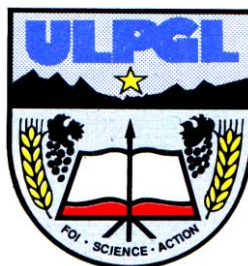


**UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**  
**DOMAINE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**FILIÈRE DES SCIENCES DE L'INGÉNIEUR**



BP. 368 GOMA

[www.ulpgl.net](http://www.ulpgl.net)

**DEVELOPPEMENT D'UNE POUBELLE CONNECTÉE POUR LA  
GESTION DURABLE ET PERSONNALISÉE DES DECHETS EN  
MILIEU URBAIN**

**Par : AVICENNE VYAKUNO Patrick**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de  
Bachelor en Sciences de l'Ingénieur

**Mention : Génie Informatique**

**Directeur : Prof. BARAKA MUSHAGE Olivier**

**Encadreur : Drs. MOLO MBASA Joaquim**

**ANNEE ACADEMIQUE 2024 - 2025**

## **Epigraphe**

*« La gestion de déchets n'est pas une science exacte mais elle nécessite engagement, planification et investissement »*

**Banque mondiale**

## **Dédicace**

À tous ceux qui aspirent à un environnement sain, et plus particulièrement à ceux qui œuvre chaque jour pour faire de Goma une ville plus propre et intelligente.

Ce travail est le vôtre.

***Avicenne VYAKUNO Patrick***

# Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à sa réalisation. Nous rendons tout d'abord grâce à Dieu, pour la vie, la santé et la force qu'il nous a accordées tout au long de parcours académique.

Nos sincères remerciements s'adressent à l'Université Libre des pays des grands Lacs pour la formation et le cadre académique mis à notre disposition.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance au Professeur MUSHAGE BARAKA Olivier, directeur de ce mémoire, pour ses orientations et ses conseils qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Nos remerciements vont également au Doctorant MOLO MBASA Joaquim, encadreur de ce travail, pour sa disponibilité, son accompagnement, son exigence et ses remarques constructives tout au long de cette étude.

Nous adressons une pensée pleine de reconnaissance à notre famille biologique, KAGHOMA, pour son amour inconditionnel, ses encouragements et la confiance qu'elle n'a cessé de nous témoigner.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à la famille MUTUME pour la confiance, le soutien, la considération et l'accompagnement qui ont été pour nous une source permanente de motivation.

Nos remerciements s'adressent aussi à nos camarades et collègues, pour leur soutien académique et l'esprit de solidarité qui a marqué notre parcours universitaire.

Enfin nous exprimons notre reconnaissance à toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail.

***Avicenne VYAKUNO Patrick***

# Résumé

Dans un contexte de croissance urbaine et de transition écologique, l'optimisation de la gestion des déchets constitue un défi majeur pour les villes africaines. Ce travail présente la conception et la réalisation d'une poubelle publique connectée intégrant un système d'identification par RFID et une mesure pondérale automatisée. L'utilisateur est identifié via une carte RFID tandis qu'un capteur de charge couplé au module HX711, piloté par un microcontrôleur ESP32, assure une mesure précise des déchets déposés. Les données collectées (identifiants, poids, état de la batterie) sont transmises vers une plateforme centralisée développée avec Django et Next.js, permettant un suivi en temps réel.

Le dispositif favorise la traçabilité des apports individuels et ouvre la voie à une tarification basée sur la quantité réelle de déchets produits, selon le principe « pollueur-payeur ». En combinant électronique embarqué et internet des objets (IoT), ce projet propose une solution adaptée au contexte local. Les tests effectués valident la fiabilité du prototype avec une erreur relative moyenne de 1,25 %, contribuant ainsi à l'émergence d'une gestion des déchets plus transparente, responsable et durable à Goma.

**Mots clés :** Gestion durable, Gestion des déchets, Principe pollueur payeur, IoT, Capteur de poids, RFID, interface web, poubelle connectée.

# Abstract

In a context of urban growth and ecological transition, optimizing waste management constitutes a major challenge for African cities. This work presents the design and implementation of a smart public bin integrating an RFID identification system and automated weight measurement. The user is identified via an RFID card while a load sensor coupled with the HX711 module, controlled by an ESP32 microcontroller, ensures an accurate measurement of the deposited waste. Collected data (identifiers, weight, battery status) are transmitted in real-time to a centralized platform developed with Django and Next.js, allowing for dynamic flow supervision. The proposed system enhances the traceability of individual waste contribution and paves the way for a charging system based on the actual quantity of waste produced, following the "polluter-pays" principle. By combining embedded electronics and the Internet of Things (IoT), this project offers a solution adapted to the local context. Tests performed validate the prototype's reliability with an average relative error of 1.25%, thus contributing to the emergence of more transparent, responsible, and sustainable waste management in Goma.

**Keywords:** Sustainable management, Waste management, Polluter pays principle, IoT, Weight sensor, RFID, Web interface, Smart bin.

# Table des matières

|                                                                |      |
|----------------------------------------------------------------|------|
| Epigraphe .....                                                | i    |
| Dédicace.....                                                  | ii   |
| Remerciements.....                                             | iii  |
| Résumé.....                                                    | iv   |
| Table des matières .....                                       | vi   |
| Liste des abréviations.....                                    | x    |
| Liste des tableaux.....                                        | xii  |
| Liste des figures .....                                        | xiii |
| 0. Introduction générale .....                                 | 1    |
| 0.1. Contexte .....                                            | 1    |
| 0.2. Identification et formulation du problème .....           | 3    |
| 0.3. Formulation des hypothèses.....                           | 4    |
| 0.4. Justification du choix du sujet et motivations.....       | 5    |
| 0.5. Énoncé des objectifs de recherche .....                   | 5    |
| 0.5.1. L'objectif général.....                                 | 5    |
| 0.5.2. Les objectifs spécifiques .....                         | 6    |
| 0.6. Méthodes et délimitation du travail .....                 | 6    |
| 0.6.1. Méthodes et techniques.....                             | 6    |
| 0.6.2. Délimitation du travail .....                           | 7    |
| 0.7. Subdivision du travail .....                              | 7    |
| Chapitre 1 Revue de la littérature et cadre théorique .....    | 9    |
| 1.1 Gestion des déchets urbains en Afrique subsaharienne ..... | 9    |
| 1.1.1 État actuel de la gestion de déchets.....                | 9    |

|                                                      |                                                                     |    |
|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1.2                                                | Enjeux environnementaux et sanitaires.....                          | 11 |
| 1.1.3                                                | Spécification de la RDC et de la ville de Goma .....                | 11 |
| 1.2                                                  | Gestion durable des déchets .....                                   | 12 |
| 1.3                                                  | Traçabilité et responsabilisation des usagers .....                 | 13 |
| 1.4                                                  | Approches technologiques dans la gestion des déchets .....          | 13 |
| 1.4.1                                                | Systèmes traditionnels de collecte : forces et limites.....         | 13 |
| 1.4.2                                                | Intégration des technologies dans la gestion des déchets .....      | 14 |
| 1.5                                                  | Généralités sur les systèmes embarqués et Internet des Objets ..... | 16 |
| 1.5.1                                                | Les systèmes embarqués .....                                        | 16 |
| 1.5.2                                                | Internet des objets (IoT).....                                      | 16 |
| 1.5.3                                                | Automatisme et systèmes de contrôle.....                            | 18 |
| 1.5.4                                                | Réseaux de communication dans l'IoT .....                           | 18 |
| 1.5.5                                                | Les Microcontrôleurs : Cœur de systèmes embarqués .....             | 19 |
| 1.6                                                  | Conclusion partielle.....                                           | 20 |
| Chapitre 2 Conception du système de la poubelle..... |                                                                     | 21 |
| 2.1                                                  | Cahier des charges du système.....                                  | 21 |
| 2.1.1                                                | Présentation du projet .....                                        | 21 |
| 2.1.2                                                | Spécifications fonctionnelles .....                                 | 22 |
| 2.1.3                                                | Spécifications non fonctionnelles .....                             | 23 |
| 2.2                                                  | Architecture du système .....                                       | 24 |
| 2.2.1                                                | Présentation du système .....                                       | 24 |
| 2.2.2                                                | Logique de fonctionnement du système .....                          | 25 |
| 2.3                                                  | Modélisation et Conception du système.....                          | 26 |
| 2.3.1                                                | Diagramme d'exigences.....                                          | 27 |
| 2.3.2                                                | Diagrammes d'exigences détaillés.....                               | 29 |
| 2.3.3                                                | Diagramme d'exigences fonctionnel .....                             | 29 |
| 2.3.4                                                | Diagramme d'exigence non fonctionnelles .....                       | 30 |
| 2.3.5                                                | Diagramme d'exigence lié aux contraintes techniques.....            | 31 |
| 2.3.6                                                | Diagramme de contexte .....                                         | 32 |

