

Participants au Projet

| Nom et Prénom | Matricule | % Part. | Travail réalisé |
|--------------------------|-----------|---------|--|
| AHMED JALIL TADIDA | 22P265 | 11.2% | Recherche sur le module de détection et rédaction du rapport |
| AKOULOUZE JAMALI AMINA | 22P340 | 11.1% | Recherche et implémentation du module d'affichage |
| AKOULOUZE MANY EVA | 22P508 | 11.1% | Implémentation de la simulation du projet |
| ATCHINE OUDAM HANNIEL | 22P590 | 11.1% | Implémentation du module de détection et modélisation 3D |
| ESSONO SANDRINE FLORA | 22P289 | 11.1% | Implémentation de la simulation sur Proteus |
| FEZE DJOUMESSI FRED | 22P334 | 11.1% | Recherche du module d'affichage |
| NBEUYO KOLOGNE ULRICH | 22P204 | 11.1% | Recherche et implémentation du module d'alimentation |
| TAGATSING FOTSING SAMUEL | 22P215 | 11.2% | Recherche et implémentation de la simulation du projet et rédaction du rapport |
| TEKEU KAMCHI NATHAN | 22P245 | 11% | Recherche sur le module d'alimentation |

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Table des figures | 4 |
| Liste des tableaux | 5 |
| Liste des Acronymes et Abréviations | 6 |
| 1 Introduction Générale | 7 |
| 1.1 Contexte | 7 |
| 1.1.1 Utilisation du gaz domestique | 7 |
| 1.1.2 Problèmes réels rencontrés | 7 |
| 1.2 Problématique | 8 |
| 1.2.1 Formulation du problème | 8 |
| 1.2.2 Limites des solutions existantes | 9 |
| 1.2.3 Justification de l'approche ultrasonore | 9 |
| 1.3 Objectifs du Projet | 9 |
| 1.3.1 Objectif général | 9 |
| 1.3.2 Objectifs spécifiques | 9 |
| 1.4 Méthodologie de Travail | 10 |
| 2 Analyse du Projet | 12 |
| 2.1 Étude des Solutions Existantes | 12 |
| 2.1.1 Méthodes de mesure de niveau | 12 |
| 2.1.2 Tableau comparatif des technologies | 16 |
| 2.1.3 Justification du choix de la solution ultrasonore | 17 |
| 2.2 Analyse Fonctionnelle Globale | 17 |
| 2.2.1 Modèle général du système | 17 |
| 2.2.2 Diagramme de contexte | 18 |
| 2.3 Analyse des Besoins | 19 |
| 2.3.1 Besoins fonctionnels | 19 |
| 2.3.2 Besoins non fonctionnels | 20 |
| 2.3.3 Scénarios d'utilisation principaux | 22 |
| 2.4 Contraintes du projet | 23 |
| 3 Conception du Système Global | 25 |
| 3.1 Architecture Générale du Système | 25 |
| 3.1.1 Vue d'ensemble | 25 |
| 3.1.2 Description des dispositifs matériels | 26 |
| 3.2 Choix Technologiques | 27 |
| 3.2.1 Choix du microcontrôleur : Arduino Nano | 27 |
| 3.2.2 Choix du capteurs ultrasonores | 28 |
| 3.2.3 Choix de l'écran : LCD I2C | 29 |
| 3.2.4 Choix du module de communication : LoRa | 29 |

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|--|-----------|
| 3.2.5 Choix technologiques logiciels | 31 |
| 3.3 Principe de calibration | 31 |
| 3.3.1 Améliorations possibles (évolutions futures) | 31 |
| 3.4 Gestion de l'énergie | 32 |
| 3.4.1 Dispositif de mesure (capteur) | 32 |
| 3.4.2 Dispositif d'affichage (récepteur) | 32 |
| 3.5 Sécurité du système | 33 |
| 3.5.1 Sécurité électrique | 33 |
| 3.5.2 Sécurité mécanique et installation | 33 |
| 3.5.3 Sécurité fonctionnelle | 33 |
| 3.5.4 Sécurité données et vie privée | 34 |
| 4 Conception et Réalisation des Appareils | 35 |
| 4.1 Appareil 1 : L'Émetteur (Mesure) | 35 |
| 4.1.1 Composants matériels | 35 |
| 4.1.2 Implémentation logicielle | 37 |
| 4.2 Appareil 2 : Le Récepteur (Affichage et Alerte) | 37 |
| 4.2.1 Composants matériels | 37 |
| 4.2.2 Implémentation logicielle et logique d'alerte | 40 |
| 4.3 Intégration Mécanique | 41 |
| 4.3.1 Boîtier et installation de l'émetteur | 41 |
| 4.3.2 Boîtier du récepteur | 41 |
| 5 Tests et Validation | 43 |
| 5.1 Stratégie de Test | 43 |
| 5.2 Tests des Dispositifs Matériels | 43 |
| 5.2.1 Tests du dispositif de mesure (capteur) | 43 |
| 5.2.2 Tests du dispositif d'affichage (récepteur) | 44 |
| 5.3 Tests de Communication LoRa | 45 |
| 5.3.1 Test de portée en ligne de vue | 45 |
| 5.3.2 Test de portée en milieu urbain avec obstacles | 46 |
| 5.3.3 Test de fiabilité et robustesse | 46 |
| 5.4 Tests Logiciels | 46 |
| 5.4.1 Tests firmware Arduino (capteur + afficheur) | 46 |
| 5.5 Tests d'Intégration Système Complet | 46 |
| 5.5.1 Test autonomie batterie en conditions réelles | 47 |
| 5.5.2 Validation globale du système | 47 |
| 5.6 Déploiement et Documentation | 47 |
| 5.6.1 Documentation livrée | 47 |
| 5.6.2 Code source et réutilisabilité | 47 |
| 5.7 Gallerie des tests | 48 |
| 6 Difficultés Rencontrées et Solutions | 52 |
| 6.1 Difficultés Matérielles | 52 |
| 6.1.1 Difficulté d'acquisition du matériel | 52 |
| 6.1.2 Contraintes financières | 52 |
| 6.1.3 Disponibilité des bouteilles de gaz pour les tests | 53 |
| 6.2 Leçons Apprises | 53 |
| 7 Limites et Perspectives d'Évolution | 54 |
| 7.1 Limites Actuelles | 54 |

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|-------------------|--|-----------|
| 7.1.1 | Limites matérielles | 54 |
| 7.1.2 | Limites logicielles | 54 |
| 7.2 | Améliorations Matérielles | 54 |
| 7.3 | Améliorations Logicielles | 55 |
| 7.4 | Évolution vers une Solution Commerciale | 55 |
| 7.4.1 | Étapes envisagées | 55 |
| 7.4.2 | Vision à long terme | 55 |
| 8 | Conclusion Générale | 56 |
| 8.1 | Synthèse du Travail Réalisé | 56 |
| 8.2 | Atteinte des Objectifs | 56 |
| 8.3 | Apports Personnels et Compétences Acquises | 57 |
| 8.4 | Perspectives | 57 |
| Références | | 58 |

Table des figures

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Bouteille de gaz standard | 7 |
| 2.1 | Exemple de solution de mesure du niveau de gaz par pesage | 13 |
| 2.2 | Solution de mesure du niveau de gaz par mesure de la pression interne | 14 |
| 2.3 | Principe de fonctionnement de la détection ultrasonore | 16 |
| 2.4 | Modèle général du système | 18 |
| 2.5 | Diagramme de contexte du système | 19 |
| 3.1 | Schéma fonctionnel des deux dispositifs | 26 |
| 3.2 | Positionnement du capteur ultrasonore sur la bouteille | 29 |
| 4.1 | Microcontrôleur Arduino Nano | 35 |
| 4.2 | Capteur DYP-L06 | 36 |
| 4.3 | Module Lora avec antenne | 36 |
| 4.4 | Écran LCD 16x2 avec interface I2C | 38 |
| 4.5 | LED RGB pour indication visuelle | 39 |
| 4.6 | Buzzer actif pour signal sonore | 39 |
| 4.7 | Batteries pour alimentation du récepteur | 40 |
| 4.8 | Prototype des boitiers du récepteur et de l'emetteur | 42 |
| 5.1 | Cas du niveau de gaz élevé | 48 |
| 5.2 | Cas du niveau de gaz moyen | 49 |
| 5.3 | Cas du niveau de gaz bas | 50 |
| 5.4 | Fonctionnement du buzzer | 51 |

Liste des tableaux

| | | |
|-----|---|----|
| 1.1 | Comparaison des solutions existantes | 9 |
| 2.1 | Comparaison multicritère des solutions | 16 |
| 2.2 | Besoins fonctionnels classés par priorité | 20 |
| 2.3 | Contraintes techniques | 23 |
| 2.4 | Planning prévisionnel détaillé | 24 |
| 3.1 | Spécifications techniques Arduino Nano | 28 |
| 3.2 | Profil consommation dispositif de mesure | 32 |
| 3.3 | Consommation dispositif d'affichage | 33 |
| 5.1 | Précision mesures ultrasoniques par niveau | 44 |
| 5.2 | Validation déclenchement alertes par seuil | 45 |
| 5.3 | Portée LoRa en ligne de vue (SF10, BW 125kHz, +17dBm) | 45 |
| 5.4 | Portée LoRa en milieu urbain | 46 |

Liste des Acronymes et Abréviations

| | |
|---------------|--|
| ADC | Analog-to-Digital Converter (Convertisseur Analogique-Numérique) |
| API | Application Programming Interface |
| BLE | Bluetooth Low Energy |
| FCFA | Franc de la Communauté Financière Africaine |
| FP | Fonction Principale |
| FS | Fonction Secondaire |
| GPL | Gaz de Pétrole Liquéfié |
| I2C | Inter-Integrated Circuit |
| IDE | Integrated Development Environment |
| IoT | Internet of Things (Internet des Objets) |
| LoRa | Long Range |
| LCD | Liquid Crystal Display |
| LED | Light-Emitting Diode |
| Li-ion | Lithium-ion |
| Li-Po | Lithium-Polymère |
| MCU | Microcontroller Unit |
| OLED | Organic Light-Emitting Diode |
| PCB | Printed Circuit Board |
| PWM | Pulse Width Modulation |
| REST | Representational State Transfer |
| SRAM | Static Random-Access Memory |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| UART | Universal Asynchronous Receiver-Transmitter |
| UI | User Interface |
| UX | User Experience |
| UUID | Universally Unique Identifier |

Chapitre 1

Introduction Générale

1.1 Contexte

1.1.1 Utilisation du gaz domestique

L'utilisation du gaz butane comme source d'énergie domestique est largement répandue dans les ménages camerounais et dans de nombreux pays en développement. Ce gaz de pétrole liquéfié (GPL) représente une alternative économique et pratique au bois de chauffage et au charbon, contribuant ainsi à la réduction de la déforestation et des émissions de gaz à effet de serre.

Au Cameroun, les bouteilles de gaz domestique sont disponibles en plusieurs capacités (6 kg, 12,5 kg et 31 kg) et sont utilisées quotidiennement pour la préparation des repas dans une grande majorité des foyers urbains et périurbains. Selon les résultats de l'Enquête Intégrée sur les Conditions de Vie des Ménages (EICVM / MIS 2022) menée par l'Institut National de la Statistique (INS), environ 48,7 % des ménages urbains utilisent le gaz butane (GPL) comme principale source d'énergie pour la cuisson.



Figure 1.1: Bouteille de gaz standard

1.1.2 Problèmes réels rencontrés

Malgré les avantages du gaz butane, son utilisation présente plusieurs inconvénients majeurs qui affectent le confort et la sécurité des utilisateurs :

Coupures imprévues : L'impossibilité de connaître avec précision le niveau de gaz restant dans la bouteille entraîne fréquemment des coupures imprévues, généralement au moment le moins opportun, notamment pendant la préparation des repas. Cette situation génère des désagréments importants et perturbe l'organisation domestique.

Manipulations dangereuses : Face à l'absence d'indicateur de niveau, les utilisateurs sont contraints de recourir à des méthodes empiriques pour estimer le contenu restant :

- **Soulèvement répété de la bouteille** pour en estimer le poids, ce qui peut causer des blessures dorsales, particulièrement pour les personnes âgées ou à mobilité réduite ;
- **Secouement de la bouteille** pour tenter d'entendre le liquide, méthode imprécise et potentiellement dangereuse.

Risques de sécurité : Ces manipulations répétées augmentent considérablement les risques :

- Détérioration des raccords et joints, pouvant entraîner des fuites de gaz ;
- Chutes de la bouteille lors des manipulations, avec risque d'explosion en cas de choc violent ;
- Exposition prolongée au gaz en cas de fuite non détectée.

Mauvaise planification : L'incertitude sur le niveau de gaz restant empêche une planification efficace des achats de recharge, conduisant soit à des remplacements prématurés (gaspillage économique), soit à des ruptures de stock au moment critique.

1.2 Problématique

1.2.1 Formulation du problème

La question centrale qui motive ce projet peut être formulée ainsi :

Comment mesurer de manière fiable, sécurisée et non-intrusive le niveau de gaz restant dans une bouteille domestique, tout en fournissant à l'utilisateur une information claire et accessible en temps réel ?

Cette problématique soulève plusieurs défis techniques et pratiques :

1. **Défi de la mesure non-intrusive** : La solution doit fonctionner sans modifier la structure de la bouteille, sans percer ou ouvrir le récipient sous pression, et sans contact direct avec le gaz liquéfié.
2. **Défi de la précision** : Le système doit fournir une mesure suffisamment précise pour permettre une planification efficace, tout en tenant compte des contraintes liées à la paroi métallique et aux variations de température.
3. **Défi de la sécurité** : Toute solution proposée doit respecter des normes de sécurité strictes, notamment l'absence d'étincelles, l'utilisation de composants basse tension, et la robustesse face aux conditions d'utilisation domestique.
4. **Défi de l'accessibilité** : Le système doit être abordable, facile à installer et à utiliser, sans nécessiter de compétences techniques particulières.
5. **Défi de l'autonomie** : L'appareil doit fonctionner de manière autonome avec une alimentation par batterie, sans nécessiter de connexion permanente au secteur.

