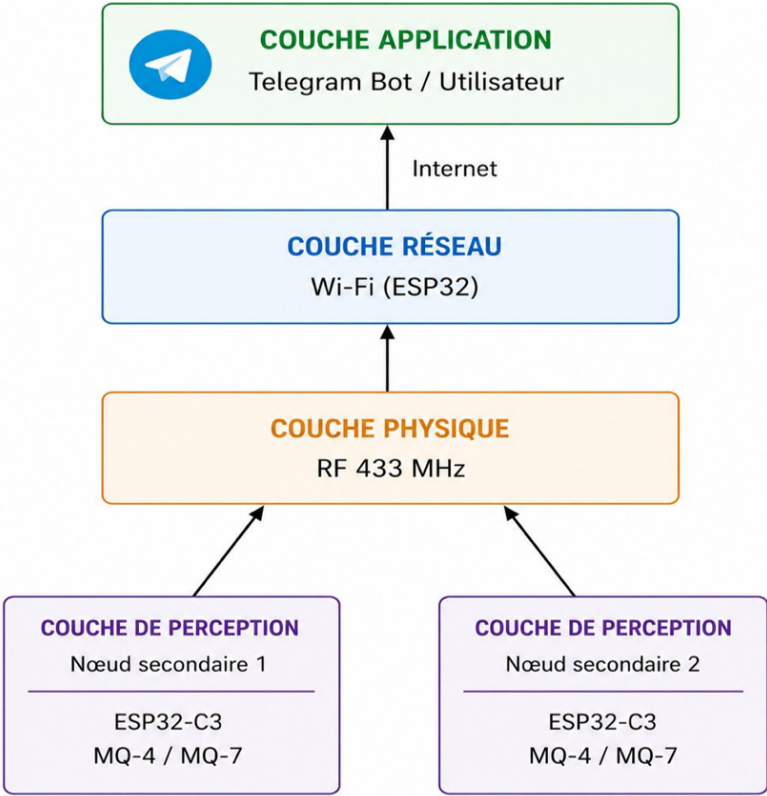


FIGURE 2.6 – Architecture des protocoles de communication utilisés dans le système GGH

TABLE 2.2 – Architecture des protocoles de communication du système GAS GUARD HOME

Couche	Technologie	Rôle
Perception	MQ-4, MQ-7	Détection des gaz dangereux
Physique	RF 433 MHz	Transmission locale entre nœuds
Réseau	Wi-Fi 802.11	Connexion à Internet
Application	Telegram Bot API	Réception alertes sur smartphone

2.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté la conception et l’architecture du système GAS GUARD HOME : architecture distribuée intelligente, composants matériels sélectionnés et justifiés, technologies de communication RF et Wi-Fi, et logique logicielle générale. Le chapitre suivant est consacré à la réalisation pratique, aux tests et à l’analyse des résultats.

Chapitre 3

Réalisation Pratique, Tests et Résultats

3.1 Introduction

Après avoir présenté l'architecture générale et les différents aspects de conception du système GAS GUARD HOME dans le chapitre précédent, ce chapitre est consacré à sa réalisation pratique ainsi qu'à l'évaluation de ses performances expérimentales.

Dans un premier temps, l'environnement de développement ainsi que les outils matériels et logiciels utilisés pour l'implémentation du système sont présentés. La réalisation matérielle et logicielle des différents nœuds est ensuite détaillée, en mettant en évidence les étapes d'intégration des composants électroniques et le développement des programmes embarqués.

Une attention particulière est également accordée à la calibration des capteurs MQ-4 et MQ-7, étape essentielle pour garantir une détection fiable. Par la suite, plusieurs essais expérimentaux sont réalisés afin de valider le bon fonctionnement du système.

Note de confidentialité – Projet Startup

Le code source complet du système GAS GUARD HOME est protégé dans le cadre du projet startup et n'est pas reproduit dans son intégralité dans ce document. Seules les descriptions fonctionnelles, les organigrammes et des extraits illustratifs généraux sont présentés, conformément aux exigences de confidentialité du projet.

3.2 Environnement de développement

Le développement du système GAS GUARD HOME a nécessité l'utilisation de plusieurs outils matériels et logiciels permettant l'intégration, la validation et l'évaluation des différentes fonctionnalités du prototype. Dans le cadre de ce projet startup, seuls les éléments nécessaires à la compréhension du fonctionnement global sont présentés, sans détailler les méthodes internes de développement.

3.2.1 Bibliothèques utilisées

Le système GAS GUARD HOME intègre plusieurs composants logiciels assurant les différentes fonctions de communication, de traitement et de notification. Le tableau [3.1](#)

présente les principales bibliothèques utilisées.

TABLE 3.1 – Bibliothèques Arduino utilisées dans le projet GAS GUARD HOME

Bibliothèque	Fonction principale
WiFi.h	Connexion au réseau Wi-Fi
WiFiClientSecure.h	Communication HTTPS sécurisée
UniversalTelegramBot.h	Gestion des notifications Telegram
RH_ASK.h	Communication RF 433 MHz
SPI.h	Support de communication série (SPI)
Adafruit_NeoPixel.h	Gestion de la signalisation lumineuse

Ces bibliothèques assurent les fonctions de communication Wi-Fi, de notification Telegram, d'échange de données par RF ainsi que la gestion de certains périphériques nécessaires au fonctionnement du prototype.

3.2.2 Outils de test et de mesure

Multimètre numérique

Un multimètre numérique a été utilisé pour mesurer les tensions d'alimentation délivrées par les modules HLK-PM01 ainsi que pour vérifier la continuité des connexions électriques sur les cartes réalisées.



FIGURE 3.1 – Contrôle des connexions électriques du système à l'aide d'un multimètre numérique

3.3 Réalisation matérielle

Après la phase de conception, la mise en œuvre matérielle du système GAS GUARD HOME a consisté à assembler et interconnecter les différents composants électroniques conformément à l'architecture proposée.

3.3.1 Schéma électronique du nœud secondaire

Le nœud secondaire est composé d'une carte de traitement, des capteurs MQ-4 et MQ-7 ainsi que d'un module RF émetteur. Il assure la détection des gaz dangereux et la transmission des données vers le nœud central.