|                                                        |                                                              |    |
|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|----|
| 2.3.7                                                  | Diagramme de cas d'utilisation .....                         | 34 |
| 2.3.8                                                  | Diagramme de définition de block.....                        | 36 |
| 2.3.9                                                  | Diagramme de bloc interne .....                              | 38 |
| 2.3.10                                                 | Diagramme de séquence .....                                  | 39 |
| 2.3.11                                                 | Diagramme des classes .....                                  | 40 |
| 2.4                                                    | Architecture matérielle et choix technologique .....         | 42 |
| 2.4.1                                                  | Conception du réceptacle .....                               | 42 |
| 2.4.2                                                  | Schéma bloc matériel du système .....                        | 45 |
| 2.4.3                                                  | Présentation et justification des organes matériels .....    | 46 |
| 2.4.4                                                  | Architecture logicielle et protocoles de communication ..... | 48 |
| 2.5                                                    | Conclusion partielle.....                                    | 49 |
| Chapitre 3 Réalisation, résultats et discussions ..... |                                                              | 50 |
| 3.1                                                    | Environnement de réalisation.....                            | 50 |
| 3.1.1                                                  | Ressources matérielles .....                                 | 50 |
| 3.1.2                                                  | Environnement logiciel .....                                 | 51 |
| 3.2                                                    | Implémentation du système.....                               | 51 |
| 3.2.1                                                  | Réalisation matérielle et prototypage.....                   | 52 |
| 3.2.2                                                  | Fonctionnement du micrologiciel .....                        | 54 |
| 3.2.3                                                  | Etalonnage de la balance.....                                | 56 |
| 3.2.4                                                  | Réalisation et aménagement du prototype de la poubelle.....  | 57 |
| 3.3                                                    | Présentation et analyses de résultats.....                   | 58 |
| 3.3.1                                                  | Résultat Matériels .....                                     | 58 |
| 3.3.2                                                  | Résultat Logiciels : Plateformes de supervision .....        | 59 |
| 3.4                                                    | Analyses de robustesse et latence.....                       | 71 |
| 3.5                                                    | Impact social du système proposé .....                       | 71 |
| 3.6                                                    | Conclusion partielle.....                                    | 72 |
| Conclusion générale.....                               |                                                              | 74 |
| Contributions.....                                     |                                                              | 74 |
| Critique du travail .....                              |                                                              | 75 |

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Perspectives d'amélioration .....                          | 75 |
| Bibliographie.....                                         | 77 |
| Annexe A Extrait du micrologiciel embarqué .....           | 80 |
| Annexe B Relevés de tests de précision de la pesée.....    | 82 |
| Annexe C Interface de suivi complémentaire.....            | 83 |
| C.1 Tableau de suivi de flux des données IoT .....         | 83 |
| C.2 État de la page collecte sans poubelle en alerte ..... | 83 |
| C.1 Page de connexion .....                                | 83 |

# Sigles et abréviations

**3R** : Réduction, Réutilisation et Recyclage

**ADC** : Analog-to-Digital Converter (Convertisseur Analogique-Numérique)

**API** : Application Programming Interface (Interface de Programmation d'Application)

**CPU** : Central Processing Unit (Unité Centrale de Traitement)

**ESP32** : Epressif Systems Processor 32 bits (Microcontrôleur Wi-Fi/Bluetooth)

**GND** : Ground (Masse électrique / Terre)

**GPIO** : General Purpose Input/Output (Entrée/Sortie à usage général)

**GSM**: Global System for mobile

**HTTP**: HyperText Transfer Protocol (Protocole de transfert hypertexte)

**I2C** : Inter-Integrated Circuit (Bus de communication série à deux fils)

**IHM** : Interface Homme-Machine Communication

**IoT** : Internet of Things (Internet des Objets)

**JSON** : JavaScript Object Notation (Format de données textuelles dérivé de JavaScript)

**LCD** : Liquid Crystal Display (Afficheur à cristaux liquides)

**LittleFS** : Little File System (Système de fichiers pour microcontrôleurs)

**LoRaWAN** : Long Range Wide Area Network (Réseau étendu à longue portée)

**MEDD** : Ministère de l'Environnement et du Développement Durable

**OIML** : Organisation Internationale de Métrologie Légale

**ODD** : Objectifs de Développement Durable

**OMS** : Organisation Mondiale de la santé

**ORM** : Object-Relational Mapping (Lien entre base de données et objets logiciels)

**POST** : Méthode d'envoi de données en HTTP

**RAM** : Random Access Memory (Mémoire vive)

**RDC** : République Démocratique du Congo

**REST** : Representational State Transfer (Style d'architecture logicielle pour les API)

**RFID**: Radio Frequency Identification (Identification par Radiofréquence)

**SDA**: Serial Data

**SCL**: Serial Clock

**SPI** : Serial Peripheral Interface (Bus de communication série haute vitesse)

**SysML** : Systems Modeling Language

**UID** : Unique Identifier (Identifiant Unique d'un badge RFID)

**UML** : Unified Modeling Language (Langage de modélisation unifié)

**VCC** : Voltage at the Common Collector (Tension d'alimentation positive)

# Liste des tableaux

|                                                       |           |
|-------------------------------------------------------|-----------|
| <i>Tableau 3.1 - Correspondance des broches .....</i> | <i>53</i> |
|-------------------------------------------------------|-----------|

# Liste des figures

|                                                                          |                                    |
|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| <i>Figure 2.1 Schéma bloc de l'architecture générale du système</i>      | 24                                 |
| <i>Figure 2.2 logique d'exécution des tâches</i>                         | <i>Erreur ! Signet non défini.</i> |
| <i>Figure 2.3 Diagramme globale d'exigences du système</i>               | 29                                 |
| <i>Figure 2.4 Diagramme d'exigences fonctionnelles</i>                   | 30                                 |
| <i>Figure 2.5 Diagramme d'exigence non fonctionnelles</i>                | 31                                 |
| <i>Figure 2.6 Diagramme d'exigences contraintes techniques</i>           | 32                                 |
| <i>Figure 2.7 Diagramme de contexte</i>                                  | 34                                 |
| <i>Figure 2.8 Diagramme de cas d'utilisation</i>                         | 36                                 |
| <i>Figure 2.9 Diagramme de définition de block</i>                       | 38                                 |
| <i>Figure 2.10 Diagramme de bloc interne</i>                             | 39                                 |
| <i>Figure 2.11 Diagramme des séquences</i>                               | 40                                 |
| <i>Figure 2.12 Diagramme de classe</i>                                   | 42                                 |
| <i>Figure 2.13 Réceptacle façade principale et façade gauche</i>         | 44                                 |
| <i>Figure 2.14 Réceptacle façade arrière et façade droite</i>            | 45                                 |
| <i>Figure 2.15 schéma bloc matériel du système</i>                       | 46                                 |
| <i>Figure 2.16 Une carte ESP32</i>                                       | 47                                 |
| <i>Figure 2.17 Cellule de charge et module HX711</i>                     | 48                                 |
| <i>Figure 2.18 Module RFID</i>                                           | 48                                 |
| <i>Figure 2.19 Afficheur LCD</i>                                         | 49                                 |
| <i>Figure 3.1 Schéma de câblage générale du prototype</i>                | 55                                 |
| <i>Figure 3.2 Dashboard central</i>                                      | 61                                 |
| <i>Figure 3.3 Interface de gestion des utilisateurs</i>                  | 62                                 |
| <i>Figure 3.4 Interface de consultation du profil utilisateur</i>        | 63                                 |
| <i>Figure 3.5 Interface de gestion des unités de collectes déployées</i> | 64                                 |
| <i>Figure 3.6 Interface d'analyse des données</i>                        | 65                                 |
| <i>Figure 3.7 Gestion de la redevance et facturation</i>                 | 66                                 |
| <i>Figure 3.8 Interface des poubelles filtré pour l'opérateur</i>        | 68                                 |
| <i>Figure 3.9 Interface de l'utilisateur</i>                             | 69                                 |