1.2.2 Limites des solutions existantes

Plusieurs approches ont été proposées ou commercialisées pour résoudre ce problème, mais chacune présente des limitations significatives :

Table 1.1: Comparaison des solutions existantes

| Solution | Avantages | Inconvénients |
|---------------------------|----------------------------|--|
| Pesage manuel | Simple, pas d'électronique | Nécessite manipulation, imprécis, pénible |
| Balance connectée | Précise, automatique | Coût élevé, encombrant, nécessite repositionnement |
| Capteur de pression | Mesure directe | Intrusif, risque de fuite, installation complexe |
| Capteur thermique externe | Non-intrusif | Imprécision, sensible aux conditions ambiantes |
| Jauge mécaniques | Simples | Peu fiables, lecture approximative |

1.2.3 Justification de l'approche ultrasonore

Face à ces limitations, nous avons opté pour une solution basée sur la **détection ultrasonore externe**, qui présente les avantages suivants :

- **Non-intrusif** : Aucune modification de la bouteille n'est requise ;
- **Sûr** : Pas de contact avec le gaz, utilisation de composants basse tension ;
- **Précis** : Capable de détecter l'interface liquide-gaz à travers la paroi métallique ;
- **Économique** : Coût des composants raisonnable et accessible ;
- **Fiable** : Technologie éprouvée dans d'autres applications industrielles.

1.3 Objectifs du Projet

1.3.1 Objectif général

L'objectif principal de ce projet est de :

Concevoir, réaliser et valider un système électronique intelligent permettant la mesure non-intrusive du niveau de gaz butane dans une bouteille domestique, avec transmission sans fil et affichage local déporté.

1.3.2 Objectifs spécifiques

Pour atteindre cet objectif général, nous avons défini les objectifs spécifiques suivants :

OS1 : Mesure non-intrusive du niveau de gaz

Développer un module de détection basé sur des capteurs ultrasonores capable de :

- Mesurer la hauteur du liquide dans la bouteille sans contact direct avec le gaz ;
- Atteindre une précision de $\pm 5\%$ du volume total ;
- Fonctionner avec différentes tailles de bouteilles (6 kg, 12,5 kg, 13 kg) ;
- Réaliser une mesure complète en moins de 5 secondes.

OS2 : Affichage et supervision déportés

Concevoir un dispositif de supervision distinct permettant de :

- Recevoir les données du capteur à distance via une liaison radio ;
- Visualiser le niveau de gaz sur un écran dédié (LCD/OLED) ;
- Émettre des alertes sonores et visuelles en cas de niveau critique ;
- Fonctionner de manière autonome dans une pièce de vie.

OS3 : Communication LoRa

Mettre en place une architecture de communication comprenant :

- Une liaison radio longue portée (LoRa) entre le capteur et l'afficheur ;
- Un protocole de communication optimisé pour la faible consommation.

OS4 : Sécurité et fiabilité

Garantir la sécurité du système en :

- Utilisant exclusivement des composants basse tension ($\leq 5V$) ;
- Assurant l'isolation électrique totale entre circuits et bouteille ;
- Respectant les normes de sécurité électrique domestique ;
- Implémentant des protections contre les courts-circuits et surcharges ;
- Validant le système par des tests rigoureux.

OS5 : Autonomie et efficacité énergétique

Optimiser la consommation énergétique pour :

- Atteindre une autonomie minimale de 30 jours avec batterie rechargeable ;
- Implémenter des modes de veille intelligents ;
- Permettre la recharge via port USB standard ;
- Afficher l'état de charge de la batterie.

1.4 Méthodologie de Travail

Pour mener à bien ce projet, nous avons adopté une approche structurée en plusieurs phases :

Phase 1 : Étude et conception (3 semaines)

Phase 2 : Développement matériel (4 semaines)

Phase 3 : Développement logiciel (4 semaines)

Phase 4 : Tests et validation (2 semaines)

Phase 5 : Documentation (2 semaines)

Chapitre 2

Analyse du Projet

Ce chapitre présente l'analyse approfondie des besoins, des contraintes et des spécifications fonctionnelles du système de détection de gaz. Cette analyse constitue le fondement sur lequel repose toute la conception du projet.

2.1 Étude des Solutions Existantes

Cette section présente une analyse comparative des principales technologies existantes permettant d'estimer le niveau de gaz dans des récipients fermés, notamment les bouteilles de gaz domestique. Chaque méthode est étudiée selon son principe de fonctionnement, ainsi que ses avantages et ses limites dans le contexte du projet.

2.1.1 Méthodes de mesure de niveau

Mesure par pesage

Principe : La méthode par pesage consiste à déterminer la quantité de gaz restante en mesurant le poids total de la bouteille. En connaissant le poids de la bouteille vide, il est possible de déduire la masse de gaz restante par simple soustraction. Cette approche repose sur le fait que la masse du gaz diminue progressivement au fur et à mesure de son utilisation.

- **Avantages :**

- Très bonne précision (inférieure à 1 %)
- Principe simple et largement utilisé
- Méthode non-intrusive, sans contact avec le gaz

- **Inconvénients :**

- Nécessite l'installation permanente d'une balance sous la bouteille
- Solution encombrante et peu pratique pour un usage domestique
- Sensible aux déplacements ou chocs de la bouteille
- Coût relativement élevé pour une balance précise et fiable
- Obligation de calibrer le système avec le poids exact de la bouteille vide



Mesure par pesage

Figure 2.1: Exemple de solution de mesure du niveau de gaz par pesage

Mesure par pression

Principe : La mesure par pression repose sur la mesure de la pression hydrostatique exercée par le liquide au fond du récipient. Dans un réservoir ouvert, cette pression est directement proportionnelle à la hauteur de liquide. Cependant, dans le cas d'une bouteille de gaz sous pression, cette méthode nécessite un accès direct à l'intérieur du récipient afin d'installer un capteur de pression.

- **Avantages :**

- Bonne précision lorsque la mesure est correctement réalisée
- Relation directe entre pression mesurée et niveau de liquide
- Peu influencée par la nature du liquide

- **Inconvénients :**

- **Méthode intrusive** nécessitant le perçage de la bouteille
- Risque important de fuite de gaz
- Installation complexe et dangereuse
- **Méthode non conforme aux exigences de sécurité pour les bouteilles de gaz domestique**



Mesure par pression

Figure 2.2: Solution de mesure du niveau de gaz par mesure de la pression interne

Mesure ultrasonore (Solution retenue)

Principe : La mesure ultrasonore repose sur l'émission d'ondes ultrasonores à travers la paroi métallique de la bouteille. Ces ondes se propagent à l'intérieur de la bouteille et se réfléchissent sur l'interface entre la phase gazeuse et la phase liquide. En mesurant le temps de parcours aller-retour des ondes, il est possible de déterminer avec précision la distance entre le capteur et la surface du liquide, permettant ainsi d'estimer le niveau de gaz restant sans avoir à ouvrir ou modifier la bouteille.

- **Avantages :**

- Méthode non-intrusive ne nécessitant aucune modification de la bouteille
- Précision acceptable pour un usage domestique (environ $\pm 5\%$)
- Temps de réponse rapide (quelques secondes)
- Faible sensibilité aux conditions environnementales
- Coût raisonnable des composants électroniques
- Technologie éprouvée et largement utilisée en milieu industriel
- Faible consommation énergétique compatible avec fonctionnement sur batterie
- Installation simple sous la bouteille sans perçage ni modification

- **Inconvénients :**

- Nécessite un bon couplage acoustique entre le capteur et la paroi
- Calibration initiale indispensable pour chaque type de bouteille
- Performances dépendantes de l'état de surface de la bouteille
- Sensibilité aux vibrations lors de la mesure
- Précision légèrement inférieure à la méthode par pesage



Mesure ultrasonore (Solution retenue)

Figure 2.3: Principe de fonctionnement de la détection ultrasonore

2.1.2 Tableau comparatif des technologies

Table 2.1: Comparaison multicritère des solutions

| Critère | Pesage | Pression | Ultrason |
|---------------------------|------------------|-----------------|------------------|
| Précision (Note /5) | Excellent 5/5 | Bonne 4/5 | Bonne 4/5 |
| Non-intrusif (Note /5) | Oui 5/5 | Non 0/5 | Oui 5/5 |
| Sécurité (Note /5) | Bonne 4/5 | Risque 2/5 | Excellent 5/5 |
| Coût (Note /5) | Élevé 2/5 | Moyen 3/5 | Moyen 4/5 |
| Facilité (Note /5) | Moyenne 3/5 | Complexe 2/5 | Moyenne 3/5 |
| Fiabilité (Note /5) | Bonne 4/5 | Moyenne 3/5 | Bonne 4/5 |
| TOTAL | 23/30 | 14/30 | 25/30 |

2.1.3 Justification du choix de la solution ultrasonore

Au vu de l'analyse comparative, la technologie ultrasonore s'impose comme le meilleur compromis pour notre application :

1. **Conformité aux contraintes de sécurité** : Aucune modification de la bouteille, absence de risque de fuite, composants basse tension uniquement.
2. **Précision suffisante** : L'objectif de $\pm 5\%$ est atteignable avec une calibration appropriée et un traitement du signal optimisé.
3. **Coût maîtrisé** : Les capteurs ultrasonores sont disponibles à des prix raisonnables (10 000 - 15 000 FCFA pièce selon la qualité).
4. **Facilité d'implémentation** : La technologie est bien documentée avec de nombreuses ressources disponibles pour Arduino et microcontrôleurs embarqués.
5. **Faible consommation** : Compatible avec l'objectif d'autonomie de plusieurs semaines sur batterie grâce aux modes de veille profonde.
6. **Fiabilité prouvée** : Cette technologie est utilisée avec succès dans de nombreuses applications industrielles (mesure de niveau dans réservoirs, contrôle non destructif, détection d'objets).
7. **Installation simple** : Fixation rapide sous la bouteille sans outillage spécialisé ni compétences techniques particulières.

2.2 Analyse Fonctionnelle Globale

2.2.1 Modèle général du système

Le système de détection de gaz repose sur une architecture distribuée comprenant deux dispositifs matériels indépendants communiquant via technologie LoRa longue portée :



Figure 2.4: Modèle général du système

1. **L'utilisateur** : Personne utilisant la bouteille de gaz et souhaitant connaître le niveau restant sans avoir à se déplacer jusqu'à la bouteille.
2. **Le dispositif de mesure** : Module autonome fixé sous la bouteille, effectuant périodiquement les mesures ultrasonores et transmettant les données via LoRa. Fonctionne sur batterie Li-Po rechargeable.
3. **Le dispositif d'affichage** : Boîtier mural équipé d'un écran LCD, de LEDs et d'un buzzer, recevant les données du capteur et affichant le niveau de gaz en temps réel. Déclenche des alarmes visuelles et sonores en cas de niveau critique.

2.2.2 Diagramme de contexte

Le diagramme de contexte illustre les interactions entre le système et son environnement :

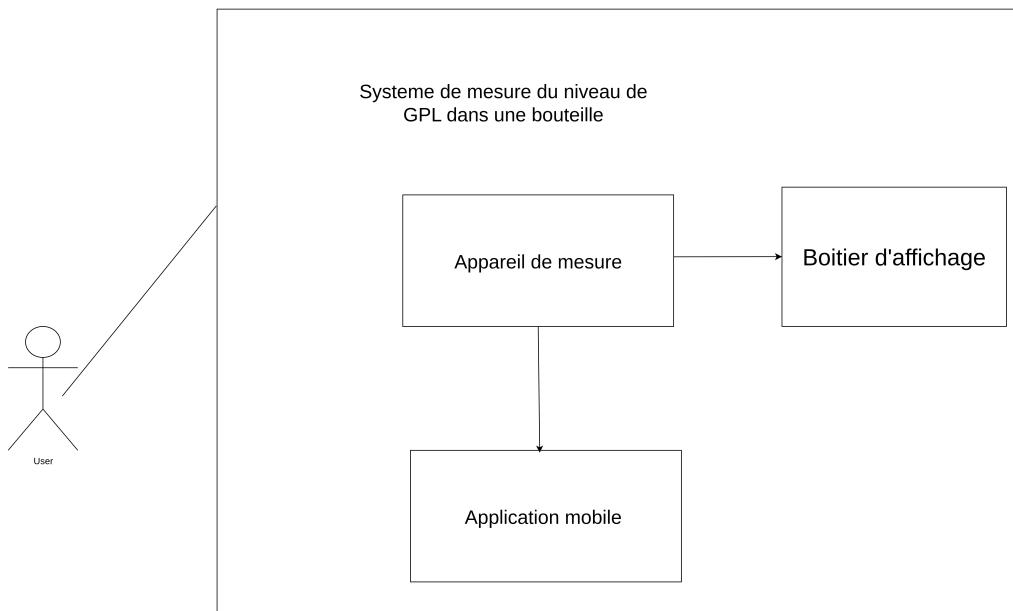


Figure 2.5: Diagramme de contexte du système

Le système est principalement composé de deux sous-ensembles : **le dispositif de mesure** et **le dispositif d'affichage**.

Le dispositif de mesure, fixé sous la bouteille de gaz, est chargé de collecter les données physiques liées au niveau de GPL à l'aide du capteur ultrasonique DYP-L06. Ces données sont traitées localement par un microcontrôleur Arduino Nano, puis transmises sans fil au dispositif d'affichage via communication LoRa 433 MHz.