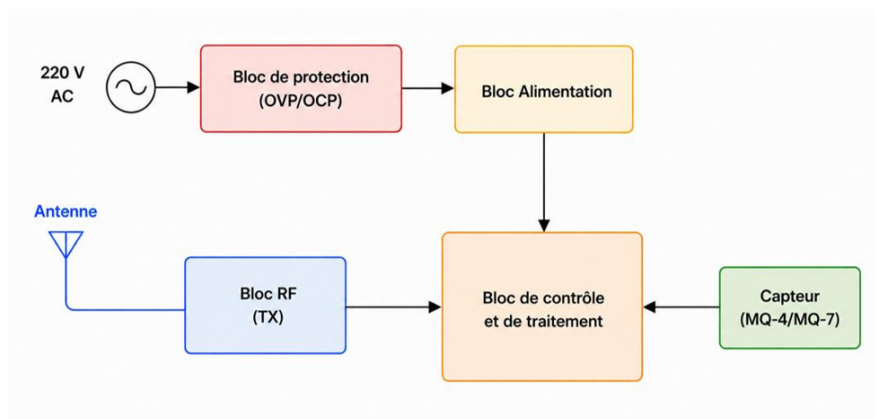


FIGURE 3.2 – Schéma électronique du nœud secondaire

Ce schéma présente les différentes connexions réalisées au niveau du nœud secondaire. Le microcontrôleur est connecté aux capteurs MQ-4 et MQ-7 ainsi qu'au module RF émetteur afin d'assurer l'acquisition des données et leur transmission vers le nœud central.

3.3.2 Schéma électronique du nœud central

Le nœud central intègre une carte de traitement, un module RF récepteur, un buzzer, un relais et une électrovanne. Son rôle est de traiter les données reçues et de déclencher les dispositifs de sécurité.

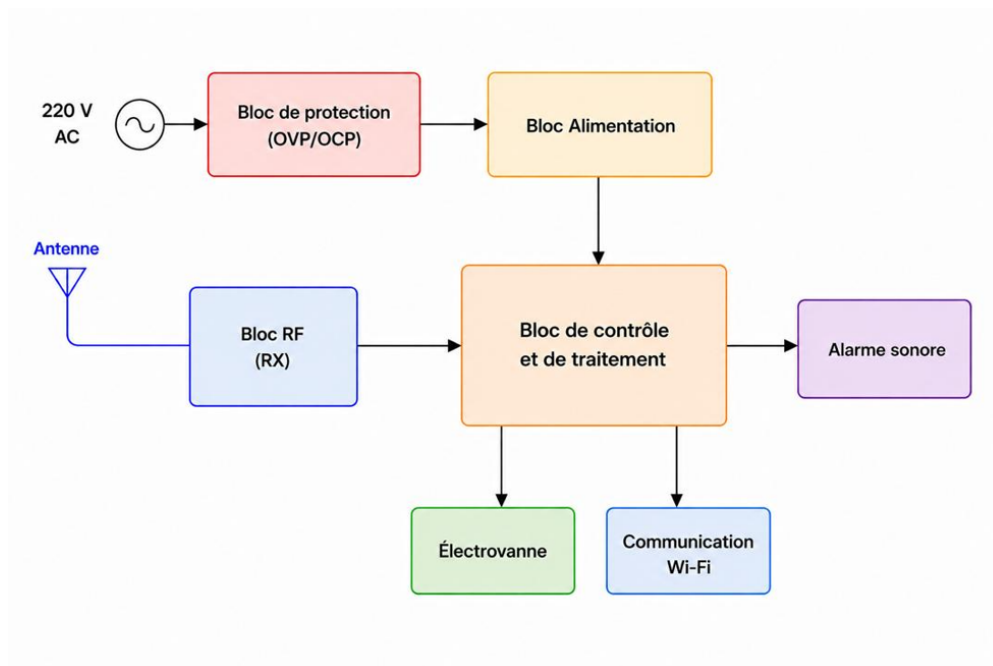


FIGURE 3.3 – Schéma électronique du nœud central

Le schéma du nœud central montre l'interconnexion entre le microcontrôleur, le module RF récepteur, le buzzer, le relais et l'électrovanne. À la réception d'une alerte, cette unité déclenche le traitement des données et l'activation des dispositifs de sécurité.

3.3.3 Montage et réalisation du prototype

Après l'assemblage des différents composants électroniques, les modules ont été intégrés dans des boîtiers afin de réaliser le prototype final du système.



(a) Prototype du nœud secondaire



(b) Prototype du nœud central

FIGURE 3.4 – Prototypes réalisés des nœuds du système GAS GUARD HOME



FIGURE 3.5 – Prototype final du système GAS GUARD HOME

Cette figure présente le prototype final du système GAS GUARD HOME après l'intégration des différents nœuds. L'ensemble permet d'assurer la détection des gaz, la transmission des alertes et l'activation automatique des mécanismes de protection.

3.3.4 Évolution du système d'alimentation

Décision d'ingénierie documentée

Le choix du système d'alimentation constitue un élément important dans la conception du système GAS GUARD HOME. La transition de l'alimentation par batteries vers une alimentation secteur régulée constitue une décision d'ingénierie clé, motivée par des observations concrètes lors de la phase de prototypage.

Phase 1 : Prototype alimenté par batteries

Dans la première phase de développement, le système GAS GUARD HOME a été alimenté par des batteries portables afin de faciliter la mise en place rapide du prototype.

L'utilisation d'une batterie a été envisagée au début du projet. Cependant, cette solution présente plusieurs limitations importantes :

- **Autonomie limitée** : la surveillance continue des capteurs MQ (filament de chauffage actif en permanence), combinée au fonctionnement constant du module RF et du microcontrôleur, entraînait une consommation élevée. L'autonomie des batteries ne permettait pas d'assurer la continuité de service 24h/24.
- **Nécessité de recharges périodiques** : une surveillance humaine régulière était requise, réduisant le caractère autonome du système.
- **Risque d'arrêt inopiné** : une décharge complète compromettrait la surveillance et réduirait la fiabilité du système.
- **Instabilité de tension** : la tension fournie diminue progressivement, affectant la précision des lectures analogiques et générant des dérives de mesure non souhaitées.