# 0. Introduction générale

## 0.1. Contexte

Selon la banque mondiale, l'Afrique subsaharienne connaît une croissance urbaine sans précédent. Selon la même source, les populations urbaines ont plus que doublé entre 2000 et 2020, passant de 200 à 500 millions d'habitants [1]. Cette expansion accélérée s'accompagne d'une crise environnementale majeure liée à la gestion des déchets. À l'échelle continentale, seuls **55 %** des déchets urbains sont collectés et plus de **90 %** ne bénéficient d'aucun traitement durable, selon le programme Envynature [2]. D'autres études montrent que seuls 44 % des déchets générés sont collectés, tandis que 93 % des résidus non traités sont abandonnés en décharge sauvages ou brûlés à ciel ouvert [1], [3]. Ces pratiques génèrent d'importantes émissions de CO<sub>2</sub> et des particules toxiques (dioxyde de soufre, mercure, dioxine) [4], avec des impacts sanitaires sur les populations riveraines [5]. Malgré l'urgence environnementale et sanitaire croissante, la plupart des villes concernées ne disposent ni d'équipements modernes de collecte, ni de système efficace de tri ou de traitement des déchets. Ce manque d'infrastructures adaptées rend la gestion des déchets particulièrement difficile. Face à ce déficit infrastructurel, et au fait que les déchets ne sont généralement pas triés dès leur production, les opérations de collecte deviennent plus coûteuses et moins efficaces. Cela empêche une bonne récupération des déchets recyclables, et maintient un système qui fonctionne mal, sans réelle amélioration [6].

Cette situation est particulièrement critique en République Démocratique du Congo, où les services municipaux de gestion des déchets reposent majoritairement sur des modes de collecte manuels et informels [7]. D'après le programme des nations unies pour l'environnement, moins de 40% des déchets urbains y sont effectivement collectés, et les infrastructures de traitement sont quasi inexistantes en dehors de Kinshasa [8]. Ce déficit d'infrastructures de base, combiné

à l'absence de tri à la source, au manque des mécanismes de traçabilité individuelle et à l'insuffisance de politiques incitatives, entraîne une perte d'efficacité opérationnelle, un gaspillage des matières valorisables et une difficulté à adapter les tournées de collecte aux volumes réellement produits par les usagers [6].

A Goma cette problématique se manifeste de manière tangible. Malgré les efforts d'assainissement engagé par les autorités locales et certains acteurs communautaires, la ville peine à faire face à la croissance rapide de sa population et à l'augmentation des déchets produits. Une étude menée par l'université de Goma indique que plus de 60 % des ménages dans les communes de Karisimbi et Goma n'ont accès à aucun service structuré de collecte [9]. Dans la commune de Karisimbi, par exemple, les autorités ne disposent ni d'engins roulant dédié à la collecte des déchets ménagers, ni de décharges publiques. En conséquence, la gestion des déchets repose principalement sur des structures privées spécialisées, qui n'interviennent qu'auprès des ménages abonnés à leurs services. Toutefois, les agents de ces structures privées ne restent pas sans se plaindre des obstacles aux quels ils font face dans l'exercice de leur travail, parmi lesquels : le manque des véhicules spécialisé, le manque d'infrastructures pour le traitement des déchets ménagers (Centre de tri, décharges publiques, etc.), absence de technologies de pointe, etc. [10].

Dans ce contexte de déficience structurelle et de gestion inefficace des déchets, les innovations technologiques offrent des perspectives concrètes de transformation. En particulier, l'électronique embarquée et l'Internet des Objets (IoT) représentent des leviers puissants pour moderniser les pratiques de collecte et de suivi. Des projets pilotes réalisés en Zambie et dans d'autres pays africains ont démontré que l'intégration de capteurs de niveau, de modules de pesée et de systèmes RFID pour l'identification des usagers permet non seulement d'optimiser les tournées de collecte (jusqu'à -30 % de coût opérationnel), mais aussi d'accroître les taux de recyclage (+25 %) [11].

S'inspirant de ces expériences réussies, le présent travail propose *la conception et le développement d'une poubelle connectée destinée à un usage urbain*. L'objectif est de proposer

une solution technologique accessible, durable et adaptée aux réalités locales, favorisant une *gestion personnalisée des déchets*. Ce système constitue également une base pour l'intégration de fonctionnalités avancées à l'avenir, telles que la *prédiction de la quantité de déchet produit par les ménages* en vue d'améliorer l'efficacité, la transparence et la durabilité des politiques de propreté urbaine.

## **0.2. Identification et formulation du problème**

Malgré les efforts déployés dans certaines villes pour moderniser leurs systèmes d'assainissement, la gestion des déchets en Afrique subsaharienne reste largement déficiente, tant sur le plan technique qu'organisationnel. En République Démocratique du Congo, les infrastructures de collecte demeurent souvent rudimentaires, les opérations sont essentiellement manuelles, et les systèmes de suivi quasi inexistant. Cette situation entraîne non seulement une faible efficacité opérationnelle, mais également un gaspillage des ressources valorisables et une exposition accrue des populations aux risques sanitaires et environnementaux [8].

A Goma, chef-lieu de la province du Nord-Kivu, il est devenu courant ces derniers mois que les ménages déposent leurs déchets ménagers devant leurs portes, dans l'attente du passage des camions ou des agents de structures d'assainissement. Si cette méthode facilite la collecte, elle dégrade fortement l'esthétique urbaine pendant le temps d'attente, favorise la dispersion des déchets par le vent ou les animaux errants et contribue à la pollution de l'air ambiant. De plus en l'absence de conteneurs adaptés et de système de tri à la source, les matières recyclables se mélangent aux déchets organiques rendant leur valorisation plus complexe et coûteuse.

Ainsi le problème ne réside pas seulement dans l'absence de dispositifs adaptés, mais aussi dans l'incapacité du système de collecte actuel à évoluer vers les solutions plus efficaces et durables. Par ailleurs, la gestion responsable des déchets suppose aussi la mise en place de mécanismes de responsabilisation, tels que le principe du "pollueur-payeur", qui vise à faire supporter à chaque producteur de déchets les coûts liés à leur traitement. Toutefois, son application reste encore marginale en Afrique subsaharienne et en République Démocratique

du Congo, faute d'outils techniques et institutionnels adaptés. C'est dans ce contexte que se pose la question de savoir si l'introduction de poubelles publiques intelligentes intégrant des technologies embarquées (RFID, pesée, automatisation de la collecte des données), pourrait constituer une alternative réaliste. Ces dispositifs viseraient à réduire l'exposition des déchets dans les rues, à renforcer la traçabilité et la responsabilisation des usagers, mais aussi à améliorer le fonctionnement global du système de collecte en produisant des données fiables pour la planification et la décision.

Ainsi, plusieurs interrogations se posent quant aux moyens de rendre la gestion des déchets plus efficace, durable et adaptée à la réalité locale. Les questions de recherche qui guident cette étude sont les suivantes :

1. Dans quelle mesure des mécanismes d'identification des usagers pourraient-ils contribuer à renforcer la traçabilité et la responsabilisation citoyenne dans la gestion des déchets urbains ?
2. Dans quelle mesure la mise en place de dispositifs de mesure et de suivi des volumes de déchets déposés pourrait-elle améliorer la fiabilité des données et soutenir la prise de décision des autorités en matière de collecte et de traitement ?
3. Un système intégré de suivi, de mesure et d'enregistrement des dépôts de déchets serait-il techniquement et opérationnellement adaptable aux contraintes locales (économiques, infrastructurelles et organisationnelles) ?

### **0.3. Formulation des hypothèses**

Sur base des questions de recherche, nous proposons les hypothèses suivantes comme réponses anticipées et fondement à la réalisation du projet :

1. L'identification des utilisateurs par carte RFID, appliquée aux poubelles publiques destinés à un groupe de ménage, permettrait de renforcer la traçabilité individuelle et d'instaurer une responsabilisation accrue dans la gestion des déchets urbains.

2. L'intégration d'une cellule de pesée électronique permettrait de recueillir des données fiables et quantifiées sur les volumes de déchets déposés, ouvrant la voie à une gestion plus efficace et personnalisée dans la prise de décision.
3. Nous estimons qu'un dispositif embarqué simple, associant RFID, pesée et automatisation de la collecte des données (ID, poids, horodatage), serait techniquement adapté aux contraintes et aux ressources disponibles dans un contexte urbain comme Goma.