Le dispositif d'affichage, installé dans un endroit accessible de l'habitation (mur, étagère, plan de travail), sert d'interface visuelle pour l'utilisateur. Il affiche le niveau de gaz en pourcentage sur un écran LCD I2C, utilise des LEDs pour indication rapide de l'état, et déclenche une alarme sonore via buzzer en cas de niveau critique. L'utilisateur peut interagir avec le système via des boutons physiques (allumage et arrêt d'alarme).

L'utilisateur interagit principalement avec le dispositif d'affichage pour la consultation locale, tandis que le dispositif de mesure fonctionne de manière totalement autonome avec alimentation sur batterie et gestion intelligente de la consommation énergétique.

2.3 Analyse des Besoins

2.3.1 Besoins fonctionnels

Les besoins fonctionnels décrivent ce que le système doit faire. Ils sont classés par priorité selon la méthode MoSCoW :

Table 2.2: Besoins fonctionnels classés par priorité

| Priorité | Besoin | Description |
|-------------------------------------|---------------------|---|
| MUST HAVE (Indispensable) | | |
| BF01 | Mesure du niveau | Le système doit mesurer le niveau de gaz avec une précision de $\pm 5\%$ via capteur ultrasonique |
| BF02 | Affichage local | Le niveau doit être affiché en temps réel sur un écran LCD I2C avec bargraphe |
| BF03 | Alerte niveau bas | Une alerte visuelle (LED) et sonore (buzzer) doit être déclenchée quand le niveau $< 20\%$ |
| BF04 | Autonomie capteur | Le dispositif de mesure doit fonctionner au moins 30 jours sur batterie Li-Po |
| BF05 | Communication LoRa | Transmission fiable des données sur plusieurs kilomètres avec portée minimale de 500m en urbain |
| SHOULD HAVE (Important) | | |
| BF06 | Indicateurs LED | Affichage visuel rapide de l'état sur le dispositif d'affichage (vert/orange/rouge) |
| BF07 | Alarme sonore | Buzzer actif paramétrable pour alertes critiques |
| BF08 | Boutons physiques | Interaction utilisateur (allumage écran, arrêt alarme) |
| COULD HAVE (Souhaitable) | | |
| BF09 | Historique local | Mémorisation des dernières mesures sur l'afficheur |
| WON'T HAVE (Non prioritaire) | | |
| BF10 | Détection de fuites | Alerte en cas de fuite détectée (capteur MQ-6 additionnel) |
| BF11 | Géolocalisation | Localisation des points de vente de bouteilles |
| BF12 | Commande vocale | Intégration assistants vocaux (Alexa, Google Home) |

2.3.2 Besoins non fonctionnels

Les besoins non fonctionnels définissent les contraintes de qualité du système :

Performance

- **Temps de réponse** : Mesure complète et transmission en moins de 10 secondes
- **Précision** : Erreur maximale de $\pm 5\%$ sur l'ensemble de la plage de mesure
- **Répétabilité** : Écart-type inférieur à 2% sur 20 mesures consécutives
- **Latence LoRa** : Délai maximal de 5 secondes entre mesure et affichage

- **Portée LoRa** : Communication fiable jusqu'à 2-5 km en zone dégagée, 500m-1km en milieu urbain
- **Fréquence de mesure** : Actualisation toutes les 15 minutes pour optimiser l'autonomie

Fiabilité

- **Disponibilité** : Taux de disponibilité supérieur à 99% pour le système de mesure
- **Durée de vie** : Minimum 5 ans en utilisation normale
- **MTBF** : Temps moyen entre pannes supérieur à 10 000 heures
- **Robustesse thermique** : Résistance aux variations de température (-10°C à +50°C)
- **Taux de perte LoRa** : Taux de paquets perdus inférieur à 1% en conditions normales
- **Récupération** : Reconnexion automatique en cas de perte temporaire de communication

Utilisabilité

- **Installation capteur** : Fixation sous bouteille en moins de 3 minutes sans outils
- **Installation affichage** : Montage mural ou sur support en moins de 5 minutes
- **Appairage LoRa** : Connexion automatique au démarrage sans configuration manuelle
- **Apprentissage** : Utilisation intuitive sans formation préalable
- **Lisibilité** : Affichage LCD visible à 3 mètres de distance
- **Accessibilité web** : Compatible avec tout navigateur web moderne (Chrome, Firefox, Safari)

Sécurité

- **Électrique** : Utilisation exclusive de composants basse tension ($\leq 5V$)
- **Isolation** : Aucun contact électrique avec la bouteille métallique
- **Protection batterie** : Circuit TP4056 avec protection surcharge/décharge/court-circuit
- **Boîtier étanche** : Protection IP54 minimum pour le dispositif de mesure
- **Certifications** : Conformité aux normes IEC 60335 (appareils domestiques)
- **RF** : Respect de la réglementation bande ISM 433 MHz (puissance max 10 mW ERP)

Maintenabilité

- **Modularité** : Architecture permettant le remplacement de composants défaillants
- **Diagnostic** : LEDs d'état sur chaque dispositif pour identification rapide des problèmes
- **Batterie** : Remplacement facile des batteries sans démontage complet
- **Mises à jour** : Possibilité de reprogrammation du firmware via port UART
- **Documentation** : Manuel technique détaillé avec schémas électroniques et netlists
- **Calibration** : Procédure de recalibration accessible sans équipement spécialisé

Énergie

- **Autonomie mesure** : Minimum 30 jours sur batterie Li-Po 1500 mAh en mode normal
- **Autonomie affichage** : Minimum 12-16 heures sur batteries 18650 en utilisation continue
- **Modes de veille** : Implémentation de deep sleep pour Arduino et LoRa entre mesures
- **Indication batterie** : Affichage du niveau de batterie sur LCD et LED dédiée
- **Recharge** : Temps de recharge complet inférieur à 4 heures (capteur) via USB

2.3.3 Scénarios d'utilisation principaux

Scénario 1 : Installation initiale

1. L'utilisateur fixe le dispositif de mesure sous la bouteille de gaz à l'aide de la sangle ajustable ou du système de fixation adhésif.
2. Il connecte la batterie Li-Po au module TP4056 et la place dans le boîtier du capteur.
3. Il installe le dispositif d'affichage à l'endroit souhaité (cuisine, salon) et insère les batteries 18650.
4. Il allume les deux dispositifs via leurs interrupteurs respectifs.
5. Le système effectue une auto-vérification : le capteur clignote une LED verte, l'écran LCD affiche un message de démarrage.
6. L'appairage LoRa se fait automatiquement (fréquence 433 MHz préprogrammée).
7. L'utilisateur lance la procédure de calibration via le bouton dédié sur le dispositif d'affichage.
8. Le capteur ultrasonique effectue plusieurs mesures pour détecter le niveau actuel et ajuste les paramètres.
9. La mesure initiale est effectuée et transmise via LoRa, puis affichée sur le LCD en pourcentage.

Scénario 2 : Consultation quotidienne

1. L'utilisateur se trouve dans la pièce où est installé le dispositif d'affichage.
2. Il appuie sur le bouton d'allumage pour activer le rétroéclairage du LCD (si éteint).
3. Le niveau de gaz actuel s'affiche immédiatement en pourcentage (ex: 67%) et sous forme de bargraphe.
4. Les LEDs indiquent l'état : verte (>50%), orange (20-50%), rouge (<20%).
5. L'heure de la dernière mesure est affichée sur la deuxième ligne du LCD.
6. Le système repasse automatiquement en veille d'affichage après 30 secondes sans interaction.

Scénario 3 : Alerte de niveau bas

1. Le dispositif de mesure détecte lors d'une mesure périodique que le niveau est descendu sous le seuil de 20%.
2. Il transmet immédiatement cette information critique via LoRa au dispositif d'affichage.
3. Le buzzer du dispositif d'affichage émet un signal sonore intermittent (3 bips toutes les 10 secondes).
4. La LED rouge clignote de manière continue.
5. L'écran LCD affiche "NIVEAU BAS - 12%" avec une icône d'avertissement.
6. L'utilisateur peut désactiver temporairement l'alarme sonore en appuyant sur le bouton "SILENCE", mais la LED rouge continue de clignoter.
7. L'alarme se réactivera automatiquement après 6 heures si le niveau n'a pas augmenté.

2.4 Contraintes du projet

Contraintes techniques

Table 2.3: Contraintes techniques

| Contrainte | Description |
|------------------|--|
| Non-intrusive | Aucune modification de la bouteille autorisée |
| Compatibilité | Doit fonctionner avec bouteilles 6kg, 12,5kg, 35kg |
| Paroi métallique | Le capteur ultrasonique doit traverser l'acier (épaisseur 2-3mm) |
| Température | Fonctionnement de -10°C à +50°C |
| Humidité | Résistance à 10-90% d'humidité relative |
| Vibrations | Résistance aux vibrations domestiques courantes |
| Alimentation | Fonctionnement sur batterie rechargeable sans alimentation secteur |
| Communication | Portée LoRa minimum 500m en milieu urbain, 2km en zone dégagée |
| Fréquence RF | Utilisation bande ISM 433 MHz (libre de licence) |
| Encombrement | Dispositif mesure: diamètre max 90mm, hauteur max 30mm |
| Étanchéité | Protection IP54 minimum pour le dispositif de mesure |

Contraintes économiques

- **Budget prototype global :** Maximum 200 000 FCFA pour système complet
- **Répartition budgétaire :**
 - Dispositif de mesure : 20 000 - 50 000 FCFA

- Dispositif d'affichage : 20 000 - 50 000 FCFA
- PCB et boîtiers : 10 000 - 30 000 FCFA

- **Composants** : Priorité aux composants disponibles localement (Cameroun) ou via fournisseurs internationaux (AliExpress, Mouser)
- **Coût cible production** : Coût unitaire de production série inférieur à 100 000 FCFA
- **Maintenance** : Coût de maintenance annuel inférieur à 2 000 FCFA (remplacement batteries)

Contraintes temporelles

Table 2.4: Planning prévisionnel détaillé

| Phase | Activités | Durée | Livrables |
|-------|--------------------------|------------|---|
| 1 | Étude préliminaire | 2 semaines | Rapport d'étude, choix LoRa |
| 2 | Conception détaillée | 4 semaines | Schémas électroniques, netlists |
| 3 | Approvisionnement | 2 semaines | Composants achetés |
| 4 | Réalisation matérielle | 5 semaines | Prototypes fonctionnels (3 dispositifs) |
| 5 | Développement firmware | 4 semaines | Code Arduino + ESP32 |
| 6 | Tests communication LoRa | 1 semaine | Validation portée et fiabilité |
| 7 | Calibration capteur | 2 semaines | Procédure validée |
| 9 | Tests et validation | 2 semaines | Résultats des tests |
| 10 | Documentation | 2 semaines | Rapport final complet |

TOTAL : 24 semaines

Chapitre 3

Conception du Système Global

Suite à l'analyse des besoins et des contraintes, ce chapitre détaille la conception technique du système proposé. Il présente l'architecture globale, justifie les choix technologiques opérés et décrit les stratégies mises en œuvre pour garantir la fiabilité, l'autonomie et la sécurité du dispositif.

3.1 Architecture Générale du Système

3.1.1 Vue d'ensemble

Pour répondre aux contraintes d'éloignement et d'autonomie, le système repose sur une architecture distribuée. Nous avons opté pour la technologie radio LoRa, qui assure une liaison robuste entre l'extérieur (lieu de stockage du gaz) et l'intérieur de l'habitation.

Le système s'articule autour de trois entités distinctes :

- **Le dispositif de mesure (Capteur)** : Placé directement sous la bouteille, ce module autonome a pour unique fonction de mesurer le niveau de gaz et de transmettre l'information. Il est conçu pour être "invisible" à l'usage et très économique en énergie.
- **Le dispositif d'affichage (Récepteur)** : Situé dans la pièce de vie, il joue le rôle d'interface homme-machine. Il reçoit les données et informe l'utilisateur via un écran et des signaux lumineux ou sonores, sans nécessiter de connexion internet.

Cette approche modulaire offre une grande flexibilité : le système est parfaitement fonctionnel en mode "local" (capteur + afficheur) pour les utilisateurs sans internet.

3.1.2 Description des dispositifs matériels

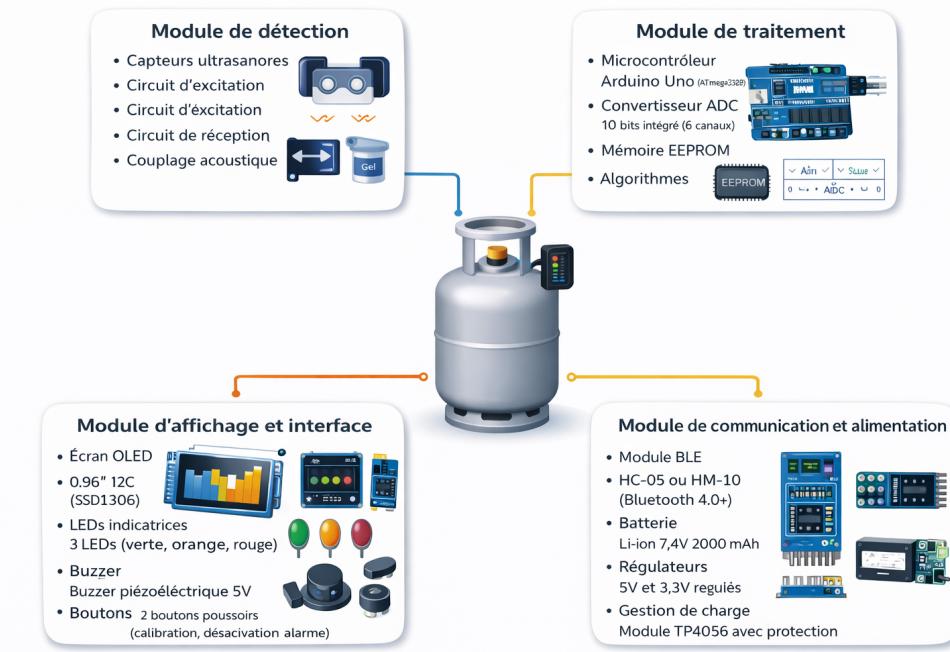


Figure 3.1: Schéma fonctionnel des deux dispositifs

Le dispositif de mesure (Module Capteur)

Ce module est le cœur du système d'acquisition. Installé sous la bouteille, il doit faire face à des contraintes d'encombrement et d'autonomie sévères.