Phase 2 : Migration vers alimentation secteur (HLK-PM01)

Les tests de la phase initiale ayant révélé que l'alimentation par batteries ne permettait pas d'assurer la continuité de service exigée, une alimentation à partir du réseau électrique domestique 220 V AC a été retenue. Le module **HLK-PM01** a été utilisé pour convertir la tension secteur en une tension continue de 5 V DC adaptée au fonctionnement des différents composants.

En revanche, l'alimentation secteur permet d'assurer un fonctionnement permanent et stable, particulièrement important pour une application de sécurité domestique.

TABLE 3.2 – Comparaison des deux solutions d'alimentation testées

Critère	Phase 1 – Batteries	Phase 2 – HLK-PM01
Autonomie	< 12h*	Illimitée (secteur)
Stabilité tension	Variable (décharge)	Stable 5 V régulé
Fausses alarmes	Observées	Supprimées
Mobilité	Totale	Fixé secteur
Coût	Batteries récurrentes	HLK unique (~2\$)
Adapté 24h/7j	Non	Oui

*Valeur observée sur le prototype GAS GUARD HOME en Phase 1, cohérente avec l'ordre de grandeur de 6 à 10 heures rapporté par Mainetti *et al.* [8] pour des nœuds IoT équivalents (capteur MQ + ESP32 + module RF), cité en section 1.3.2.

3.4 Réalisation logicielle

La réalisation logicielle constitue la partie intelligente du système GAS GUARD HOME. Elle regroupe l'ensemble des programmes développés pour assurer l'acquisition des données, leur traitement, la communication entre les différents nœuds ainsi que la gestion des alertes et des dispositifs de sécurité.

3.4.1 Description fonctionnelle du firmware du nœud secondaire

Le firmware du nœud secondaire est exécuté par la carte ESP32-C3 Super Mini et a pour rôle de surveiller en continu l'environnement local. Dès sa mise sous tension, le microcontrôleur initialise les capteurs MQ-4 et MQ-7 ainsi que le module RF émetteur. Une fois l'initialisation terminée, il procède à la lecture périodique des valeurs fournies par les capteurs de gaz.

Les données acquises sont ensuite traitées localement afin d'évaluer le niveau de concentration des gaz détectés. Les valeurs mesurées sont comparées aux seuils d'alarme préalablement définis. Tant que les concentrations restent dans la plage normale, le nœud secondaire poursuit son cycle de surveillance sans générer d'alerte.

Lorsque la concentration d'un gaz dépasse le seuil autorisé, l'ESP32-C3 identifie la situation comme potentiellement dangereuse. Une information d'alerte contenant l'identification du nœud concerné est alors générée puis transmise au nœud central via la liaison RF 433 MHz. Après l'envoi des données, le système revient automatiquement en mode de surveillance.

3.4.2 Description fonctionnelle du firmware du nœud central

Le rôle du firmware du nœud central, exécuté sur la carte ESP32-S3, est de centraliser les alertes transmises par les nœuds secondaires et de piloter les dispositifs de sécurité en conséquence. Au démarrage, le microcontrôleur initialise le module RF récepteur, le réseau Wi-Fi, le Bot Telegram ainsi que les dispositifs de sécurité connectés.

Le nœud central reste en attente des informations transmises par les nœuds secondaires. Lorsqu'un message d'alerte est reçu via la liaison RF, les données sont analysées afin de confirmer la présence d'un danger. Si l'alerte correspond à un dépassement des seuils de sécurité, le système déclenche automatiquement les actions de protection :

1. Le **buzzer** est activé afin d'avertir immédiatement les occupants.
2. Le **relais** commande l'électrovanne de sécurité pour interrompre l'arrivée du gaz.
3. Une **notification** est envoyée à l'utilisateur via Telegram grâce à la connexion Wi-Fi de l'ESP32-S3.

Après l'exécution des actions de sécurité, le nœud central retourne à son état de surveillance et continue à recevoir les informations provenant des nœuds secondaires.

3.4.3 Configuration du Bot Telegram

Afin d'assurer la notification à distance des utilisateurs, un Bot Telegram a été intégré au système GAS GUARD HOME. La configuration a débuté par la création du Bot à l'aide du service **BotFather** proposé par Telegram. Une fois le Bot créé, un identifiant unique a été généré afin de permettre la communication entre le programme embarqué et les serveurs Telegram.

Par la suite, le *Chat ID* de l'utilisateur a été récupéré puis intégré au programme du nœud central. Ainsi, lorsque le système détecte une situation dangereuse, une notification est automatiquement envoyée à l'utilisateur contenant les informations relatives à l'alerte détectée.

Note de confidentialité – Projet Startup

Les valeurs spécifiques du token d'authentification et du Chat ID utilisés dans le prototype sont confidentielles et ne sont pas reproduites dans ce document.

Cette solution présente plusieurs avantages : rapidité de transmission, simplicité de mise en œuvre et possibilité de surveiller le système à distance.

3.4.4 Organigramme détaillé du système

La figure 3.6 illustre la logique de fonctionnement du système GAS GUARD HOME. Elle présente les principales opérations réalisées lors de la surveillance des gaz, du

traitement des alertes, de l'envoi des notifications et de l'activation des dispositifs de sécurité.