## **0.4. Justification du choix du sujet et motivations**

Le choix de ce sujet s'inscrit dans un contexte où la gestion des déchets en milieu urbain demeure insuffisante, caractérisée par des méthodes manuelles, un manque d'infrastructures et une faible pratique du tri à la source. Face à ces limites, l'introduction de solutions basées sur l'Internet des objets apparaît comme une alternative pertinente pour améliorer la traçabilité et l'efficacité des opérations de collecte. Ce projet s'aligne ainsi avec les enjeux de développement durable, notamment en matière de valorisation des déchets et d'optimisation des ressources. Sur le plan académique, il constitue une opportunité de mobiliser des compétences en électronique, en programmation embarquée et en architecture IoT à travers la réalisation d'un prototype fonctionnel. Par ailleurs, la solution proposée repose sur une approche simple, modulaire et adaptée aux contraintes locales, facilitant son déploiement par des acteurs publics ou privés. Enfin, en associant identification des usagers et mesure des dépôts, le système contribue à encourager des pratiques plus responsables, notamment le tri à la source, tout en renforçant la sensibilisation des citoyens aux enjeux environnementaux.

## **0.5. Énoncé des objectifs de recherche**

### **0.5.1. L'objectif général**

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de développer un prototype de poubelle intelligente, intégrant des technologies embarquées telles que l'identification par RFID, la

pesée électronique et l'automatisation des actions, dans le but de favoriser une gestion durable, personnalisée et efficace des déchets ménagers en milieu urbain.

### **0.5.2. Les objectifs spécifiques**

Pour atteindre l'objectif général fixé, ce travail se propose de :

1. Analyser les limites actuelles des systèmes de gestion des déchets en contexte de la ville de Goma, en mettant l'accent sur les problématiques de traçabilité, de quantification et d'automatisation.
2. Étudier les technologies adaptées à la conception d'une solution embarquée.
3. Développer un prototype fonctionnel de poubelle public connectée intégrant les modules d'identification, de pesée et de collecte automatique des données.
4. Mettre en place une interface web d'analyse et de suivi destinée aux acteurs de l'assainissement (autorités locales, structures privées, communautés), permettant de visualiser en temps réel les données collectées (volumes, fréquences, usagers), de produire des statistiques et de générer des prédictions afin de faciliter la prise de décision et l'optimisation des interventions.
5. Tester la faisabilité technique de la solution dans un environnement contrôlé, en vérifiant la précision des données collectées.
6. Évaluer l'adéquation de la solution proposée aux contraintes locales (coût, accessibilité, simplicité d'usage) et sa capacité à améliorer la gestion des déchets sur le terrain.

## **0.6. Méthodes et délimitation du travail**

### **0.6.1. Méthodes et techniques**

Pour atteindre les objectifs de cette étude, nous avons adopté une méthodologie basée sur une combinaison de trois approches complémentaires :

- **Technique documentaire**

Elle consiste à consulter et analyser des ouvrages, articles scientifiques, rapports institutionnels et document en ligne relatifs à la gestion des déchets, aux technologies IoT, aux système RFID

et au capteur de pesée. Cette étape permet de comprendre les enjeux théoriques et les solutions technologiques existantes.

- **Méthode analytique**

Elle permettra dans ce travail d'examiner et d'interpréter les données recueillies, qui proviennent de la littérature scientifique ou d'observation de terrain, afin d'identifier les forces et les limites des systèmes actuels des gestions des déchets.

- **Méthodes descriptives et techniques expérimentales**

Elle consiste à décrire les caractéristiques du dispositif proposé et à tester un prototype fonctionnel. L'expérimentation va donc nous permettre d'évaluer la faisabilité technique, la pertinence de choix matériels et logiciels, ainsi que la conformité aux besoins locaux.

## **0.6.2. Délimitation du travail**

Ce travail se concentre exclusivement sur :

- La conception est la mise en œuvre d'une *poubelle connectée* intégrant : un module RFID pour l'identification des utilisateurs, une cellule de pesée électronique, un mécanisme automatisé d'ouverture et un système d'enregistrement/transmission des données (ID, poids, horodatage).
- Le contexte *urbain de la ville de Goma*, avec une attention particulière portée aux réalités locales (moyens techniques disponibles, condition économiques, habitudes des gestions des déchets).
- L'aspect *technique et fonctionnel* du système, sans entrer dans la mise en œuvre d'un déploiement à grande échelle ni dans une étude d'impact environnemental approfondie.

## **0.7. Subdivision du travail**

Hormis l'introduction générale et la conclusion générale, ce travail comprend 3 principaux chapitres organisés de la manière suivante :

- **Chapitre I :** *Revue de la littérature et cadre théorique*, concerne l'analyse des travaux antérieurs, présentation des concepts clés liés à la gestion des déchets, à l'internet des objets (IoT), aux systèmes RFID et à la pesée électronique. Ce chapitre met également en évidence les approches existantes et les solutions technologiques pertinentes pour le projet.
- **Chapitre II :** *Conception du système de la poubelle connectée*, concerne l'analyse des leçons tirées de la revue de la littérature, l'établissement du cahier des charges, la conception et la modélisation du système.
- **Chapitre III :** *Réalisation, résultats et discussions*, concerne la présentation du prototype développé, résultats des tests effectués, analyse de performances, identifications de limites techniques et propositions d'amélioration.

# **Chapitre 1**

## **Revue de la littérature et cadre théorique**

### **1.1 Introduction partielle**

Ce chapitre vise à présenter l'état actuel des connaissances et des pratiques liées à la gestion de déchets urbains, tant à l'échelle internationale que régionale, afin de situer la problématique étudiée dans son contexte scientifique et technique. Il examine d'abord la situation générale de la gestion de déchets en Afrique subsaharienne, en mettant en évidence ses impacts environnementaux et sanitaires, avant de se focaliser sur la République Démocratique du Congo et la ville de Goma. Par la suite, il explore les innovations technologiques, notamment celles basées sur l'électronique embarqué et internet des objets (IoT), qui offrent des nouvelles perspectives pour optimiser les opérations de collecte, améliorer la traçabilité et favoriser la valorisation de déchets.

Cette analyse documentaire constitue ainsi le socle conceptuel et contextuel sur lequel s'appuie la conception du système proposé dans ce travail.

### **1.2 Gestion des déchets urbains en Afrique subsaharienne**

#### **1.2.1 État actuel de la gestion de déchets**

La gestion des déchets solides municipaux constitue un défi majeur pour les villes d'Afrique subsaharienne. Selon la Banque mondiale, la production de déchets dans la région a fortement augmenté au cours des deux dernières décennies, sous l'effet conjugué de l'urbanisation rapide et de la croissance démographique. Entre 2000 et 2020, la population urbaine est passée d'environ 200 à 500 millions d'habitants, entraînant une hausse significative des volumes de déchets produits [1].

Pourtant, les systèmes de gestion peinent à suivre ce rythme : seuls 44 à 55 % des déchets générés sont collectés avec des fortes disparités selon les zones [2]. Les quartiers centraux et résidentiels bénéficient généralement d'une couverture minimale, tandis que les zones

périurbaines et les quartiers informels à forte densité restent largement exclus des services réguliers [3]. En l'absence de collecte structurée, une grande partie des déchets est abandonnée dans des décharges sauvages, brûlée à ciel ouvert ou déversée dans le cours d'eau, avec des graves conséquences sanitaires et environnementales.

En ce qui concerne le traitement, la situation est encore plus critique : moins de 10 % des déchets collectés sont recyclés ou dirigés vers des installations de traitement adaptées. La majorité aboutit dans des décharges non contrôlées, dépourvues de normes environnementales, ce qui accentue la pollution des sols, de l'air et de l'eau [12].

Sur le plan institutionnel, la responsabilité de la gestion des déchets incombe en principe aux municipalités. Or, celles-ci disposent rarement des moyens financiers, techniques et humains nécessaires pour assumer efficacement cette mission [13]. Les budgets alloués sont insuffisants et les politiques publiques de gestion durable, bien qu'existantes sur le papier, peinent à être mises en œuvre. Face à ces limites certaines villes délèguent la collecte à des entreprises privées, mais cette approche reste partielle et souvent limitée aux quartiers solvables. Les populations les plus pauvres, incapables de payer pour un service en sont généralement exclues.