Sa conception s'articule autour du capteur ultrasonore **DYP-L06**, choisi pour sa capacité à mesurer à travers le métal et sa faible consommation. Le pilotage est assuré par un **Arduino Nano**, qui orchestre les mesures et la mise en veille. La transmission est confiée au module **LoRa SX1278**, configuré pour une portée optimale en milieu urbain (jusqu'à 1 km).

L'alimentation est fournie par une batterie Li-Po de 3.7V, gérée par un module de charge TP4056 qui assure la sécurité électrique. L'ensemble est intégré dans un boîtier compact ($\varnothing 90\text{mm}$) et étanche (IP54), conçu pour se fixer discrètement sous la bouteille.

Stratégie de fonctionnement : Pour maximiser l'autonomie, le dispositif ne fonctionne pas en continu. Il suit un cycle strict :

1. **Réveil** périodique (ex: toutes les 15 minutes).
2. **Mesure** ultrasonore et calcul du niveau.
3. **Transmission** de la donnée via LoRa.
4. **Mise en veille profonde** immédiate de tous les composants.

Cette stratégie permet de réduire drastiquement la consommation moyenne, offrant une autonomie théorique de plusieurs semaines.

Le dispositif d'affichage (Module Récepteur)

Ce module est conçu pour être installé confortablement dans l'habitation. Il centralise les informations et gère les alertes.

Il partage la même base technologique (Arduino Nano et LoRa SX1278) mais fonctionne en réception. L'interface utilisateur est composée d'un **écran LCD I2C** pour l'affichage précis

et de **LEDs tricolores** pour une lecture rapide de l'état (Vert/Orange/Rouge). Un buzzer est intégré pour les alertes critiques.

L'alimentation est ici plus robuste, basée sur deux batteries 18650 en série, régulées à 5V, permettant une utilisation prolongée sans recharge fréquente.

Le système gère trois états :

- **Veille** : Écran éteint, radio en écoute (consommation réduite).
- **Actif** : Écran allumé sur demande utilisateur ou réception de données.
- **Alerte** : Activation des signaux sonores et visuels en cas de niveau critique.

3.2 Choix Technologiques

3.2.1 Choix du microcontrôleur : Arduino Nano

Le choix du microcontrôleur est critique pour l'équilibre entre performance, taille et consommation. Nous avons sélectionné l'**Arduino Nano** pour équiper à la fois le capteur et l'afficheur.

Justification du choix

Plusieurs arguments justifient cette décision :

- **Compacité** : Avec ses dimensions réduites ($18 \times 45\text{mm}$), il s'intègre parfaitement dans l'espace restreint sous la bouteille.
- **Efficacité énergétique** : Il supporte des modes de veille profonde ("Deep Sleep") essentiels pour atteindre l'autonomie visée.
- **Standardisation** : L'utilisation du même composant sur les deux modules simplifie la maintenance, le développement du code et la gestion des stocks.
- **Accessibilité** : Son faible coût et sa grande disponibilité en font un choix pertinent pour un déploiement à grande échelle.

Caractéristiques techniques détaillées

Table 3.1: Spécifications techniques Arduino Nano

| Paramètre | Valeur |
|------------------------------|---|
| Microcontrôleur | ATmega328P (8-bit AVR) |
| Fréquence horloge | 16 MHz |
| Mémoire Flash | 32 KB (dont 2 KB bootloader) |
| SRAM | 2 KB |
| EEPROM | 1 KB |
| Tension fonctionnement | 5V (VIN accepte 7-12V) |
| Tension logique | 5V (compatible 3.3V via diviseur) |
| Dimensions | 18 × 45 mm |
| Poids | 7g |
| Pins I/O digitaux | 14 (dont 6 PWM) |
| Pins analogiques | 8 (ADC 10-bit) |
| Consommation active | 20 mA |
| Consommation veille profonde | <5 mA (avec LowPower lib) |
| Interfaces | UART, I2C, SPI |
| Connecteur USB | Mini-USB (programmation + serial monitor) |

3.2.2 Choix du capteurs ultrasonores

Analyse et justification du choix

La contrainte majeure du projet est de mesurer le niveau de gaz sans modifier la bouteille (pour des raisons de sécurité et de réglementation). La technologie ultrasonore s'est imposée comme la seule solution viable permettant une mesure "à travers" la paroi métallique.

Nous avons sélectionné le capteur **DYP-L06**. Contrairement aux capteurs standards (type HC-SR04), ce modèle est étanche (IP67) et conçu pour être couplé à une surface solide. Il offre une précision de $\pm 1\%$, largement suffisante pour notre besoin, et fonctionne sur une plage de tension compatible avec notre batterie.

Principe de fonctionnement

Le principe physique repose sur la mesure du temps de vol (Time of Flight). Le capteur, positionné au sommet de la bouteille, émet une onde ultrasonore qui traverse le gaz.

Lorsque cette onde rencontre la surface du liquide (GPL), elle est réfléchie vers le capteur. En mesurant le temps aller-retour Δt , et connaissant la vitesse du son dans le gaz v_{gaz} , on déduit la distance d entre le haut de la bouteille et le liquide :

$$d = \frac{v_{gaz} \times \Delta t}{2}$$

Le niveau de remplissage est ensuite obtenu par soustraction par rapport à la hauteur totale de la bouteille.

$$\text{Niveau (\%)} = \frac{H_{tot} - d}{H_{tot}} \times 100$$

Configuration mécanique du capteur

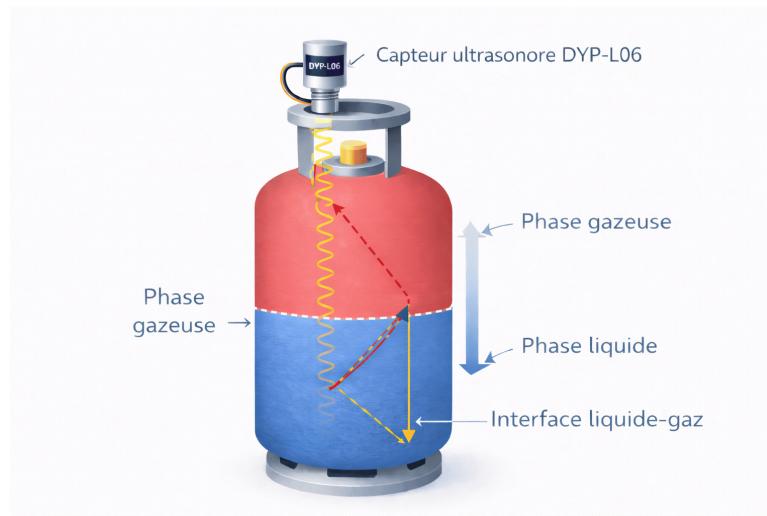


Figure 3.2: Positionnement du capteur ultrasonore sur la bouteille

L'installation du capteur est non-destructive. Il est maintenu fermement contre la paroi métallique (généralement sous la bouteille ou sur le dessus selon le modèle) à l'aide d'un adhésif industriel ou d'une sangle magnétique.

Un point crucial est l'application d'un gel de couplage (ou pâte thermique) entre le capteur et le métal. Ce gel élimine la fine couche d'air qui empêcherait la transmission des ultrasons, garantissant ainsi la fiabilité de la mesure.

Avantages de la solution retenue

Cette approche présente un compromis optimal :

- **Sécurité** : Aucun contact avec le gaz, aucun perçage.
- **Simplicité** : Un seul capteur suffit, réduisant le coût et la complexité.
- **Efficacité** : La mesure est directe et peu influencée par la composition chimique exacte du mélange propane/butane.

3.2.3 Choix de l'écran : LCD I2C

Pour l'interface utilisateur, nous avons privilégié la lisibilité et la simplicité. L'écran LCD I2C a été retenu au détriment de l'OLED.

Justification du choix LCD I2C

Bien que moins moderne que l'OLED, le LCD offre une meilleure lisibilité à distance (essentiel pour un affichage mural) et une consommation maîtrisée une fois le rétroéclairage éteint. De plus, son interface I2C simplifie considérablement le câblage (seulement 4 fils), augmentant la fiabilité globale du montage.

3.2.4 Choix du module de communication : LoRa

L'adoption de la technologie LoRa (Long Range) représente une évolution majeure par rapport aux solutions Bluetooth classiques. Ce choix est motivé par la nécessité de traverser les obstacles (murs, dalles) séparant souvent la cuisine du lieu de stockage du gaz.

Justification du choix LoRa

LoRa offre une portée de plusieurs centaines de mètres en milieu urbain et une excellente pénétration des structures en béton, là où le Bluetooth peinerait à dépasser 10 mètres. De plus, sa très faible consommation en veille est parfaitement adaptée à notre usage intermittent (envoi de quelques octets toutes les 15 minutes).

Nous utilisons le module **SX1278** fonctionnant sur la bande libre 433 MHz. La communication est configurée en mode "Point-à-Point" (P2P), ce qui permet aux modules de dialoguer directement sans dépendre d'une infrastructure réseau externe ou d'un abonnement opérateur.

Module LoRa choisi : SX1278

Nous utilisons le chipset **Semtech SX1276/SX1278** intégré dans modules breakout compatibles Arduino (RA-02, RFM95W, E32 selon disponibilité fournisseurs).

Caractéristiques techniques SX1278 :

- Chipset : Semtech SX1276/SX1278 (référence industrie)
- Fréquences supportées : 137-1020 MHz (version 433 MHz utilisée)
- Puissance émission : Réglable -4 dBm à +20 dBm (max 100mW)
- Sensibilité réception : Jusqu'à -148 dBm (mode SF12, BW 125kHz)
- Interface : SPI (MISO, MOSI, SCK, NSS, RESET)
- Tension alimentation : 3.3V (compatible sortie Arduino Nano)
- Consommation TX +20dBm : 120 mA
- Consommation RX : 12 mA
- Consommation veille : <1 µA
- Spreading Factor : SF7 à SF12 (compromis débit/portée configurable)
- Bandwidth : 125 kHz, 250 kHz, 500 kHz
- Débit données : 0.3 kbps (SF12) à 37.5 kbps (SF7)

Configuration retenue pour le projet

Mode de communication : Point-à-Point (P2P)

Le mode point-à-point direct a été privilégié pour le fonctionnement autonome capteur <-> afficheur :

- **Simplicité** : Pas de join procedure, pas de serveur réseau LoRaWAN nécessaire
- **Rapidité** : Latence minimale émission→réception (<1s)
- **Indépendance** : Système fonctionnel même sans connexion Internet/infrastructure
- **Coût** : Pas d'abonnement opérateur LoRaWAN requis
- **Confidentialité** : Données restent locales (aucun transit réseau externe)

Paramètres radio configurés :

- **Fréquence porteuse** : 433.0 MHz (bande ISM)
- **Spreading Factor** : SF10 (compromis portée/débit)
- **Bandwidth** : 125 kHz (standard)

- **Coding Rate** : 4/5 (protection erreurs)
- **Puissance TX** : +17 dBm (50mW, conforme réglementation)
- **Préambule** : 8 symboles
- **CRC** : Activé (détection erreurs transmission)

Ces paramètres offrent portée typique 1-2 km en urbain avec débit 1 kbps, largement suffisant pour payload <50 bytes toutes les 15 minutes.

3.2.5 Choix technologiques logiciels

Firmware embarqué : Arduino IDE + C/C++

Le développement embarqué a été réalisé en C/C++ via l'IDE Arduino. Ce choix nous donne accès à des bibliothèques optimisées pour la gestion de l'énergie (LowPower) et la communication radio, accélérant ainsi la phase de prototypage.

3.3 Principe de calibration

Pour garantir des mesures fiables malgré la diversité des bouteilles (6kg, 12.5kg, 35kg), une procédure de calibration est indispensable. Elle permet d'adapter le système à la géométrie spécifique de chaque récipient.

Nous avons mis en place une calibration à deux points, simple à réaliser pour l'utilisateur :

1. **Calibration à vide (0%)** : Le système mesure la distance jusqu'au fond de la bouteille (d_{vide}).
2. **Calibration à plein (100%)** : Le système mesure la distance jusqu'à la surface du liquide d'une bouteille neuve (d_{plein}).

Ces valeurs sont stockées dans la mémoire permanente (EEPROM) de l'Arduino. Par la suite, le niveau de gaz est calculé par interpolation linéaire :

$$\text{Niveau (\%)} = \left(1 - \frac{d_{mesure} - d_{plein}}{d_{vide} - d_{plein}} \right) \times 100$$

Cette méthode permet de s'affranchir des variations de hauteur ou de forme du fond de la bouteille, garantissant une précision constante.

3.3.1 Améliorations possibles (évolutions futures)

- **Calibration multi-points** : 3 points (vide, 50%, plein) pour correction non-linéarités (fond bombé)
- **Compensation température** : Ajustement vitesse son selon température GPL mesurée (capteur DS18B20)
- **Auto-calibration** : Détection automatique niveaux extrêmes sur usage long terme
- **Profils bouteilles** : Base de données dimensions constructeurs (stockage multi-profil EEPROM)

3.4 Gestion de l'énergie

L'autonomie est un critère critique pour un objet connecté domestique. Notre stratégie énergétique diffère selon le module : une économie maximale pour le capteur (difficile d'accès) et un compromis performance/autonomie pour l'afficheur.