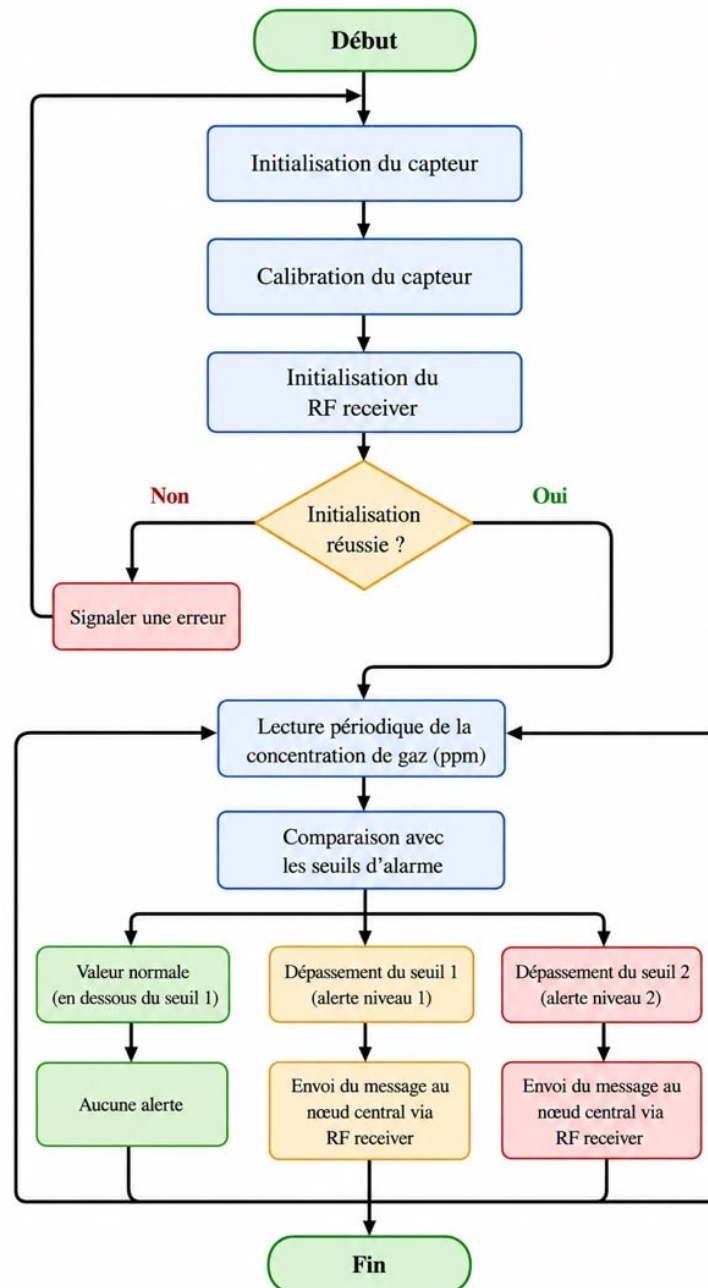


FIGURE 3.6 – Organigramme général du système GAS GUARD HOME

L'organigramme décrit le fonctionnement global du système GAS GUARD HOME. Après sa mise sous tension, le système initialise les différents modules puis établit la connexion au réseau de communication. Une fois cette phase terminée, il entre en mode de surveillance continue. En cas de détection d'une concentration anormale, une notification est envoyée et les actions de sécurité sont déclenchées. Le système assure également la surveillance de la communication avec les capteurs et signale toute perte de liaison.

3.5 Calibration des capteurs

3.5.1 Procédure de calibration en air propre

Avant la mise en service des capteurs MQ-4 et MQ-7, une procédure de calibration en air propre a été réalisée afin de déterminer la valeur de référence du capteur, nécessaire à l'estimation correcte des concentrations de gaz [28, 29].

La calibration est effectuée automatiquement lors du démarrage de chaque nœud secondaire. Après l'initialisation du capteur, celui-ci est placé dans un environnement considéré comme exempt de gaz polluants. Dix mesures successives sont alors réalisées afin de déterminer la valeur de référence en air propre.

Une fois les mesures effectuées, une valeur moyenne est calculée puis enregistrée comme référence pour les mesures ultérieures. Cette étape permet d'améliorer la précision des mesures et de garantir un fonctionnement fiable du système de détection.

Enfin, une vérification est réalisée afin de s'assurer de la validité de la calibration. En cas d'anomalie, le système signale une erreur. Dans le cas contraire, le capteur est déclaré opérationnel et le système passe en mode de surveillance continue.

3.5.2 Détermination des seuils d'alarme

Afin d'assurer une détection efficace des situations dangereuses, des seuils d'alarme ont été définis pour les capteurs MQ-4 et MQ-7. Deux niveaux d'alerte ont été retenus pour chaque capteur : un niveau de vigilance (détection précoce) et un niveau critique (intervention immédiate).

TABLE 3.3 – Seuils d'alarme implémentés pour les capteurs MQ-4 et MQ-7

Capteur	Niveau d'alarme	Seuil de concentration
MQ-4	Gas1 (Vigilance)	1 000 ppm < Gaz < 30 000 ppm
MQ-4	Gas2 (Critique)	Gaz > 30 000 ppm
MQ-7	CO1 (Vigilance)	30 ppm < CO < 200 ppm
MQ-7	CO2 (Critique)	CO > 200 ppm

Interprétation des niveaux :

- **Gas1** : détection précoce d'une fuite de gaz combustible nécessitant une surveillance accrue.
- **Gas2** : concentration critique de gaz combustible nécessitant une intervention rapide et l'activation de l'électrovanne.

- **CO1** : présence anormale de CO pouvant présenter un risque pour les occupants.
- **CO2** : niveau critique de CO représentant un danger important pour la santé.

Lorsque l'un de ces seuils est dépassé, le nœud secondaire transmet automatiquement un message d'alarme au nœud central via la liaison RF 433 MHz. Le nœud central déclenche alors l'alarme sonore et envoie une notification à l'utilisateur via Telegram.

3.6 Tests et validation

Afin de vérifier le bon fonctionnement du système GAS GUARD HOME, plusieurs essais expérimentaux ont été réalisés. Ces tests ont permis d'évaluer les performances des capteurs de gaz, la fiabilité de la communication RF, le fonctionnement du système de notification ainsi que l'efficacité des dispositifs de sécurité.

3.6.1 Tests unitaires des capteurs

Test du capteur MQ-4

Le capteur MQ-4 a été testé à l'aide d'une source de gaz butane provenant d'un briquet. Les essais réalisés ont montré que le capteur détecte correctement la présence du gaz et transmet une alerte au nœud central lorsque la concentration dépasse les seuils programmés. Le test a été répété sur plusieurs essais afin de vérifier la répétabilité de la détection.