À côté de ces dispositifs officiels, le secteur informel joue un rôle central. Les pré-collecteurs et récupérateurs assurent une part significative de la collecte et du recyclage, notamment pour les plastiques, métaux et verres. Toutefois, leur contribution se fait dans des conditions précaires, sans reconnaissance ni soutien institutionnel [14].

Enfin, plusieurs défis communs aux villes africaines expliquent la persistance de cette crise. D'abord un déficit financier structurel, qui empêche tout investissement dans des infrastructures modernes. Ensuite des contraintes techniques et logistiques : équipement inadéquat et coûteux, routes impraticables dans certains quartiers absence de centre de tri ou de traitement à proximité. Enfin, un obstacle socio culturel : le manque de sensibilisation au tri à la source et la valorisation des déchets. Cette absence de tri en amont réduit fortement la qualité

et la valeur des matières recyclables et perpétue un modèle linéaire centré sur la mise en décharge [8].

### **1.2.2 Enjeux environnementeaux et sanitaires**

L'élimination inappropriés des déchets engendre des conséquences environnementales et sanitaires considérables. Les décharges à ciel ouvert et le brûlage incontrôlé contribuent à l'émission de gaz à effet de serre, notamment le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), ainsi qu'à la diffusion de polluants toxiques tels que le dioxyde de soufre, le mercure et les dioxines [4]. Ces substances dégradent la qualité de l'air contaminent les sols et menacent les ressources en eau. Sur le plan sanitaire, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) rapporte une corrélation claire entre la mauvaise gestion des déchets et la prévalence accrue de maladies infectieuses dans les zones urbaines, notamment les maladies diarrhéiques, les infections respiratoires et d'autres pathologies liées à la contamination environnementale [5]. Ces risques sont amplifiés lors des saisons pluvieuses, lorsque les déchets obstruent les caniveaux et favorisent les inondations.

### **1.2.3 Spécification de la RDC et de la ville de Goma**

En République Démocratique du Congo (RDC), la gestion des déchets urbains demeure un défi structurel majeur. Malgré l'existence d'un cadre institutionnel porté par le Ministère de l'Environnement et du Développement Durable (MEDD), l'application des politiques publiques reste limitée en raison du manque de financement, d'équipements adaptés et de ressources humaines qualifiées. Le gouvernement reconnaît lui-même que les stratégies actuelles, centrées sur la collecte manuelle et le transport, doivent évoluer vers une approche intégrée fondée sur l'économie circulaire et les Objectifs de Développement Durable (ODD 6.2 et 12.5) afin d'assurer la durabilité du système [15].

À Goma, chef-lieu de la province du Nord-Kivu, la problématique se manifeste avec une acuité particulière. Une étude de l'Université de Goma (2025) réalisée dans la commune de Karisimbi montre que les structures privées assurant la collecte des déchets rencontrent d'importantes difficultés techniques (manque de camions, absence de sites de dépôt), financières et institutionnelles [10]. Par ailleurs, une enquête complémentaire menée auprès de 320 ménages

révèle que plus de 60 % des habitants déposent leurs déchets devant leurs portes ou sur les routes en attendant le passage des collecteurs. Cette méthode, bien que pratique, dégrade l'image urbaine, favorise la dispersion des déchets et pollue l'air ambiant [16].

L'absence de poubelles publiques, le manque de tri à la source et la dépendance envers des opérateurs privés payants entraînent une gestion fragmentée et inéquitable. Les quartiers non desservis sont contraints à l'auto-évaluation ou au brûlage des déchets à ciel ouvert. De plus, la configuration géologique de Goma sol volcanique poreux, proximité du lac Kivu rend la création de décharges contrôlées particulièrement complexe et accroît les risques de contamination environnementale. Dans ce contexte, une solution locale, automatisée et inclusive apparaît nécessaire pour pallier les failles structurelles existantes et soutenir les efforts de salubrité urbaine.

### **1.3 Gestion durable des déchets**

La gestion durable des déchets repose sur le principe des « 3R » : *Réduction, Réutilisation et Recyclage*. Il s'agit non seulement de limiter la production de déchets en amont, mais aussi de valoriser au maximum ceux qui sont déjà produits, afin de réduire leur impact environnemental et sanitaire. Dans ce cadre, le *tri à la source* constitue une étape essentielle, puisqu'il facilite le recyclage et diminue les coûts de traitement ultérieurs.

En Afrique subsaharienne et en République Démocratique du Congo, la mise en œuvre de ces pratiques reste limitée. Les systèmes de collecte sont souvent incomplets et peu adaptés, tandis que les filières de recyclage restent embryonnaires. Cette situation accentue la dépendance aux décharges sauvages ou au brûlage à ciel ouvert, avec des conséquences néfastes sur la qualité de l'air, des sols et des cours d'eau [1], [8].

Ainsi, une gestion durable suppose à la fois des infrastructures adaptées (centres de tri, systèmes de collecte efficaces), des outils technologiques (traçabilité, capteurs, automatisation) et une participation citoyenne active, pour rompre le cercle vicieux d'inefficacité qui caractérise aujourd'hui la gestion des déchets dans de nombreuses villes africaines.

## **1.4 Traçabilité et responsabilisation des usagers**

La *traçabilité des déchets* consiste à suivre leur parcours depuis la production jusqu'au traitement ou à l'élimination finale. Dans les pays où cette approche est appliquée, elle permet de mieux contrôler les flux, d'identifier les points de défaillance et d'améliorer la transparence dans la gestion [17].

Un des leviers majeurs de cette traçabilité repose sur l'identification des producteurs de déchets (ménages, entreprises, services publics). Le suivi de déchets rend possible la mise en place de politique incitative et des modèles économiques innovent.

Dans ce cadre, le principe du pollueur payeur constitue un fondement théorique majeur. Il stipule que celui qui génère des déchets doit supporter les coûts liés à leur gestion, proportionnellement à la quantité produite. Appliquée au contexte urbain, ce principe encourage à réduire la production des déchets et favorise l'adoption de comportement responsables [18].

Dans le contexte africain et congolais, où la gestion repose souvent sur des pratiques informelles, l'introduction de la traçabilité constituerait une avancée importante. Elle permettrait non seulement d'améliorer l'efficacité opérationnelle, mais aussi d'ouvrir la voie à des systèmes incitatifs tels que la tarification au poids ou la reconnaissance des comportements vertueux [8].

## **1.5 Approches technologiques dans la gestion des déchets**

### **1.5.1 Systèmes traditionnels de collecte : forces et limites**

Le système traditionnel de collecte des déchets dans la plupart des villes Africaines repose encore sur des procédés manuels et des outils rudimentaires. Les ménages déposent leurs déchets dans des points fixes, souvent à ciel ouvert, en attendant le passage des camions municipaux ou des collecteurs privés. Ce modèle bien qu'archaïque présente quelques avantages : il favorise la création d'emploi de proximité pour les agents de terrain, reste simple à mettre en œuvre et s'adapte aux zones à forte densité ou difficile d'accès [19].

Cependant ses limites sont nombreuses. En l'absence de planification numérique, les collectes sont irrégulières et souvent inefficaces, avec des trajets mal optimisés et un manque total de traçabilité. Les déchets s'accumulent, se dispersent, et contribuent à la dégradation de l'environnement urbain. Par ailleurs sans tri à la source ni pesée systématique, il est impossible de quantifier les volumes produits ou de promouvoir une facture équitable basée sur la production réelle [20].

Cette organisation essentiellement réactive, centrée sur la collecte freine l'évolution vers une économie circulaire fondée sur la réduction, le recyclage et la valorisation énergétique.

### **1.5.2 Intégration des technologies dans la gestion des déchets**

L'intégration des technologies numériques dans la gestion des déchets transforme en profondeur la manière dont les villes planifient et optimisent leurs opérations. Grâce à l'internet des objets (IoT), il est désormais possible d'obtenir des données en temps réel sur le niveau de remplissage des bacs, la localisation des véhicules, ou encore l'identité des usagers via des systèmes RFID [21]. Ces informations, transmises à une plateforme web, permettent d'automatiser les tournées de collecte, d'améliorer la traçabilité et d'évaluer la performance des services municipaux.