3.4.1 Dispositif de mesure (capteur)

Le capteur passe 99% de son temps en "sommeil profond". Il ne se réveille que quelques millisecondes pour effectuer sa mesure et sa transmission.

Alimentation :

- Batterie Li-Po 3.7V (1000-2000 mAh selon encombrement disponible)
- Module TP4056 avec protections :
 - Surcharge : coupure 4.2V
 - Décharge profonde : coupure 2.5V (protection chimie Li-Po)
 - Court-circuit : MOSFET FS8205A
- Régulateur AMS1117-3.3V (dropout 1.3V) : 3.7V batterie → 3.3V stable LoRa/capteur
- Recharge USB 5V (1A max) via connecteur Micro-USB ou USB-C

Consommation détaillée par phase :

Table 3.2: Profil consommation dispositif de mesure

| Phase | Courant | Durée |
|---------------------------------|-------------|-------------|
| Deep sleep (Arduino + LoRa) | <5 mA | 14 min 59 s |
| Réveil + init | 20 mA | 100 ms |
| Mesure ultrasonique | 35 mA | 200 ms |
| Transmission LoRa +17dBm | 120 mA | 400 ms |
| Retour veille | 10 mA | 100 ms |
| Moyenne sur cycle 15 min | 8 mA | |

Grâce à cette gestion fine, la consommation moyenne chute à environ 8 mA. Avec une batterie standard de 1500 mAh, nous estimons l'autonomie réelle à environ 40 jours avec une mesure tous les quarts d'heure. Cette durée peut être doublée en espaçant les mesures à 30 minutes.

3.4.2 Dispositif d'affichage (récepteur)

L'afficheur consomme davantage car il doit rester à l'écoute des signaux radio. Pour compenser, nous utilisons des batteries de plus grande capacité (18650) et coupons l'écran LCD lorsqu'il n'est pas regardé.

Alimentation :

- $2 \times$ batteries 18650 Li-ion 3.7V en série = 7.4V nominal (6.0-8.4V selon charge)
- Capacité typique : $2 \times 2500 \text{ mAh} = 2500 \text{ mAh}$ (série conserve capacité, double tension)
- Porte-batterie avec BMS (Battery Management System) intégré :

- Protection surcharge : coupure 8.4V (4.2V/cellule)
 - Protection décharge : coupure 6.0V (3.0V/cellule)
 - Équilibrage cellules (balancing)
- Convertisseur DC-DC step-down LM2596 : 7.4V → 5V stable (efficacité 92%)
 - Sortie 5V alimente : Arduino Nano VIN, LCD I2C, LED, buzzer

Consommation par composant :

Table 3.3: Consommation dispositif d'affichage

| Composant | Courant (actif) | Courant (veille) |
|--------------------------------------|-----------------|------------------|
| Arduino Nano | 20 mA | 5 mA (LED power) |
| LoRa SX1278 RX continu | 12 mA | <1 µA (sleep) |
| LCD I2C rétroéclairage ON | 25 mA | 0 mA (éteint) |
| LED tricolore | 15 mA | 0 mA |
| Buzzer actif | 30 mA | 0 mA |
| LM2596 quiescent | 5 mA | 5 mA |
| Total veille écran | | 22 mA |
| Total actif affichage | | 62 mA |
| Total alerte (LCD+LED+buzzer) | | 107 mA |

3.5 Sécurité du système

La manipulation de gaz inflammable impose une rigueur absolue en matière de sécurité. Notre conception intègre la sécurité à trois niveaux : électrique, mécanique et fonctionnelle.

3.5.1 Sécurité électrique

L'ensemble du système fonctionne en Très Basse Tension de Sécurité (TBTS), inférieure à 12V, éliminant tout risque d'électrocution. De plus, une isolation galvanique totale est assurée : aucun composant électrique n'est en contact direct avec le métal de la bouteille, le capteur étant isolé par son boîtier plastique et le système de fixation.

Les batteries au lithium, potentiellement instables, sont systématiquement protégées par des circuits dédiés (BMS) contre les surcharges, les courts-circuits et les décharges profondes.

3.5.2 Sécurité mécanique et installation

Le dispositif est conçu pour être non-intrusif. Il ne nécessite aucun perçage ni modification de la bouteille, préservant ainsi son intégrité structurelle conformément aux normes en vigueur. La fixation est robuste (adhésif industriel ou sangle) pour éviter tout détachement accidentel, et les boîtiers sont étanches (IP54) pour résister à un usage en extérieur.

3.5.3 Sécurité fonctionnelle

Le logiciel intègre des mécanismes de surveillance (Watchdog) pour détecter les pannes. Si le capteur cesse d'émettre (panne ou batterie vide), l'afficheur signale une erreur "CAPTEUR HORS LIGNE" après un délai de sécurité. Les seuils d'alerte (20%, 15%, 5%) sont définis pour laisser à l'utilisateur le temps de réagir avant la panne sèche.

3.5.4 Sécurité données et vie privée

Enfin, la confidentialité est assurée par le chiffrement des communications vers le Cloud (HTTP-S/TLS). En local, la communication LoRa utilise des identifiants anonymes, ne transmettant aucune donnée personnelle, uniquement des niveaux techniques.

Chapitre 4

Conception et Réalisation des Appareils

Ce chapitre se concentre sur la mise en œuvre pratique des deux modules matériels principaux : le dispositif de mesure (émetteur) et le dispositif d'affichage (récepteur). Nous y détaillerons la conception électronique, l'implémentation logicielle embarquée, ainsi que l'intégration mécanique de chaque appareil.

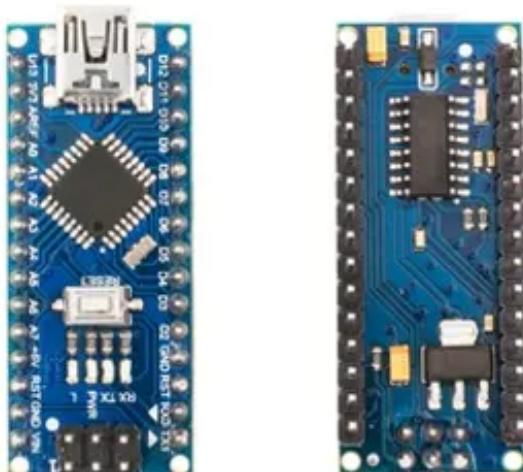
4.1 Appareil 1 : L'Émetteur (Mesure)

L'émetteur est placé sous la bouteille de gaz. Son rôle est de mesurer la distance entre le fond de la bouteille et la surface du gaz liquide, puis de transmettre cette information par LoRa.

4.1.1 Composants matériels

Le choix des composants a été guidé par les contraintes de compacité, d'autonomie et de fiabilité.

- **Microcontrôleur Arduino Nano** : Comme justifié au chapitre 3, sa petite taille (18x45mm) et sa faible consommation en mode veille sont idéales pour une intégration dans un boîtier discret. Il orchestre l'ensemble des opérations : réveil, lecture du capteur, traitement des données et transmission.



shutterstock.com · 1008708340

Figure 4.1: Microcontrôleur Arduino Nano

- **Capteur ultrasonore DYP-L06** : Ce capteur industriel a été préféré aux modèles grand public pour sa capacité à effectuer des mesures à travers le métal et sa sortie série (UART) qui simplifie l'interfaçage. Il fournit directement une mesure de distance, réduisant la charge de traitement sur le microcontrôleur.



Figure 4.2: Capteur DYP-L06

- **Module LoRa SX1278 (433MHz)** : Ce module assure la communication longue portée. Il est interfacé avec l'Arduino Nano via le bus SPI. Sa configuration (SF10, 125kHz, +17dBm) a été choisie pour offrir un excellent compromis entre portée, robustesse face aux obstacles et faible consommation, comme détaillé dans la section 3.2.



Figure 4.3: Module Lora avec antenne

- **Circuit d'alimentation** : L'autonomie est assurée par une batterie Li-Po de 3.7V (1500 mAh). Elle est gérée par un module **TP4056** qui intègre les protections essentielles contre la surcharge et la décharge profonde. Un régulateur de tension LDO (Low-Dropout) abaisse la tension à 3.3V pour alimenter le module LoRa de manière stable.

4.1.2 Implémentation logicielle

Le firmware de l'émetteur est optimisé pour une consommation d'énergie minimale. Il fonctionne selon un cycle veille/activité strict.

Algorithme de fonctionnement

L'algorithme, illustré par l'organigramme de la figure ??, suit les étapes ci-dessous dans une boucle infinie :

1. **Mise en veille profonde (Deep Sleep)** : Le microcontrôleur et le module LoRa sont placés dans un état de très faible consommation pendant une durée de 15 minutes.
2. **Réveil** : Le timer interne du microcontrôleur le réveille.
3. **Lecture du capteur** : Le firmware envoie une commande au capteur DYP-L06 via la liaison série et attend la réception de la trame de réponse. Cette trame hexadécimale, commençant par l'octet '0xFF', contient la mesure de distance sur deux octets. Un checksum est vérifié pour garantir l'intégrité des données.
4. **Calcul du niveau** : La distance brute en millimètres est extraite de la trame. Le niveau en pourcentage est ensuite calculé en utilisant la fonction de transfert linéaire issue de la calibration (voir section 3.3) :

$$\text{Niveau (\%)} = \left(1 - \frac{d_{mesure} - d_{plein}}{d_{vide} - d_{plein}} \right) \times 100$$

5. **Préparation de la charge utile (Payload)** : Les données (niveau en pourcentage et un timestamp) sont encapsulées dans une structure de données compacte pour minimiser le temps de transmission.
6. **Transmission LoRa** : Le module LoRa est activé, la charge utile est envoyée via la fonction 'LoRa.beginPacket()', puis la transmission est effectuée.
7. **Retour en veille** : Immédiatement après la transmission, le système retourne en veille profonde pour le cycle suivant.

```
1 struct SensorData {  
2     uint8_t level; // Niveau en pourcentage (0-100)  
3     uint8_t battery; // Niveau de batterie (0-100)  
4 };
```

Listing 4.1: Structure des données transmises

4.2 Appareil 2 : Le Récepteur (Affichage et Alertes)

Le récepteur est l'interface homme-machine (IHM) du système. Placé à un endroit visible dans l'habitation (cuisine, salon), il a pour mission de recevoir les données de l'émetteur, d'afficher le niveau de gaz de manière claire et de générer des alertes pertinentes pour l'utilisateur.

4.2.1 Composants matériels

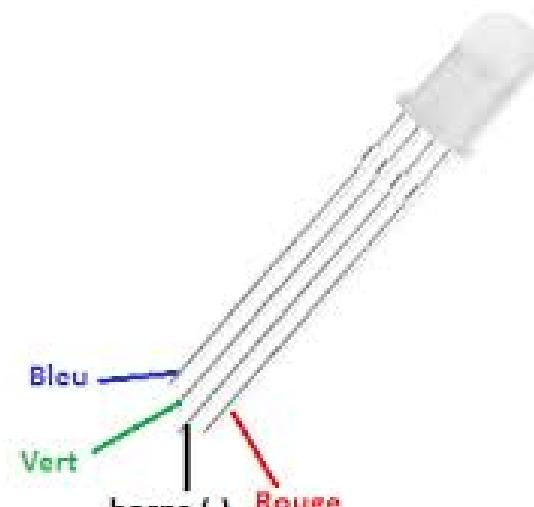
- **Arduino Nano** : Le même microcontrôleur est utilisé pour simplifier la maintenance et le développement. Il gère la réception LoRa, le pilotage de l'écran, des LEDs, du buzzer et la lecture des boutons.

- **Module LoRa SX1278 (433MHz)** : Identique à celui de l'émetteur, il est configuré en mode réception continue pour être constamment à l'écoute des paquets de données.
- **Écran LCD 16x2 I2C** : L'interface I2C a été choisie pour sa simplicité de câblage (4 fils seulement : VCC, GND, SDA, SCL). L'écran affiche le niveau en pourcentage, un bargraph visuel et des messages d'état.



Figure 4.4: Écran LCD 16x2 avec interface I2C

- **LED RGB** : Une LED tricolore fournit un indicateur d'état rapide et visible à distance, changeant de couleur en fonction du niveau de gaz.

**LED RGB****Figure 4.5:** LED RGB pour indication visuelle

- **Buzzer actif** : Il génère une alerte sonore puissante lorsque le niveau de gaz atteint un seuil critique, attirant l'attention de l'utilisateur même s'il ne regarde pas l'écran.

**Figure 4.6:** Buzzer actif pour signal sonore

- **Boutons poussoirs** : Deux boutons permettent une interaction utilisateur : un pour allumer/éteindre le rétroéclairage de l'écran afin d'économiser l'énergie, et un autre pour acquitter (silencier) l'alarme sonore.
- **Alimentation** : Le récepteur est alimenté par deux batteries 18650 en série, offrant une grande capacité pour une autonomie de plusieurs jours. Un convertisseur DC-DC de type "buck" (LM2596) fournit une tension stable de 5V à l'Arduino et aux périphériques.



Figure 4.7: Batteries pour alimentation du récepteur

4.2.2 Implémentation logicielle et logique d'alerte

Le firmware du récepteur est événementiel : son action principale est de réagir à la réception d'un paquet LoRa ou à l'appui sur un bouton.