FIGURE 3.7 – Exemple de test du capteur MQ-4 à l'aide d'une source de gaz butane

TABLE 3.4 – Résultats du test du capteur MQ-4

Capteur	Source de test	Temps de réponse	Taux de réussite
MQ-4	Gaz butane (briquet)	10 s	100%

Test du capteur MQ-7

Le capteur MQ-7 a été soumis à un test à l'aide d'une source de fumée afin de simuler la présence de monoxyde de carbone. Les résultats obtenus montrent que le capteur réagit correctement aux variations de concentration et transmet les alertes prévues au système. Comme pour le capteur MQ-4, plusieurs essais ont été répétés afin d'estimer la fiabilité statistique de la détection.

TABLE 3.5 – Résultats du test du capteur MQ-7

Capteur	Source de test	Temps de réponse	Taux de réussite
MQ-7	Fumée	10 s	100%

3.6.2 Tests de communication RF

Des essais ont été réalisés afin d'évaluer la portée et la fiabilité de la communication entre les nœuds secondaires et le nœud central.

Les tests effectués dans un même étage ont montré une transmission correcte des données aussi bien en espace dégagé qu'en présence de cloisons et de murs intérieurs. Les alertes ont été reçues avec succès par le nœud central dans toutes les configurations testées.

Cependant, lors des essais réalisés entre différents étages du bâtiment, une forte atténuation du signal a été observée, entraînant une perte de communication dans certains cas. Cette limitation est principalement due à la présence des dalles en béton armé et des structures métalliques qui absorbent les ondes radio à 433 MHz.

Malgré cette contrainte, les performances obtenues restent satisfaisantes pour l'application visée, le système étant destiné principalement à une utilisation résidentielle sur un même niveau d'habitation.

TABLE 3.6 – Résultats des tests de communication RF

Condition de test	Distance (m)	Essais	Résultat
Sans obstacle	100	10/10	Communication réussie
Avec obstacles	30	10/10	Communication réussie
Entre étages	8	2 étages	Faible atténuation

La colonne « Essais » indique le nombre de transmissions reçues avec succès sur le nombre total de tentatives (à renseigner à partir des journaux de test).

3.6.3 Test de notification Telegram

Démarrage du système et connexion des capteurs

Lors du démarrage du nœud central, une connexion au réseau Wi-Fi est établie puis le Bot Telegram est initialisé.



FIGURE 3.8 – Messages de démarrage du système, connexion des capteurs et retour à l'état normal via Telegram

Un message de bienvenue est automatiquement envoyé à l'utilisateur afin de confirmer la mise en service du système.

Après l'établissement de la liaison RF, les capteurs MQ-4 et MQ-7 sont détectés automatiquement. Le système confirme leur connexion, procède à une analyse de l'environnement surveillé puis informe l'utilisateur que l'air est propre et que le système fonctionne dans des conditions normales.

Les notifications reçues démontrent que la procédure d'initialisation, la détection des capteurs ainsi que l'échange d'informations entre les différents nœuds sont réalisées correctement.

Détection de gaz et de monoxyde de carbone

Afin d'évaluer la capacité du système à détecter les situations potentiellement dangereuses, plusieurs essais ont été réalisés en exposant les capteurs à des concentrations de gaz supérieures aux seuils de sécurité définis.

Lorsque le capteur MQ-4 détecte une concentration anormale de gaz combustible, une notification d'avertissement est automatiquement transmise à l'utilisateur via Telegram. De la même manière, le capteur MQ-7 génère une alerte lors d'une présence anormale de CO. Les messages reçus permettent à l'utilisateur d'être informé rapidement de la nature du danger ainsi que de la zone concernée. Après disparition du gaz, une notification confirme que l'air est propre.



FIGURE 3.9 – Notifications d'alerte de niveau 1 pour le gaz et le monoxyde de carbone

Les notifications affichées confirment la capacité du système à informer rapidement l'utilisateur lorsqu'un seuil d'alerte de niveau 1 est détecté.

Alertes critiques et activation des dispositifs de sécurité

Les essais ont également porté sur les situations correspondant aux niveaux critiques de concentration. Lorsqu'un niveau critique de gaz combustible est détecté par le capteur MQ-4, le nœud central déclenche automatiquement les mesures de sécurité : une notification critique est envoyée et l'électrovanne est commandée pour interrompre l'alimentation en gaz.

Le même comportement a été observé lors de la détection d'une concentration critique de CO par le capteur MQ-7.



FIGURE 3.10 – Notifications d'alerte critique (niveau 2) et fermeture automatique de l'électrovanne

Les résultats obtenus confirment le bon fonctionnement de la procédure de sécurité ainsi que la capacité du système à réagir automatiquement face à une situation dangereuse.

Détection de perte de communication des capteurs

Des interruptions volontaires de communication ont été provoquées entre les nœuds secondaires et le nœud central afin d'observer le comportement du système en cas de perte de liaison. Lorsque le système ne reçoit plus de données pendant une durée déterminée, une notification est envoyée pour signaler le capteur hors ligne.

Après le rétablissement de la communication, le système détecte automatiquement le retour du capteur à l'état opérationnel et transmet une notification de confirmation.



FIGURE 3.11 – Notifications de déconnexion et de reconnexion des capteurs

Tableau récapitulatif des essais de notification Telegram

TABLE 3.7 – Résultats des essais du système de notification Telegram

Essai réalisé	Notification observée	Résultat
Démarrage du système	Message de bienvenue	Initialisation correcte
Connexion capteur MQ-4	Connexion du capteur MQ-4	Communication établie
Connexion capteur MQ-7	Connexion du capteur MQ-7	Communication établie
Retour à l'état normal	L'air est propre	Fonctionnement normal
Détection de Gaz	Alerte gaz niveau 1	Alerte transmise
Détection de CO	Alerte CO niveau 1	Alerte transmise
Gaz critique	Niveau critique de gaz détecté	Protection déclenchée
CO critique	Niveau critique de CO détecté	Protection déclenchée
Capteur hors ligne	Capteur hors ligne	Absence de communication détectée
Reconnexion du capteur	Capteur reconnecté	Communication rétablie

3.6.4 Test d'activation de l'électrovanne

Le bon fonctionnement de l'électrovanne a été vérifié lors d'une situation d'alerte simulée. Lorsqu'une concentration anormale de gaz est détectée, le nœud central active automatiquement le relais qui commande l'électrovanne de sécurité.