Les bénéfices majeurs de cette digitalisation sont multiples :

- Réduction des coûts logistiques, grâce à la planification optimisée des itinéraires [19].
- Renforcement de la transparence dans la gestion et la facturation des services [20].
- Responsabilisation des citoyens notamment via des mécanismes de tarification au poids (principe du « pollueur-payeur ») [22].
- Production d'indicateurs décisionnels pour la planification urbaine environnementale [21].

#### **1.5.2.1 Exemples d'applications réussies**

- En Zambie, la ville de Lusaka a expérimenté un système de collecte intelligente reposant sur des capteurs ultrasoniques et le suivi GPS des camions. Cette initiative, pilotée par la *Zambia Environmental Management Agency (ZEMA)*, a permis de

réduire de 25% les trajets à vide et d'augmenter la couverture des zones périurbaines [19].

- Au Rwanda, Kigali s'est distingué par l'introduction d'un système de tri et de pesée électronique appuyé sur une plateforme numérique de suivi. Ce projet, mené par la *Rwanda Environnement Management Authority (REMA)*, a favorisé la création des microentreprises locales dans la collecte en fonction et le recyclage tout en améliorant les taux de valorisation des déchets [20].
- En Inde, des villes comme Pune et Hyderabad ont adopté des poubelles intelligentes connectées via réseau LoRaWAN. Les données de remplissage sont centralisées pour automatiser la planification des tournées, réduisant de 30 % la consommation de carburant et les émissions associées [21].
- En Europe, des métropoles comme Barcelone et Amsterdam ont intégré les capteurs IoT dans leur politique de « *smart city* », permettant d'adapter la fréquence de collecte en fonction des besoins réels et de réduire la surcharge des points de dépôt [22], [23].

Si la digitalisation et la connectivité ont permis d'améliorer la planification et la supervision des opérations, elles reposent néanmoins sur des dispositifs physiques capable de collecter, traiter et transmettre les données depuis le terrain.

C'est à ce stade que l'automatisation et le système embarqués entrent en jeu. Ils constituent la couche opérationnelle de ses solutions intelligentes : les capteurs détectent, les microcontrôleurs analysent et les actionneurs exécutent.

Dans la section 1.5, nous examineront les rôles de ce système dans la conception d'une poubelle publique intelligente depuis l'acquisition des données (RFID, pesée), jusqu'à leur transmission vers une interface web de suivi.

## 1.6 Généralités sur les systèmes embarqués et Internet des Objets

### 1.6.1 Les systèmes embarqués

Les systèmes embarqués (ou *Embedded systems* en anglais) désignent des dispositifs électroniques et informatiques autonomes, conçus pour exécuter une tâche bien précise, souvent avec des contraintes temps réel. Ils se distinguent des ordinateurs généralistes par leurs caractère spécialisé, discret et optimisé pour la fiabilité et la consommation énergétique.

Ils sont omniprésents dans la vie quotidienne : on en croise des dizaines chaque jour sans nécessairement en avoir conscience, que ce soit dans les téléphones, cartes électroniques, électroménagers (réfrigérateurs, climatiseur, fours à micro-ondes) ou encore dans les systèmes plus complexes tels que les automobiles, les trains à grande vitesse, les avions ou les robots industriels [24].

On distingue généralement deux grandes catégories [24] :

- *Les systèmes embarqués au sens strict*, associés à des environnements mobiles avec des contraintes temps réel (ex. : véhicule, aéronautique, robotique).
- *Le systèmes enfouis*, intégré dans les équipements fixes sans exigence forte de mobilités ou de temps réel (ex. : électroménager, dispositif domotiques).

Ces systèmes combinent de l'électronique plus ou moins complexe (capteurs, actionneurs, modules de communication) et une gestion du traitement automatique des données plus ou moins évolué (microcontrôleurs, logiciels embarqués). Ils constituent aujourd'hui l'ossature de l'informatique diffuse ou ubiquitaire, appelé à se développer encore d'avantage dans les prochaines années.

Ces systèmes en rendant les objets capables de percevoir, traiter et réagir, constituent également la base matérielle de l'internet des objets (IoT), où leur interconnexion permet de démultiplier les possibilités d'application, notamment dans la gestion urbaine et environnementales.

### 1.6.2 Internet des objets (IoT)

L'Internet des Objets (IoT, *Internet of Things*) désigne un réseau d'objets physiques interconnectés, capables de collecter, traiter et échanger des données grâce à des capteurs, des

microcontrôleurs et des modules de communication [25]. Contrairement aux systèmes informatiques traditionnels centrés sur l'utilisateur, l'IoT vise à rendre les objets du quotidien intelligents et communicants. Il s'applique dans de nombreux domaines tels que la santé (télésurveillance médicale), la mobilité (véhicules connectés), l'énergie (compteurs intelligents), et la gestion urbaine (villes intelligentes).

Le fonctionnement de l'IoT peut se résumer en quatre étapes clés [26]:

1. *La capture des données* : les capteurs mesurent des paramètres physiques (température, niveau de remplissage, poids, humidité, etc.)
2. *Transmission de données* : via des réseaux de communication (*Wi-Fi, 5G, LoRaWAN, zigbee, etc.*)
3. *Traitement des données* : des algorithmes analysent ces données afin de déclencher une action (*par exemple : allumer un dispositif, générer une alerte*).
4. *Exploitation des données* : les données agrégées fournissent des indicateurs utiles à la prise de décision et à l'optimisation du processus.

Dans le domaine spécifique de la gestion des déchets, l'IoT se révèle particulièrement prometteur. En équipant les conteneurs de capteurs de niveau ou de cellules de pesée, il est possible de planifier les tournées de collecte en fonction des besoins réels, de réduire les coûts opérationnels et de limiter l'impact environnemental. L'usage de technologies comme la RFID renforce en outre la traçabilité et favorise une responsabilisation citoyenne [27].

Dans cette dynamique, il convient également de souligner le rôle de l'automatisme, qui constitue le prolongement naturel de l'IoT. En effet, si l'IoT permet de collecter, transmettre et analyser des données issues des capteurs, c'est grâce aux systèmes automatisés que ces informations se traduisent en actions concrètes : ouverture ou fermeture d'un couvercle, déclenchement d'une pesée, envoi d'une alerte ou encore enregistrement automatique des données dans une base centrale. L'automatisme agit ainsi comme le maillon opérationnel qui relie les données numériques aux actions physiques, garantissant une gestion plus fluide et réactive des déchets.

### 1.6.3 Automatisation et systèmes de contrôle

L'*automatisation* désigne l'ensemble des techniques permettant à un système d'exécuter une ou plusieurs tâches sans intervention humaine directe, en s'appuyant sur des capteurs, des actionneurs et des dispositifs de commande. Il repose sur le principe de la *boucle de rétroaction (feedback loop)*, où les informations mesurées sont continuellement comparées à des consignes prédéfinies afin de corriger les écarts et maintenir le fonctionnement attendu [28].

Dans le contexte de l'Internet des Objets (IoT), l'automatisation joue un rôle central en traduisant les données collectées par les capteurs en *actions physiques* : ouverture automatique d'un couvercle, déclenchement d'une pesée, activation d'un moteur, ou encore envoi d'une notification en cas de dysfonctionnement. Ces systèmes peuvent être programmés pour répondre à des scénarios spécifiques, permettant ainsi une gestion plus rapide, fiable et prédictive des processus.

Dans le cas de la gestion des déchets, l'automatisation appliquée à une *poubelle intelligente* permet de réduire les interventions humaines, d'améliorer l'hygiène, et d'assurer une *traçabilité immédiate* des opérations. Couplé à l'IoT, il ouvre la voie à des solutions où la *collecte des données* et leur *exploitation se traduisent directement en actions correctives*, rendant le système plus réactif et durable.

### 1.6.4 Réseaux de communication dans l'IoT

Comme souligné précédemment, les systèmes automatiques assurent des fonctions locales de commande et d'exécution. Toutefois, pour qu'ils puissent être intégrés dans une logique d'*Internet des Objets (IoT)*, ils doivent être capables d'*échanger des informations* avec d'autres dispositifs et avec une plateforme centrale. Les réseaux de communication constituent ainsi le *canal essentiel* reliant la collecte locale des données à leur exploitation globale.

Plusieurs types de réseaux sont utilisés dans l'IoT, en fonction des contraintes de débit, de consommation énergétique et de couverture [29]:

- *Wi-Fi et réseaux cellulaires (3G, 4G, 5G)* : adaptés aux environnements urbains, ils offrent un débit élevé et une couverture large, permettant la transmission rapide de données volumineuses.