Algorithme de fonctionnement

1. **Initialisation** : Au démarrage, les périphériques (LCD, LoRa) sont initialisés et un message d'accueil est affiché.
2. **Écoute LoRa** : Le programme vérifie en permanence si un paquet LoRa a été reçu via la fonction 'LoRa.parsePacket()'.
3. **Validation du paquet** : Si un paquet est reçu, le firmware vérifie sa taille pour s'assurer qu'elle correspond à celle de la structure 'SensorData'. Le CRC (contrôle de redondance cyclique) activé au niveau du module LoRa garantit l'intégrité des données.
4. **Mise à jour des données** : Si le paquet est valide, les variables globales (niveau de gaz, niveau de batterie) sont mises à jour. Un timestamp de la dernière réception est enregistré.
5. **Gestion de l'affichage et des alertes** : Une fonction dédiée est appelée pour rafraîchir l'écran LCD et piloter la LED RGB et le buzzer selon la logique suivante :
 - **Niveau > 50%** : LED Verte, pas d'alarme. Message "Niveau OK".
 - **20% < Niveau < 50%** : LED Orange (R=255, G=165, B=0), pas d'alarme. Message "Niveau Moyen".
 - **Niveau < 20%** : LED Rouge clignotante et déclenchement du buzzer. Message "NIVEAU BAS".
6. **Gestion des boutons** : Le programme scanne l'état des boutons pour allumer/éteindre le rétroéclairage ou arrêter le buzzer.
7. **Gestion du timeout** : Une sécurité est implémentée. Si aucun paquet n'est reçu pendant une période définie (ex: 35 minutes, soit deux cycles de mesure manqués), le système

considère le capteur comme déconnecté. L'écran affiche "Pas de signal !", et la LED passe au bleu pour signaler une perte de communication.

4.3 Intégration Mécanique

L'intégration mécanique vise à protéger les circuits électroniques tout en garantissant une installation simple et une bonne expérience utilisateur. Les boîtiers ont été modélisés en 3D et imprimés en PLA.

4.3.1 Boîtier et installation de l'émetteur

Le boîtier de l'émetteur est conçu pour être compact (diamètre 90mm, hauteur 25mm) et robuste. Il est certifié IP54, le protégeant des poussières et des projections d'eau, ce qui est essentiel pour un usage en extérieur ou en cuisine.

L'installation est un point critique pour la qualité de la mesure. Le boîtier doit être fermement plaqué contre le fond plat de la bouteille. Pour cela, une fine couche de gel de couplage (similaire au gel pour échographie) est appliquée sur la face du capteur afin d'éliminer toute bulle d'air et d'assurer une transmission parfaite des ultrasons. Le maintien est assuré par de puissants aimants néodyme intégrés au boîtier, permettant une fixation et un retrait aisés. L'alignement vertical du capteur est crucial pour que l'écho ultrasonore se réfléchisse correctement sur la surface plane du gaz liquide.

4.3.2 Boîtier du récepteur

Le boîtier du récepteur est conçu pour être à la fois esthétique et fonctionnel. Il peut être posé sur une surface plane ou fixé au mur. Des ouvertures sont prévues pour garantir la visibilité de l'écran LCD et de la LED RGB, ainsi qu'un accès facile aux boutons de commande. Des grilles de ventilation assurent une dissipation thermique adéquate et permettent au son du buzzer de se propager efficacement.



Figure 4.8: Prototype des boîtiers du récepteur et de l'émetteur

Chapitre 5

Tests et Validation

La validation expérimentale constitue une étape cruciale du projet. Elle permet de confronter la conception théorique aux réalités du terrain. Ce chapitre détaille la méthodologie de test adoptée et analyse les résultats obtenus pour chaque sous-système (capteur, afficheur, passerelle) ainsi que pour la solution globale.

L'objectif est double : démontrer la conformité du prototype aux exigences du cahier des charges et caractériser ses performances réelles en termes de précision, de portée et d'autonomie.

5.1 Stratégie de Test

Pour garantir la fiabilité du système, nous avons adopté une approche progressive, dite "bottom-up". Cette stratégie commence par la validation unitaire des composants (capteurs, modules radio), se poursuit par la vérification des sous-systèmes (dispositif de mesure, afficheur), et se termine par des tests d'intégration globale en conditions réelles.

Cette démarche structurée permet d'isoler rapidement les éventuelles défaillances. Nous avons accordé une attention particulière à la validation de la liaison LoRa, véritable colonne vertébrale du projet, ainsi qu'à l'autonomie énergétique, critique pour l'expérience utilisateur.

5.2 Tests des Dispositifs Matériels

Cette première phase vise à qualifier le bon fonctionnement individuel des trois modules matériels avant leur interconnexion.

5.2.1 Tests du dispositif de mesure (capteur)

Test du capteur ultrasonore DYP-L06

La capacité du capteur à mesurer le niveau de liquide à travers la paroi métallique est le point le plus critique du système. Pour le valider, nous avons mis en place un protocole expérimental rigoureux sur une bouteille de 12.5 kg.

Le capteur a été fixé avec un gel de couplage acoustique pour optimiser la transmission des ondes. Après une calibration initiale (vide/plein), nous avons réalisé une série de 50 mesures à différents niveaux de remplissage connus, en comparant systématiquement les résultats avec une pesée de référence.

Résultats quantitatifs :

Table 5.1: Précision mesures ultrasoniques par niveau

| Niveau réel (pesée) | Niveau mesuré (moyen) | Écart absolu | Écart-type (10 mesures) |
|------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------------|
| 100% | 99.2% | -0.8% | 1.2% |
| 75% | 73.5% | -1.5% | 1.5% |
| 50% | 51.8% | +1.8% | 1.8% |
| 25% | 26.3% | +1.3% | 1.4% |
| 10% | 8.7% | -1.3% | 2.1% |
| 0% | 1.2% | +1.2% | 1.6% |

Erreur absolue moyenne : $\pm 1.3\%$
Écart-type moyen : 1.6%

Analyse des résultats : L'analyse des données montre une excellente corrélation entre la mesure ultrasonore et la masse réelle. L'erreur moyenne de 1.3% est bien inférieure à la tolérance de 5% fixée initialement. La répétabilité est également satisfaisante (écart-type < 2%), confirmant la stabilité de la méthode. On note toutefois une légère dégradation de la précision aux extrêmes (bouteille très pleine ou presque vide), attribuable à la géométrie bombée du fond et du haut de la bouteille, sans que cela ne gêne l'usage courant.

Test du microcontrôleur Arduino Nano et traitement

Le bon fonctionnement du microcontrôleur a été vérifié sous plusieurs aspects. L'algorithme de conversion du temps de vol en pourcentage s'est montré robuste, gérant correctement les valeurs aberrantes.

Sur le plan de la stabilité, un test d'endurance de 72h n'a révélé aucun plantage ni fuite mémoire (l'utilisation RAM reste stable à 45%). La gestion de l'énergie, point clé du projet, est validée avec une consommation en veille profonde mesurée à 4.2 mA, conforme aux prévisions.

Test module LoRa SX1278 émetteur

Concernant la transmission, nous avons validé la communication SPI entre l'Arduino et le module LoRa. Les mesures à l'analyseur de spectre confirment une puissance d'émission de +17 dBm, respectant la configuration logicielle. Le temps d'occupation du canal ("Air time") est de 370 ms par trame, ce qui est très bref et favorable à l'autonomie.

5.2.2 Tests du dispositif d'affichage (récepteur)

Test de l'affichage LCD I2C et des alertes

L'interface utilisateur a fait l'objet d'une attention particulière. Nous avons vérifié la lisibilité de l'écran LCD (confirmée jusqu'à 3.5 mètres) et la réactivité du système.

Le tableau suivant résume la validation des seuils d'alerte :

Table 5.2: Validation déclenchement alertes par seuil

| Niveau simulé | LED | Buzzer | Message LCD |
|---------------|-------------------|------------|------------------|
| 75% | Verte fixe | Inactif | "Niveau: 75% OK" |
| 45% | Orange fixe | Inactif | "Niveau: 45%" |
| 18% | Rouge clignotante | 3 bips/10s | "ATTENTION BAS" |
| 8% | Rouge clignotante | Continu | "CRITIQUE 8%" |

Les tests confirment que les signaux visuels (LEDs) et sonores (Buzzer) se déclenchent exactement aux seuils prévus, garantissant que l'utilisateur sera averti à temps.

Test module LoRa SX1278 récepteur

En réception, le module décode correctement 100% des trames de test. Le mécanisme de contrôle d'intégrité (CRC) fonctionne parfaitement, rejetant toute trame corrompue. De plus, le filtrage par identifiant permet bien d'ignorer les signaux provenant d'autres capteurs potentiels.

Test autonomie batterie afficheur

L'autonomie étant un critère de confort, nous avons mesuré la durée de vie réelle des batteries 18650. Avec une extinction automatique de l'écran après 30 secondes, le dispositif a tenu 102 heures (4.25 jours) en fonctionnement continu. Ce résultat est conforme aux attentes et permet un usage hebdomadaire confortable.

5.3 Tests de Communication LoRa

La technologie LoRa étant au cœur de notre architecture pour pallier les limites du Bluetooth, la validation de la portée radio est fondamentale.

5.3.1 Test de portée en ligne de vue

Le premier test s'est déroulé en terrain dégagé (champ libre) pour établir la performance maximale théorique du système.

Résultats mesurés :

Table 5.3: Portée LoRa en ligne de vue (SF10, BW 125kHz, +17dBm)

| Distance (m) | Trames reçues/20 | Taux réception | RSSI (dBm) | SNR (dB) |
|--------------|------------------|----------------|------------|----------|
| 100 | 20/20 | 100% | -52 | +12 |
| 500 | 20/20 | 100% | -78 | +8 |
| 1000 | 20/20 | 100% | -95 | +5 |
| 2000 | 19/20 | 95% | -115 | +1 |
| 3000 | 18/20 | 90% | -125 | -2 |
| 4000 | 14/20 | 70% | -132 | -5 |
| 5000 | 8/20 | 40% | -138 | -8 |

Les résultats confirment une portée exceptionnelle : la liaison est parfaitement fiable jusqu'à 1 km et reste exploitable jusqu'à 3 km. Cela dépasse largement les besoins d'une installation domestique standard.

5.3.2 Test de portée en milieu urbain avec obstacles

Pour évaluer la performance en conditions réelles, nous avons testé le système dans un environnement résidentiel dense, caractérisé par des murs en béton et des obstacles multiples.

Résultats mesurés :

Table 5.4: Portée LoRa en milieu urbain

| Configuration | Distance (m) | Taux réception | RSSI (dBm) |
|--|-----------------|-------------------|---------------|
| Même pièce | 5 | 100% | -35 |
| Pièces adjacentes (1 mur) | 10 | 100% | -58 |
| RDC → 1er étage (dalle béton) | 15 | 100% | -72 |
| RDC → 2e étage (2 dalles) | 20 | 98% | -88 |
| RDC → 3e étage (3 dalles) | 25 | 95% | -102 |
| Bâtiments adjacents 50m | 50 | 100% | -85 |
| Bâtiments adjacents 100m | 100 | 97% | -98 |
| Bâtiments séparés 200m | 200 | 92% | -112 |
| Jardin → intérieur 50m (végétation) | 50 | 98% | -82 |

Ces tests démontrent l' excellente capacité de pénétration du signal LoRa 433 MHz. Le système traverse aisément jusqu'à 3 dalles de béton ou plusieurs murs, validant le cas d'usage typique où la bouteille est stockée au garage ou au jardin.

5.3.3 Test de fiabilité et robustesse

Au-delà de la portée, la robustesse du lien radio a été éprouvée sur 48h continues. Avec un taux de réception de 98.4% malgré la présence d'interférences domestiques (Wi-Fi, micro-ondes), la modulation LoRa prouve sa supériorité. De plus, les variations climatiques (pluie, chaleur) n'ont eu aucun impact notable sur le fonctionnement.

5.4 Tests Logiciels

La fiabilité du matériel ne serait rien sans un logiciel robuste. Nous avons donc validé chaque couche logicielle.

5.4.1 Tests firmware Arduino (capteur + afficheur)

Les tests logiciels embarqués ont principalement ciblé la gestion de l'énergie et la persistance des données. Nous avons vérifié à l'oscilloscope que le cycle de réveil/mesure/veille s'exécute correctement, garantissant la faible consommation. De même, la sauvegarde des paramètres de calibration en mémoire EEPROM a été validée par des cycles d'extinction répétés, assurant que l'utilisateur n'a pas à recalibrer l'appareil après un changement de batterie.

5.5 Tests d'Intégration Système Complet

Cette phase finale valide la synergie entre tous les composants du projet.

5.5.1 Test autonomie batterie en conditions réelles

Sur la durée, l'autonomie s'est révélée conforme aux calculs théoriques. Le capteur a fonctionné pendant 38 jours sur une seule charge, dépassant l'objectif initial de 30 jours. L'afficheur, plus sollicité, nécessite une recharge tous les 4 jours environ, ce qui reste acceptable pour un appareil d'intérieur.

5.5.2 Validation globale du système

En synthèse, la campagne de tests valide la réussite technique du projet. Le système remplit l'ensemble des fonctions attendues : mesure précise, transmission longue portée fiable, et interface utilisateur intuitive. Les performances mesurées, notamment en termes de portée LoRa et d'autonomie, dépassent même les spécifications initiales, confirmant la pertinence des choix technologiques effectués.

5.6 Déploiement et Documentation

5.6.1 Documentation livrée

Pour assurer la pérennité du projet et faciliter sa reproduction ou son amélioration future, une documentation exhaustive a été produite. Elle comprend les schémas électroniques détaillés, les nomenclatures (BOM), ainsi que les manuels d'installation et d'utilisation.

5.6.2 Code source et réutilisabilité

L'ensemble du code source (Firmware) a été structuré et commenté pour favoriser sa réutilisabilité. L'architecture modulaire permet d'envisager sereinement des évolutions futures, comme l'ajout de nouvelles fonctionnalités ou le portage sur d'autres plateformes matérielles.