TABLE 3.8 – Résultat du test d’activation de l’électrovanne

Action testée	Résultat
Activation du relais	Réussie
Activation de l’électrovanne	Réussie

Les essais réalisés ont confirmé la réaction correcte du système. L’électrovanne s’active automatiquement dès la réception d’une alerte, contribuant ainsi à la réduction des risques liés aux fuites de gaz.

3.6.5 Test de fausse alarme

La fiabilité du système a été examinée dans des conditions normales de fonctionnement, sans présence de gaz dangereux, pendant une durée d’observation de 48 heures. L’objectif est de vérifier que les seuils définis n’entraînent pas de déclenchements injustifiés.

TABLE 3.9 – Résultats du test de fausse alarme

Condition de test	Durée d’observation	Résultat
Absence de gaz	48– h	Aucune alarme
Notification Telegram	48– h	Non envoyée
Activation du relais	48–h	Non activée

Durant toute la période d’observation précisée ci-dessus, aucune alerte n’a été générée. Les résultats confirment que les seuils choisis permettent d’éviter les fausses alarmes tout en maintenant une bonne sensibilité de détection.

3.6.6 Test d’endurance (fonctionnement continu)

Un essai de fonctionnement continu a été réalisé afin d’évaluer la stabilité du système sur une longue durée de 72 heures. Les différents modules ont été maintenus en service sans interruption pendant toute la période de test, et 20 cycles d’alerte ont été déclenchés volontairement durant cette période afin de vérifier l’absence de dérive du système après sollicitation répétée.

TABLE 3.10 – Résultats du test d’endurance

Paramètre évalué	Durée / Quantité	Résultat
Fonctionnement continu	72 – h	Stable
Communication RF	20 – cycles	Stable
Notifications Telegram	20 – cycles	Fonctionnelles

Le test d’endurance a permis d’évaluer la stabilité et la fiabilité du système lors d’un fonctionnement continu. Les capteurs MQ-4 et MQ-7, la liaison RF ainsi que le système de notification Telegram sont restés opérationnels sans interruption. Aucune perte de communication, aucun redémarrage inattendu et aucun dysfonctionnement majeur n’ont été observés.

Ces résultats démontrent que le système GAS GUARD HOME est capable d’assurer une surveillance continue des fuites de gaz et qu’il peut fonctionner de manière fiable dans des conditions normales d’utilisation.

3.7 Analyse des résultats

3.7.1 Tableau récapitulatif des performances mesurées

TABLE 3.11 – Tableau récapitulatif des performances mesurées du système GAS GUARD HOME

Fonction testée	Résultat
Détection MQ-4	Détection correcte
Détection MQ-7	Détection correcte
Communication RF	Transmission fiable (même étage)
Notification Telegram	Envoi réussi
Activation de l’électrovanne	Réponse conforme
Test de fausse alarme	Aucune fausse alarme détectée
Fonctionnement continu	Stable

3.7.2 Discussion et comparaison aux spécifications

Les résultats obtenus démontrent que le système répond aux objectifs fixés lors de la phase de conception. Les capteurs MQ-4 et MQ-7 ont détecté correctement les gaz cibles, tandis que la liaison RF a assuré une transmission fiable des alertes entre les différents nœuds.

Les notifications Telegram ont été reçues avec succès et l'électrovanne a été activée conformément aux exigences de sécurité. La migration vers l'alimentation secteur (Phase 2) a permis de résoudre les problèmes d'autonomie et d'instabilité de mesure identifiés en Phase 1, validant la pertinence de cette décision d'ingénierie. Les performances observées sont donc cohérentes avec les spécifications définies.

3.7.3 Limitations observées

Malgré les performances satisfaisantes obtenues, certaines limitations ont été constatées :

- Les capteurs MQ nécessitent un temps de préchauffage avant d'atteindre leur régime de fonctionnement optimal. Leur précision peut également être influencée par la température, l'humidité ou la présence d'autres gaz.
- La portée de la communication RF dépend des obstacles présents entre les différents nœuds, notamment les dalles en béton armé entre étages.
- Les notifications Telegram restent tributaires de la disponibilité d'une connexion Internet.
- L'alimentation secteur retenue en Phase 2, bien que nécessaire à la stabilité des mesures (voir section 1.3.2), introduit en contrepartie un point de vulnérabilité critique : en l'absence de batterie de secours, une coupure de courant désactive entièrement la surveillance, ce qui est particulièrement sensible pour un système de sécurité censé fonctionner 24h/24 et 7j/7.

3.8 Améliorations envisagées

Plusieurs améliorations peuvent être envisagées pour les futures versions du système :

- L'intégration de capteurs plus précis (électrochimiques ou NDIR) pour améliorer la qualité des mesures.
- L'ajout d'une **batterie de secours** garantissant la continuité du fonctionnement en cas de coupure électrique.
- Le développement d'une **application mobile dédiée** en remplacement du Bot Telegram.

- L'intégration d'une **plateforme Cloud** (ThingSpeak ou Firebase) pour le stockage de l'historique et l'analyse des tendances.
- L'augmentation de la portée de communication via un module RF plus puissant ou le passage à LoRa pour les environnements multi-étages.
- La **certification** selon les normes EN 50194 et EN 50291 pour la commercialisation officielle du produit.

3.9 Conclusion

Ce chapitre a présenté la réalisation pratique du système GAS GUARD HOME ainsi que les différentes phases de test et de validation. L'évolution de la solution d'alimentation, depuis les batteries vers le module HLK-PM01 alimenté par le secteur, a constitué une décision d'ingénierie essentielle ayant permis d'assurer la continuité de service et la stabilité des mesures.

Les essais réalisés ont confirmé la réaction correcte du système : détection des fuites de gaz, transmission des alertes vers le nœud central, notification instantanée par Telegram et activation automatique de l'électrovanne. La fiabilité de la communication RF, l'efficacité du système de notification et la stabilité générale du prototype ont été validées. Ces résultats confirment que la solution proposée constitue un moyen efficace pour améliorer la sécurité des habitations face aux risques liés aux fuites de gaz.

Conclusion Générale

Ce projet avait pour objectif la conception, le développement et la validation d'un système intelligent de détection des fuites de gaz domestiques, dénommé **Gas Guard Home**.