- *Réseaux bas débit et longue portée (LoRa, Sigfox, NB-IoT) : conçus pour les capteurs autonomes, ils consomment peu d'énergie et garantissent une connectivité stable même dans des zones éloignées.*
- *Protocoles de proximité (Bluetooth Low Energy, Zigbee, RFID passif, MQTT) : utilisés pour des communications à courte distance, par exemple entre un utilisateur et un dispositif intelligent.*

Dans le cadre de la gestion intelligente des déchets, ces réseaux permettent de transmettre en temps réel des données telles que le niveau de remplissage, le poids des déchets ou encore l'identité de l'utilisateur via RFID, vers une plateforme centralisée. Cela rend possible une optimisation des tournées de collecte, une meilleure allocation des ressources et une traçabilité renforcée des opérations [29].

### **1.6.5 Les Microcontrôleurs : Cœur de systèmes embarqués**

Dans les systèmes embarqués dédiés à l'Internet des objets (IoT), le microcontrôleur constitue l'élément central chargé de coordonner l'ensemble des opérations du dispositif. Il assure la collecte des données issues des capteurs, leur traitement, ainsi que la communication avec des plateformes externes ou des interfaces de supervision [30].

Les plateformes de prototypage telles qu'Arduino ont longtemps été utilisées dans l'apprentissage et la conception de systèmes embarqués en raison de leur simplicité d'utilisation et de l'importante communauté de développeurs qui les accompagne [31].

Toutefois, l'évolution des applications IoT nécessitant davantage de puissance de calcul et de connectivité a favorisé l'émergence de microcontrôleurs plus performants, tels que l'ESP32, qui intègrent nativement des fonctionnalités de communication sans fil comme le Wi-Fi et le Bluetooth [32]. Autour du microcontrôleur gravitent plusieurs composants essentiels permettant d'interagir avec l'environnement. Les capteurs assurent la collecte d'information physiques, notamment la mesure du poids, la détection de niveau ou encore la surveillance de certains gaz issus de la décomposition. Par ailleurs, des technologies d'identification, telles que les systèmes RFID, ou le code optique, peuvent être utilisés pour associer les informations collectées à un utilisateur spécifique. Enfin, certains systèmes peuvent intégrer des actionneurs

destinés à automatiser certaines fonctions mécaniques, comme l'ouverture ou la fermeture d'une porte, bien que leur utilisation dépende souvent des contraintes énergétiques et opérationnelles du dispositif.

Ainsi, le microcontrôleur joue un rôle central dans l'architecture des systèmes intelligents en orchestrant la communication entre capteurs, dispositifs d'identification et éventuels mécanismes d'actionnement, tout en assurant la transmission des données vers les infrastructures numériques.

## **1.7 Conclusion partielle**

La revue de la littérature a permis de situer la problématique des déchets urbains dans son contexte scientifique et technique. Nous avons d'abord mis en lumière l'ampleur et la criticité des défis de gestion des déchets en Afrique subsaharienne, défis qui se répercutent de manière significative sur l'environnement et la santé publique, particulièrement dans le contexte spécifique de la RDC et la ville de Goma. Cette analyse documentaire a confirmé que les systèmes actuels manquent d'efficacité et demeurent rudimentaires. Parallèlement, nous avons exploré les avancées technologiques récentes, notamment celles basées sur l'électronique embarquée et l'Internet des Objets (IoT). Il ressort de cette exploration que ces technologies offrent une perspective concrète et optimale pour moderniser les opérations de collecte et favoriser la valorisation des déchets. En définitive, cette analyse a établi la nécessité d'introduire des solutions technologiques pour répondre aux lacunes identifiées et pour guider le développement de la solution proposée dans ce travail.

## **Chapitre 2**

### **Conception du système de la poubelle**

#### **2.1 Introduction partielle**

Ce chapitre est consacré à la conception du système proposé dans le cadre de ce travail. S'appuyant sur les constats et enseignements issus de la revue de la littérature, il vise à définir les fondations techniques et fonctionnelle nécessaires à la réalisation d'un prototype de poubelle connectée. Dans un premier temps un cahier de charge est établi afin de préciser les besoins identifiés, les contraintes techniques et les objectifs fonctionnels du système. Ensuite, une modélisation conceptuelle est réalisée pour définir la logique logicielle du dispositif. Enfin, le chapitre présente l'architecture matérielle et justifie les choix technologiques retenus, établissant ainsi un équilibre entre la conception immatérielle et la structure physique du système.

#### **2.2 Cahier des charges du système**

Dans un projet combinant informatique et électronique comme celui que propose ce travail, il devient nécessaire de définir clairement et d'une manière concise ce que l'on cherche à mettre en place dans un cahier des charges qui sert par la suite de guide pour la conception. Le cahier des charges est ainsi un document qui définit clairement une brève présentation du projet tout en présentant ses spécifications fonctionnelles et ses spécifications non fonctionnelles [33].

##### **2.2.1 Présentation du projet**

Dans le contexte actuel de la ville de Goma, la gestion des déchets demeure un défi majeur malgré les efforts entrepris par les autorités locales et certaines structures privées. Le présent projet s'inscrit dans une démarche d'innovation technologique visant à concevoir une poubelle connectée à usage public, capable de quantifier, identifier et transmettre automatiquement les données relatives aux déchets déposés.

L'objectif principal est de proposer une solution plus avancée pour la gestion des déchets, en introduisant la traçabilité et en facilitant le suivi numérique des dépôts, tout en réduisant la dépendance aux méthodes manuelles de suivi et de collecte. À plus long terme, cette initiative vise également à contribuer à la préparation de la ville de Goma à une transition vers une gestion durable des déchets, dans la perspective d'une ville intelligente.

La conception de ce dispositif nécessite de définir clairement les fonctionnalités attendues du système, les contraintes auxquelles il est soumis, ainsi que son architecture globale.

### **2.2.2 Spécifications fonctionnelles**

Les spécifications fonctionnelles sont l'ensemble des fonctionnalités que le système doit offrir. Ainsi, le dispositif que propose ce travail doit répondre à un ensemble des fonctions essentielles résumées comme suit :

- *Identification des utilisateurs* : chaque usager est reconnu par une carte RFID avant le dépôt de ses déchets, ce qui permet de lier chaque action à un profil spécifique.
- *Mesure du poids des déchets* : une cellule de pesée électronique intégrée à la base du conteneur mesure la masse de déchets déposés.
- *Enregistrement automatique des données* : après chaque dépôt, les informations suivantes sont enregistrées : *identifiant de la poubelle, identifiant de l'utilisateur, poids du dépôt date et heure.*
- *Transmission des données* : les informations sont transmises automatiquement vers une plateforme web à l'aide d'un module de communication (Wi-Fi ou GSM), en cas de perte de réseau les informations sont d'abord stockées sur une mémoire locale avant d'être transférer vers la plateforme web dès le rétablissement de la connexion.
- *Suivi des données via une interface web* : les administrateurs ou structures d'assainissement peuvent consulter, analyser les données afin d'améliorer la

planification des tournées de collecte, les usagers des poubelles peuvent voir la courbe d'évolution de leur production des déchets enfin de corriger leurs habitudes.

### 2.2.3 Spécifications non fonctionnelles

Les spécifications non fonctionnelles décrivent les qualités et caractéristiques globales que le système doit garantir, indépendamment de ses fonctions opérationnelles. Dans le cadre de ce projet, les exigences suivantes sont retenues :

- **Sécurité des données** : Le système doit assurer la protection des informations collectées (identifiants RFID, poids des déchets, horodatage) contre toute consultation, modification ou suppression non autorisée. Des mécanismes d'authentification et de contrôle d'accès doivent être intégrés, notamment au niveau de l'interface web.
- **Efficacité énergétique** : Le dispositif doit fonctionner avec une consommation énergétique minimale. L'absence de motorisation pour l'ouverture du couvercle, combinée à l'utilisation d'une batterie rechargeable ou d'une source d'alimentation locale destinée à alimenter uniquement les composants électroniques à faible consommation, doit garantir une autonomie suffisante du système.
- **Ergonomie et hygiène** : Le système doit être simple et confortable à utiliser, sans exposer les usagers à des risques d'insalubrité. L'emplacement du lecteur RFID et de la cellule de pesée doit permettre une utilisation fluide et hygiénique.
- **Convivialité** : Tant le dispositif physique que l'interface web doivent être intuitifs. L'accès aux fonctionnalités de base ne doit pas nécessiter de compétences techniques avancées, afin de garantir une adoption rapide par les utilisateurs et les opérateurs de collecte.
- **Fiabilité** : le système doit fournir des mesures cohérentes et précises, tant pour la lecture RFID que pour la pesée. Les données transmises doivent refléter fidèlement les événements enregistrés, même en cas d'interruption temporaire de la connexion réseau.
- **Accessibilité** : l'interface web doit être conçue de manière à être accessible depuis n'importe quel navigateur.
- **Les matériaux** : doivent être peu coûteux et facilement accessible sur le marché local.