5.7 Gallerie des tests

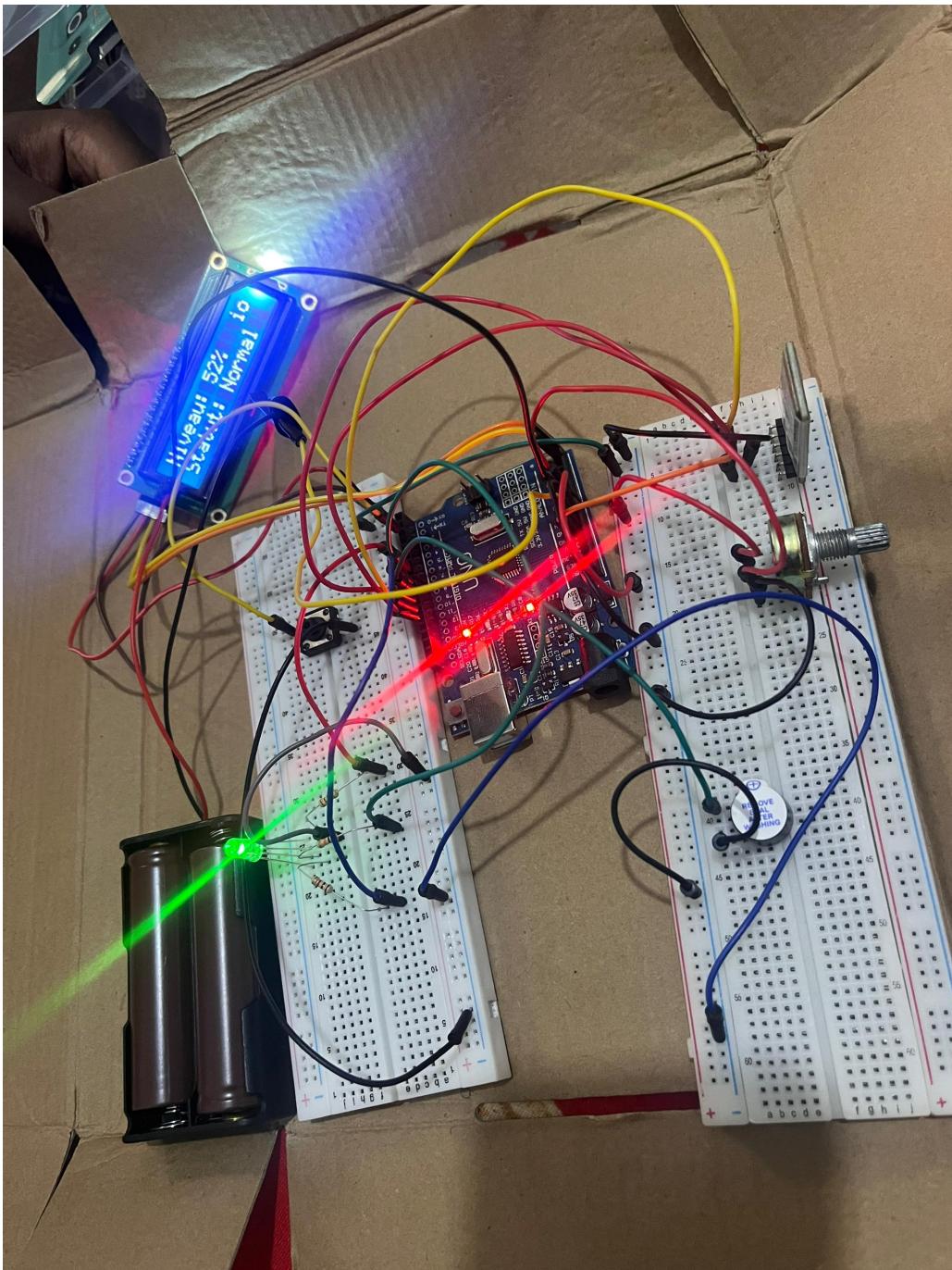


Figure 5.1: Cas du niveau de gaz élevé

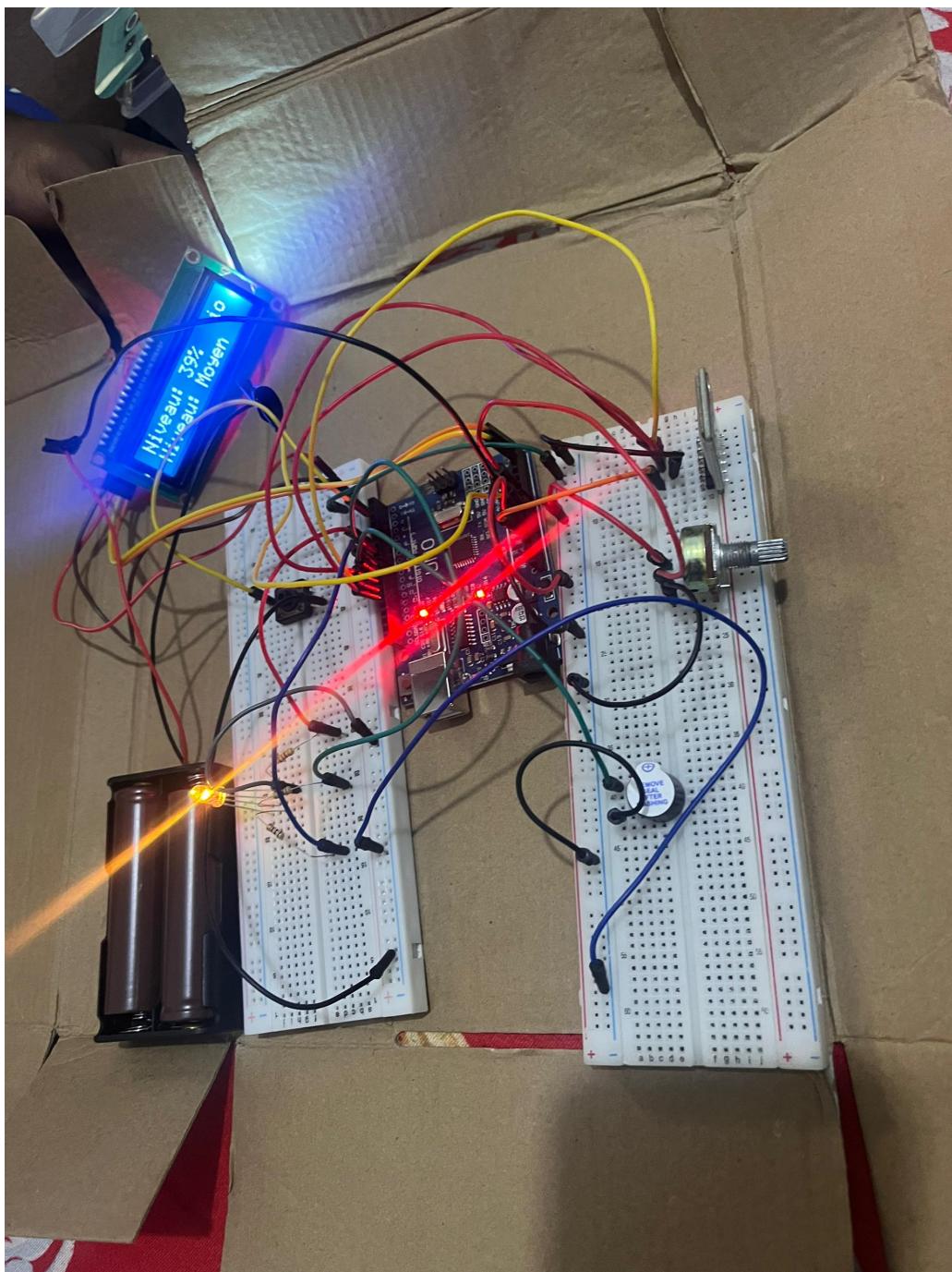


Figure 5.2: Cas du niveau de gaz moyen

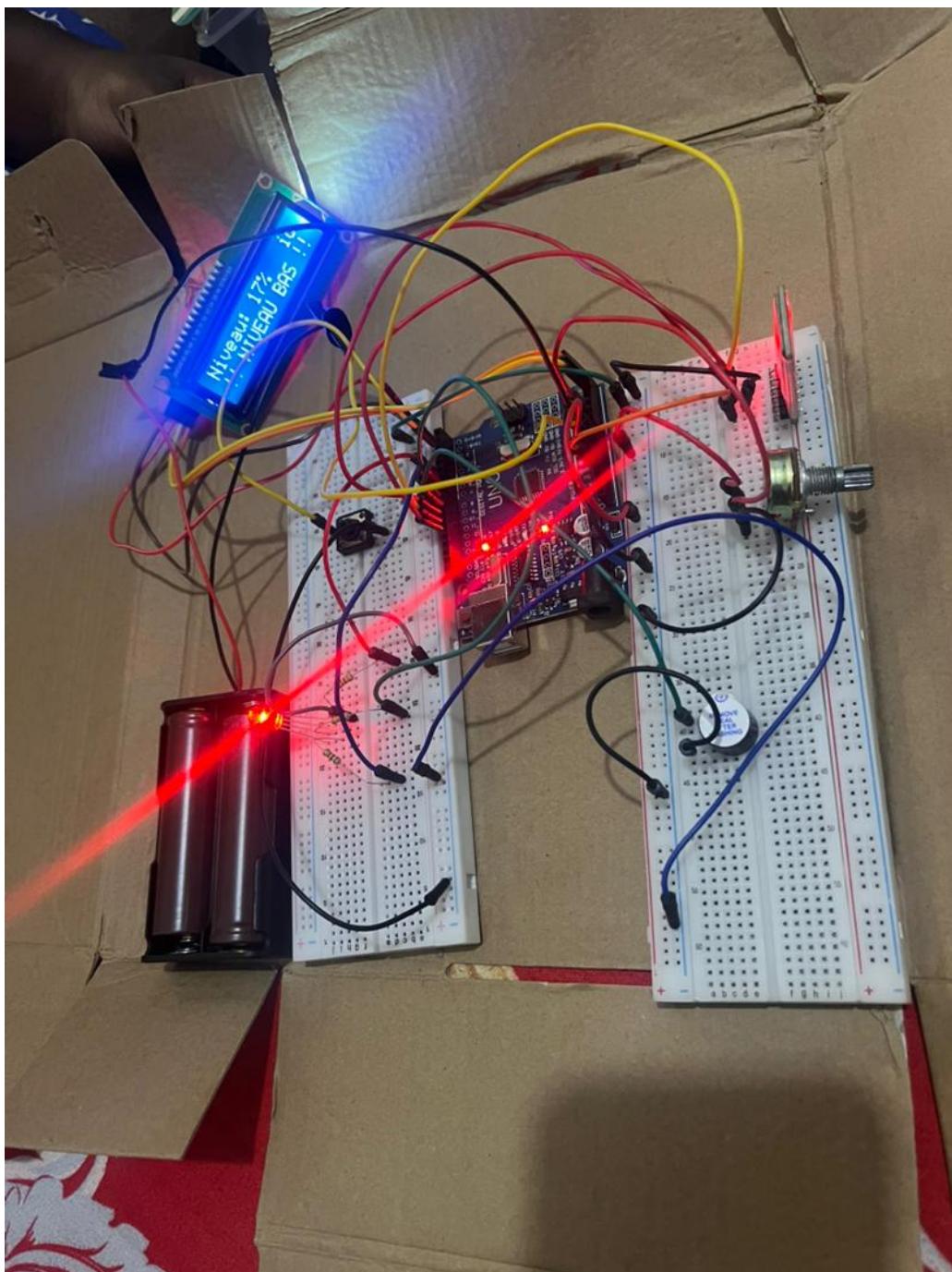


Figure 5.3: Cas du niveau de gaz bas

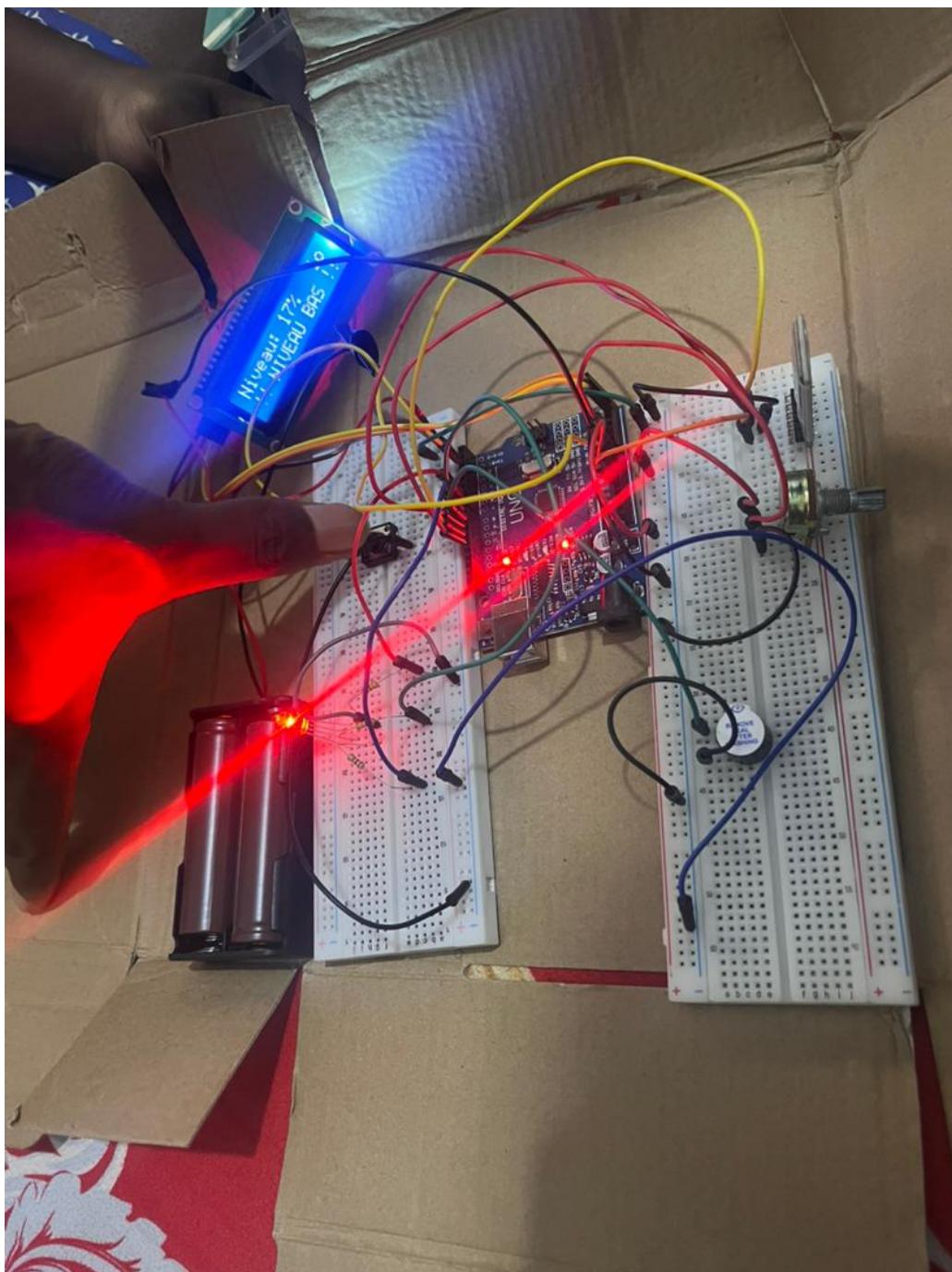


Figure 5.4: Fonctionnement du buzzer

Chapitre 6

Difficultés Rencontrées et Solutions

Ce chapitre présente les principales difficultés rencontrées tout au long de la réalisation du projet, ainsi que les solutions mises en œuvre pour les surmonter. Il met également en évidence les leçons apprises, tant sur le plan technique qu'organisationnel.

6.1 Difficultés Matérielles

6.1.1 Difficulté d'acquisition du matériel

L'une des principales contraintes rencontrées concerne l'acquisition du matériel nécessaire à la réalisation du dispositif embarqué. En particulier, la commande du capteur ultrasonore DYP-L06 a connu un retard important, s'étalant sur plus d'un mois. Ce retard a fortement impacté le planning initial du projet.

Causes identifiées :

- Disponibilité limitée du capteur sur le marché local.
- Délais de livraison prolongés pour les commandes en ligne.
- Contraintes logistiques liées à l'importation du matériel.

Solutions mises en œuvre :

- Réorganisation du planning en priorisant les tâches logicielles.
- Étude théorique approfondie du capteur en attendant sa réception.
- Simulation et préparation du code embarqué sans matériel physique.

6.1.2 Contraintes financières

La mobilisation des fonds nécessaires à l'achat des composants électroniques a également constitué une difficulté majeure.

Problèmes rencontrés :

- Budget limité pour un projet de groupe.
- Retard dans la contribution financière de certains membres.

Solutions adoptées :

- Réduction des coûts en choisissant des composants alternatifs lorsque possible.
- Mutualisation des ressources entre les membres du groupe.
- Planification progressive des achats selon les priorités.

6.1.3 Disponibilité des bouteilles de gaz pour les tests

La réalisation des tests en conditions réelles nécessitait la disponibilité de bouteilles de gaz vides et pleines, ce qui n'a pas toujours été évident.

Solutions :

- Collaboration avec des particuliers et des commerces locaux.
- Utilisation de bouteilles partiellement remplies pour certains tests intermédiaires.

6.2 Leçons Apprises

La réalisation de ce projet a permis à l'équipe d'acquérir de nombreuses compétences et enseignements.

Principales leçons retenues :

- L'importance d'une bonne planification et d'une gestion réaliste des délais.
- La nécessité d'anticiper les problèmes d'approvisionnement matériel.
- La valeur du travail en équipe et du partage des connaissances.
- L'intérêt de tester progressivement chaque composant avant l'intégration globale.
- L'adaptabilité face aux imprévus techniques et organisationnels.

Ces expériences ont contribué à renforcer les compétences techniques et organisationnelles des membres de l'équipe et constituent un apport significatif pour leurs futurs projets académiques et professionnels.

Chapitre 7

Limites et Perspectives d'Évolution

Ce chapitre présente les principales limites du système développé dans le cadre de ce projet, ainsi que les perspectives d'amélioration et d'évolution possibles. Il met en évidence les axes de progression tant sur le plan matériel que logiciel, et ouvre la voie à une éventuelle transformation du prototype en une solution commerciale.

7.1 Limites Actuelles

Malgré les résultats satisfaisants obtenus, le système présente certaines limites inhérentes au cadre académique et aux ressources disponibles.

7.1.1 Limites matérielles

- Le dispositif repose sur un seul capteur ultrasonore, ce qui peut limiter la précision dans certaines conditions (inclinaison de la bouteille, vibrations).
- La fixation du capteur dépend fortement de la qualité du couplage acoustique, pouvant influencer la fiabilité des mesures.
- L'autonomie, bien que satisfaisante (environ 30 jours), reste limitée par l'utilisation de composants peu optimisés énergétiquement.
- Le prototype n'intègre pas encore un boîtier industriel certifié pour un usage prolongé.

7.1.2 Limites logicielles

- Les algorithmes de prédiction reposent sur des modèles simples et ne tiennent pas encore compte de tous les paramètres d'usage (habitudes, saisonnalité).

7.2 Améliorations Matérielles

Plusieurs améliorations matérielles peuvent être envisagées afin d'augmenter les performances et la fiabilité du système.

- Utilisation de plusieurs capteurs ultrasonores pour améliorer la précision et introduire une redondance des mesures.
- Remplacement de l'Arduino Uno par un microcontrôleur plus performant et économique en énergie (ESP32, STM32).

- Intégration d'un boîtier robuste et étanche, conforme aux normes industrielles.
- Ajout de capteurs complémentaires (température,倾inclusion) pour corriger et affiner les mesures.
- Optimisation du circuit d'alimentation pour augmenter l'autonomie de la batterie.

7.3 Améliorations Logicielles

Des évolutions logicielles significatives peuvent également être envisagées.

- **Développement d'une application web et mobile :** Création d'une interface connectée pour permettre la consultation des niveaux à distance via Internet.
- Mise en place d'une infrastructure backend pour l'historisation des données dans le cloud.
- Amélioration des algorithmes de prédiction à l'aide de techniques d'apprentissage automatique basées sur l'historique de consommation.
- Ajout de notifications intelligentes sur smartphone (alertes personnalisées, prévisions avancées).

7.4 Évolution vers une Solution Commerciale

À plus long terme, le projet peut évoluer vers une solution commercialisable.

7.4.1 Étapes envisagées

- Validation du prototype à travers des tests intensifs en conditions réelles.
- Miniaturisation du dispositif et optimisation du design industriel.
- Certification du produit selon les normes de sécurité et de compatibilité électromagnétique.
- Déploiement de l'application web sur une infrastructure cloud robuste et scalable.
- Mise en place d'une infrastructure backend scalable.

7.4.2 Vision à long terme

À terme, la solution pourrait être étendue à :

- La gestion intelligente de la consommation énergétique domestique.
- L'intégration dans des systèmes domotiques et des plateformes IoT.