La démarche adoptée a combiné une analyse critique de l'état de l'art – mettant en évidence un vide technologique précis autour de la détection multi-gaz, multi-zones et à intervention automatique – avec une conception d'architecture distribuée à trois nœuds justifiée composant par composant, puis une réalisation pratique validée par des essais expérimentaux. L'évolution de la solution d'alimentation (batteries vers secteur HLK-PM01) illustre particulièrement bien cette démarche itérative : une limitation concrète observée en Phase 1 a été identifiée, analysée à la lumière de la littérature, puis résolue par une décision d'ingénierie documentée. Les résultats expérimentaux confirment la viabilité technique de l'ensemble : détection fiable des gaz, communication RF stable sur un même niveau d'habitation, notifications Telegram opérationnelles et activation correcte de l'électrovanne.

En conclusion, le système GAS GUARD HOME démontre qu'une solution de sécurité domestique intelligente, fiable et accessible peut être développée avec des composants embarqués modernes et des technologies IoT. La feuille de route vers une commercialisation effective repose sur quatre axes complémentaires : l'ajout d'une batterie de secours pour éliminer la vulnérabilité identifiée aux coupures de courant ; l'engagement d'une étude de certification selon les normes EN 50194 et EN 50291 ; le chiffrage précis du coût de fabrication et du prix de vente cible pour le marché algérien et régional ; et l'identification de partenariats de distribution concrets. Ces étapes, détaillées en section 3.8 et dans le positionnement startup du chapitre 1, ouvrent la voie à une commercialisation future du produit.

Bibliographie

- [1] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, “Internet of Things : A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [2] World Health Organization, “Household Air Pollution and Health – Key Facts,” WHO Fact Sheet, World Health Organization, Geneva, Switzerland, 2023. [Online]. Available : <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- [3] K. Brudzewski, S. Osowski, and A. Dwulit, “Recognition of Coffee Using Differential Electronic Nose and its Ability to Discriminate Between Different Roasting Levels,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 12, no. 2, pp. 254–261, Feb. 2012, [Cited for electrochemical CO sensor characterization methodology].
- [4] T. Samuel, K. Bhavani, and R. Dhanasekaran, “Low-Power CO Detection Node for Residential IoT Safety Applications,” in *Proceedings of the IEEE SENSORS Conference*. Montreal, Canada : IEEE, 2019, pp. 1–4.
- [5] S. Harinee and R. Thilagam, “IoT Based Home Automation and Gas Leakage Detection System Using ESP8266 and MQ-7 Sensor,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Innovations in Information and Communication Technology (ICIICT)*. Chennai, India : IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [6] M. Ammar, G. Russello, and B. Crispo, “Internet of Things : A Survey on the Security of IoT Frameworks,” *Journal of Information Security and Applications*, vol. 38, pp. 8–27, Feb. 2018, [Cited for MQTT-based distributed sensor architecture].
- [7] S.-J. Park, D.-H. Kim, and J.-S. Lee, “Temperature and Humidity Compensation Algorithm for Electrochemical Carbon Monoxide Sensors in IoT Applications,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 15, pp. 12 241–12 251, Aug. 2021.
- [8] L. Mainetti, L. Patrono, and A. Vilei, “Evolution of Wireless Sensor Networks Towards the Internet of Things : A Survey,” in *Proceedings of the IEEE International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM)*. Split, Croatia : IEEE, 2011, pp. 1–6, [Cited for energy consumption analysis of MQ sensor nodes].
- [9] T. Rault, A. Bouabdallah, and Y. Challal, “Energy Efficiency in Wireless Sensor Networks : A Top-Down Survey,” *Computer Networks*, vol. 67, pp. 104–122, Jul. 2014.

- [10] A. Zanella, N. Bui, A. Castellani, L. Vangelista, and M. Zorzi, “Internet of Things for Smart Cities,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 22–32, Feb. 2014, [Cited for hybrid power supply strategies in embedded safety systems].
- [11] R. Piyare, “Internet of Things : Ubiquitous Home Control and Monitoring System Using Android Based Smart Phone,” *International Journal of Internet of Things*, vol. 2, no. 1, pp. 5–11, 2013.
- [12] Figaro Engineering Inc., *Technical Note TGS 2610 : Influence of Power Supply Voltage on Sensor Output Characteristics*, Figaro Engineering Inc., Mino City, Osaka, Japan, 2015. [Online]. Available : <https://www.figarosensor.com>
- [13] H. Hašan, Z. Mujčić, and A. Bakić, “Characterization of Power Supply Sensitivity of MQ-Series Metal Oxide Gas Sensors,” *Sensors and Actuators B : Chemical*, vol. 220, pp. 1012–1021, 2015.
- [14] D. T. Gottuk, B. Y. Lattimer, S. L. Mealy, R. J. Roby, and C. L. Beyler, “Advanced Fire Detection Using Multi-Signature Alarm Algorithms,” *Fire Safety Journal*, vol. 37, no. 4, pp. 381–394, Jun. 2002.
- [15] E. Renni, E. Krausmann, and V. Cozzani, “Industrial Accidents Triggered by Lightning,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 184, no. 1–3, pp. 42–48, Dec. 2010, [Cited for false alarm rate analysis in residential detectors].
- [16] M. Risteiu, M. Hoza, M. Leba, and A. Ionica, “IoT Multi-Sensor System for Integrated Home Fire and CO Detection Using ZigBee Communication,” *Sensors*, vol. 19, no. 22, p. 4971, Nov. 2019.
- [17] J.-S. Pan, L. Chen, and Y. Chen, “Intelligent Fire Detection System Based on Multi-Sensor Data Fusion and Fuzzy Logic,” *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, no. 9, pp. 5912–5921, Sep. 2020.
- [18] D. Y. T. Chino, L. P. S. Avalhais, J. F. Rodrigues, and A. J. M. Traina, “BoWFire : Detection of Fire in Still Images by Integrating Pixel Color and Texture Analysis,” in *Proceedings of the 28th IEEE Conference on Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI)*. Salvador, Brazil : IEEE, 2015, pp. 95–102.
- [19] N. N. Brushlinsky, M. Ahrens, S. V. Sokolov, and P. Wagner, “World Fire Statistics,” *Fire Technology*, 2020, [Cited for cost analysis of EN 54 certified fire detection systems].
- [20] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., *MQ-4 Semiconductor Sensor for Natural Gas – Technical Data Sheet*, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Zhengzhou, China, 2014. [Online]. Available : <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MQ-4.pdf>
- [21] —, *MQ-7 Semiconductor Sensor for Carbon Monoxide – Technical Data Sheet*, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Zhengzhou, China, 2014. [Online]. Available : <https://www.winsen-sensor.com/d/files/MQ-7.pdf>

- [22] CENELEC, “EN 50194 : Residential Alarms – Specific Requirements for Combustible Gas Detectors,” European Committee for Electrotechnical Standardization (CEN-CENELEC), Brussels, Belgium, Tech. Rep., 2009.
- [23] —, “EN 50291 : Electrical Apparatus for the Detection of Carbon Monoxide in Domestic Premises,” European Committee for Electrotechnical Standardization (CEN-CENELEC), Brussels, Belgium, Tech. Rep., 2010.
- [24] République Algérienne Démocratique et Populaire, “Arrêté interministériel du 10 novembre 2020 fixant les exigences de sécurité applicables aux détecteurs de monoxyde de carbone à usage domestique,” Journal Officiel de la République Algérienne, 2020.
- [25] L. Mainetti, L. Patrono, and A. Vilei, “Evolution of Wireless Sensor Networks Towards the Internet of Things,” in *Proceedings of the 19th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM 2011)*. Split, Croatia : IEEE, 2011, pp. 1–6.
- [26] Espressif Systems, *ESP-IDF Programming Guide*, Espressif Systems, Shanghai, China, 2023. [Online]. Available : <https://docs.espressif.com>
- [27] Telegram Messenger LLP, “Telegram Bot API Documentation,” Online Documentation, 2023. [Online]. Available : <https://core.telegram.org/bots/api>
- [28] Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., *MQ-4 Application Notes*, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Zhengzhou, China, 2014.
- [29] —, *MQ-7 Application Notes*, Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Zhengzhou, China, 2014.
- [30] Espressif Systems, *ESP32-S3 Technical Reference Manual*, Espressif Systems, Shanghai, China, 2022. [Online]. Available : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_technical_reference_manual_en.pdf
- [31] —, *ESP32-C3 Series Datasheet*, Espressif Systems, Shanghai, China, 2022. [Online]. Available : https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-c3_datasheet_en.pdf

Chapitre A

Caractéristiques techniques des composants principaux

A.1 Fiche technique capteur MQ-4

TABLE A.1 – Caractéristiques principales du capteur MQ-4

Paramètre	Valeur
Gaz cible principal	Méthane (CH_4), gaz naturel
Plage de détection	300 – 10 000 ppm
Tension d'alimentation	5 V DC
Consommation	≤ 900 mW
Matériau sensible	SnO_2
Temp. de fonctionnement	-20°C à $+50^\circ\text{C}$
Temps de réponse	10 s
Fabricant	Winsen Electronics

A.2 Fiche technique capteur MQ-7

TABLE A.2 – Caractéristiques principales du capteur MQ-7

Paramètre	Valeur
Gaz cible principal	Monoxyde de carbone (CO)
Plage de détection	20 – 2 000 ppm
Tension d'alimentation	5 V DC
Consommation	≤ 900 mW
Matériau sensible	SnO ₂
Temp. de fonctionnement	−20°C à +50°C
Temps de réponse	10 s
Fabricant	Winsen Electronics

A.3 Fiche technique module HLK-PM01

TABLE A.3 – Caractéristiques principales du module d'alimentation HLK-PM01

Paramètre	Valeur
Tension d'entrée	100 – 240 V AC
Tension de sortie	5 V DC
Courant de sortie max	600 mA
Puissance de sortie	3 W
Isolation galvanique	Oui
Rendement	> 70 %
Dimensions	34 × 20 × 15 mm

Chapitre B

Schémas de connexion détaillés

B.1 Brochage ESP32-C3 Super Mini – Nœud secondaire

TABLE B.1 – Connexions ESP32-C3 Super Mini (nœud secondaire)

Broche ESP32-C3	Périphérique	Description
GPIO0 (ADC1_CH0)	MQ-4 (AOUT)	Lecture analogique méthane
GPIO1 (ADC1_CH1)	MQ-7 (AOUT)	Lecture analogique CO
GPIO4	RF émetteur (DATA)	Transmission RF 433 MHz
5V	MQ-4/MQ-7 (VCC)	Alimentation capteurs
GND	Masse générale	Masse commune

Chapitre C

Guide d'utilisation du système Gas Guard Home

C.1 Procédure de démarrage

1. S'assurer que tous les nœuds sont correctement alimentés via les modules HLK.
2. Allumer en premier le **nœud central** et attendre la réception du message de bienvenue sur Telegram (indicateur de connexion Wi-Fi établie).
3. Allumer ensuite les **nœuds secondaires**. Attendre la phase de préchauffage des capteurs (environ 60 secondes).
4. La réception des messages de connexion des capteurs MQ-4 et MQ-7 sur Telegram confirme que le système est opérationnel.
5. La notification "*L'air est propre*" indique que le système est en mode de surveillance continue.

C.2 Interprétation des alertes Telegram

TABLE C.1 – Guide d'interprétation des messages d'alerte Telegram

Message reçu	Niveau	Action recommandée
Alerte gaz niveau 1	Vigilance	Aérer la pièce concernée, éloigner les sources d'ignition
Alerte CO niveau 1	Vigilance	Aérer immédiatement, éloigner les occupants
Niveau critique gaz	Critique	Évacuer, contacter les secours (14)
Niveau critique CO	Critique	Évacuer immédiatement, appeler le 14
Capteur hors ligne	Maintenance	Vérifier l'alimentation du nœud concerné
L'air est propre	Normal	Surveillance continue active

C.3 Procédure de réinitialisation

Après intervention et rétablissement des conditions normales, envoyer la commande `/reset` via le Bot Telegram pour réouvrir l'électrovanne et réinitialiser le système en mode de surveillance.