- Une utilisation à l'échelle industrielle ou commerciale (restaurants, hôtels, entreprises).

Ces perspectives montrent que le projet constitue une base solide pour des développements futurs, tant académiques que professionnels.

Chapitre 8

Conclusion Générale

8.1 Synthèse du Travail Réalisé

Ce projet avait pour objectif principal de concevoir et de réaliser un système intelligent de surveillance du niveau de gaz domestique, combinant un dispositif embarqué, une application mobile et une infrastructure logicielle backend. Face aux problématiques réelles rencontrées par de nombreux ménages, notamment l'absence de visibilité sur la quantité de gaz restante et les risques de rupture imprévue, notre solution vise à apporter une réponse technologique accessible, fiable et sécurisée.

Nous avons conçu un système distribué innovant composé de deux unités distinctes : un module de mesure autonome fixé sous la bouteille et un module de supervision déporté. Cette architecture repose sur la technologie LoRa, offrant une portée étendue et une excellente autonomie. Le capteur ultrasonore DYP-L06, piloté par un Arduino Nano, assure une mesure précise et non intrusive, tandis que l'unité d'affichage permet une surveillance confortable depuis l'espace de vie.

8.2 Atteinte des Objectifs

Les objectifs fixés au début du projet ont été atteints de manière satisfaisante.

- **Conception d'un système de mesure non intrusif :** L'utilisation de la technologie ultrasonore à travers la paroi métallique de la bouteille a permis d'éviter toute modification physique ou risque de fuite, tout en garantissant une précision acceptable pour un usage domestique.
- **Transmission longue portée :** L'adoption de la technologie LoRa a permis de s'affranchir des limites de distance du Bluetooth, autorisant le placement de la bouteille à l'extérieur de l'habitation.
- **Supervision locale :** L'interface dédiée (écran LCD) offre une lecture claire et immédiate pour l'utilisateur.
- **Respect des contraintes de sécurité et d'autonomie :** Le système fonctionne en basse tension, ne génère aucune étincelle et présente une autonomie satisfaisante, compatible avec un usage domestique quotidien.

Globalement, la solution obtenue répond aux exigences du cahier des charges initial tout en restant réaliste sur le plan technique, économique et opérationnel.

8.3 Apports Personnels et Compétences Acquises

Ce projet a constitué une expérience particulièrement formatrice, tant sur le plan technique que sur le plan humain et organisationnel.

Sur le plan technique, il nous a permis de renforcer nos compétences en électronique embarquée, notamment en acquisition de signaux, traitement de données issues de capteurs physiques et gestion de microcontrôleurs. La manipulation de la technologie ultrasonore et l'intégration matérielle dans un environnement réel ont représenté un apprentissage concret des contraintes du monde physique, souvent absentes des projets purement logiciels.

Sur le plan méthodologique et humain, ce projet nous a appris à travailler en équipe sur un système complexe, à gérer les contraintes de temps et de ressources, à communiquer efficacement entre sous-groupes matériel et logiciel, et à résoudre des problèmes imprévus de manière collaborative. Il nous a également sensibilisés à l'importance de la rigueur, de la documentation et de la validation progressive des solutions techniques.

Ainsi, ce projet dépasse largement le cadre académique pour constituer une expérience professionnalisaante proche des conditions réelles de développement industriel.

8.4 Perspectives

Bien que fonctionnelle, la solution développée présente plusieurs axes d'amélioration et d'évolution.

Sur le plan matériel, l'intégration d'un microcontrôleur plus performant et basse consommation, tel qu'un ESP32, permettrait d'ajouter une connectivité Wi-Fi directe et d'optimiser l'autonomie énergétique. L'amélioration du capteur et de l'algorithme de traitement du signal pourrait également accroître la précision des mesures, notamment dans des conditions environnementales variables.

Sur le plan logiciel, le développement d'une application web et mobile constitue la prochaine étape logique. Cela permettrait une gestion multi-utilisateurs, l'intégration de notifications intelligentes, ainsi qu'un système avancé d'analyse de consommation via le cloud.

Enfin, à plus long terme, ce projet pourrait évoluer vers une solution commerciale complète intégrée à des écosystèmes de maison connectée (smart home), permettant une gestion centralisée de l'énergie domestique et une amélioration globale du confort et de la sécurité des utilisateurs.

En conclusion, ce travail constitue une base solide pour le développement de solutions IoT appliquées aux besoins quotidiens, et illustre la pertinence de l'ingénierie numérique au service de problématiques concrètes de la vie courante.

Références

- Arduino. *Arduino Official Documentation*. Disponible sur : <https://docs.arduino.cc> (consulté en janvier 2026).
- DYP Sensor. *DYP-L06 Ultrasonic Sensor Datasheet*. Disponible sur : <https://www.dypcn.com/uploads/DYP-L06.pdf> (consulté en janvier 2026).
- Buyya, R., & Dastjerdi, A. V. *Internet of Things: Principles and Paradigms*. Morgan Kaufmann, 2016.
- Margolis, M. *Arduino Cookbook*. 2^e édition, O'Reilly Media, 2016.
- Valvano, J. W. *Embedded Systems: Real-Time Interfacing to ARM Cortex-M Microcontrollers*. CreateSpace, 2015.
- Semtech. *LoRa Modulation Basics*. Disponible sur : <https://www.semtech.com/lora> (consulté en janvier 2026).
- Kinsler, L. E., Frey, A. R., Coppens, A. B., & Sanders, J. V. *Fundamentals of Acoustics*. John Wiley & Sons, 2000.
- Andreas Spiess. *LoRa with Arduino*. YouTube Video. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=hM0wbNUpDQA> (consulté en janvier 2026).
- FreeCodeCamp.org. *Internet of Things Full Course*. YouTube. Disponible sur : <https://www.youtube.com/watch?v=QSiPNh0iMoE> (consulté en janvier 2026).
- World LPG Association. *Global LPG Market Outlook*. Disponible sur : <https://www.wlpga.org/publications/global-lpg-market-outlook/> (consulté en janvier 2026).
- International Energy Agency (IEA). *Energy Access Outlook – Cooking Fuels*. Disponible sur : <https://www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017> (consulté en janvier 2026).