- **La maintenabilité** : la conception globale doit permettre le remplacement rapide des capteurs ou du microcontrôleur.
- **La scalabilité** : le dispositif doit être pensé pour être évolutif et facilement reproductible ; il doit pouvoir être déployé à plus grande échelle, que ce soit dans multiples quartiers de Goma ou dans d'autres villes, sans nécessiter de modifications majeures de son architecture.

## 2.3 Architecture du système

### 2.3.1 Présentation du système

L'architecture du système de poubelle connectée proposée repose sur une approche modulaire et distribuée, combinant des composants matériels (capteurs, microcontrôleur, module de communication) et logiciel (interface web et base de données).

Chaque module assure une fonction spécifique tout en interagissant avec les autres à travers une logique d'échange des données. Cette conception garantit la simplicité, la fiabilité, et la possibilité d'évolution du système.

Le dispositif physique est chargé de collecter et traiter les données locales (identifiant utilisateur, poids, date et heure), tandis que la plateforme web centralise et visualise les informations en temps réel, facilitant ainsi la prise de décision pour les services d'assainissement. La figure 2.1 illustre le schéma bloc de l'architecture générale du système :

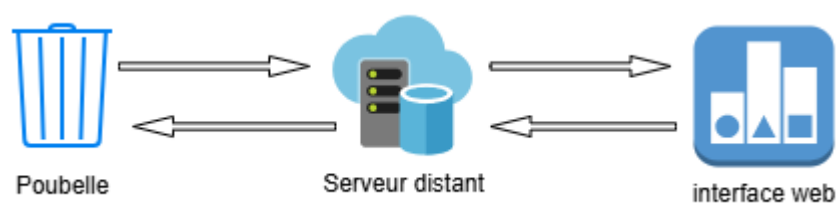


**Figure 2.1 Schéma bloc de l'architecture générale du système**

### 2.3.2 Logique de fonctionnement du système

Le fonctionnement général du système s'articule en plusieurs étapes successives :

1. **Identification** : L'utilisateur approche sa carte RFID du lecteur, qui envoie son identifiant au microcontrôleur.
2. **Validation** : le système vérifie si l'utilisateur est enregistré.
3. **Pesée** : après dépôt du déchet, la cellule de charge mesure le poids et transmet la valeur au microcontrôleur.
4. **Enregistrement** : le microcontrôleur compile les données (ID, poids, date, heure).
5. **Transmission** : les données sont envoyées via Wi-Fi ou GSM vers le serveur.
6. **Stockage** : Le serveur enregistre les données dans la base de données.
7. **Visualisation** : la plateforme web affiche les informations dans un tableau de bord accessibles aux opérateurs et usagers de la poubelle.

La figure 2.2 illustre la logique d'exécution des tâches sur le système.

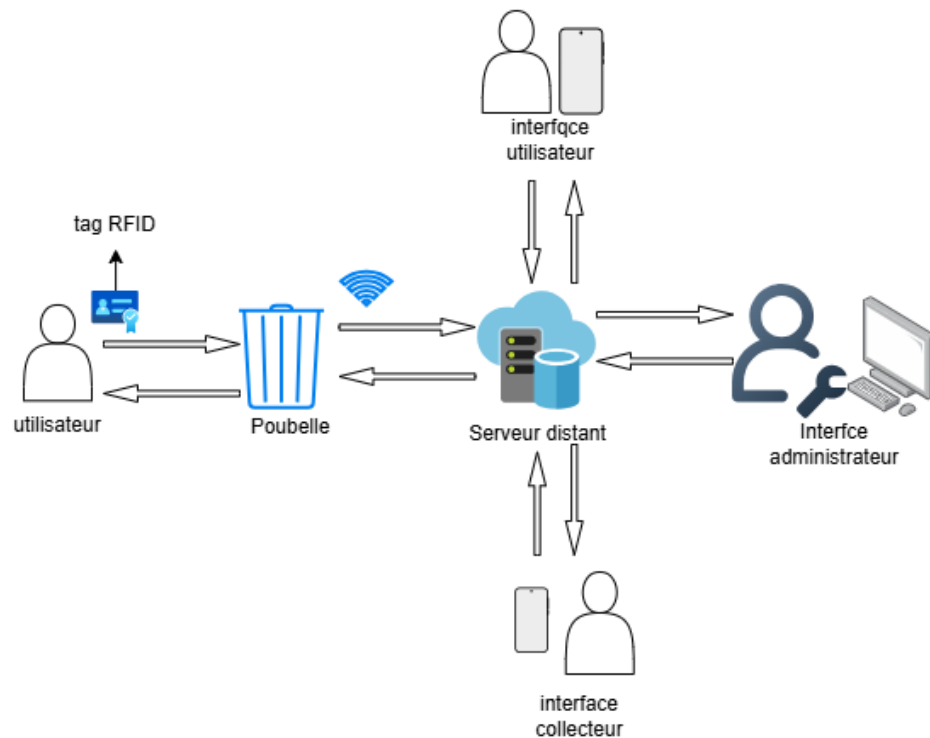


*Figure 2.2 logique d'exécution des tâches*

## 2.4 Modélisation et Conception du système

La conception du système proposé repose l'utilisation de langages de modélisation graphique permettant de représenter de manière abstraite sa structure, son comportement et ses interactions avant toute implémentation. Dans ce travail deux langages sont retenus : SysML et UML.

SysML (Systems modeling Language) est utilisé pour la modélisation globale du système. Il permet de représenter aussi bien les aspects fonctionnels que structurelles du système, en intégrant les exigences, les interactions entre sous-systèmes ainsi que les contraintes techniques.

UML (Unified Modeling Language) est quant à lui utilisé de manière ciblée, principalement pour la modélisation des données à travers le diagramme de classe. Ce diagramme permet de

Décrire la structure logique de la base de données, les entités, leurs attributs et les relations qui les lient [34].

Le choix de SysML et UML se justifie par la nature et la complexité du système étudié.

SysML est privilégié pour la modélisation système car il permet : de représenter des éléments non strictement logiciels, d'intégrer explicitement les exigences du système et d'assurer leur traçabilité avec l'architecture, de modéliser les interactions multidisciplinaires et contraintes techniques.

UML, bien que limité pour la modélisation globale d'un système embarqué, reste pertinent pour la conception logique de la base de données Grâce à son diagramme de classes, largement reconnu pour la modélisation des structures des données.

Ainsi, SysML est utilisé pour la modélisation fonctionnelle et structurelle du système dans son ensemble tandis que UML complète cette approche pour la modélisation des données, garantissant une conception cohérente est structurée avant la phase de réalisation.

Pour ce qui est de la modélisation, elle constitue l'étape charnière entre la définition des besoins et la réalisation technique. Elle permet de traduire le cahier des charges en une série de vues graphiques normalisées pour assurer la cohérence du système.

### **2.4.1 Diagramme d'exigences**

Le diagramme d'exigences est le premier niveau de modélisation du système. Son rôle est de formaliser les besoins identifiés dans le cahier des charges en les hiérarchisant. Chaque bloc d'exigence définit une caractéristique ou une contrainte que le prototype final doit impérativement satisfaire [34].

Le diagramme de la figure 2.4 est organisé de manière hiérarchique. L'exigence globale est décomposée en quatre catégories principales pour structurer la conception :

- *Les exigences fonctionnelles*, définissent les services rendus à l'utilisateur (identification, pesage, transmission).
- *Les exigences techniques*, précisent les contraintes matérielles et énergétiques.

- Les exigences de maintenances, garantissent la pérennité du dispositif à Goma)
- Les contraintes techniques, décrivent les contraintes auxquelles se heurtent le système.

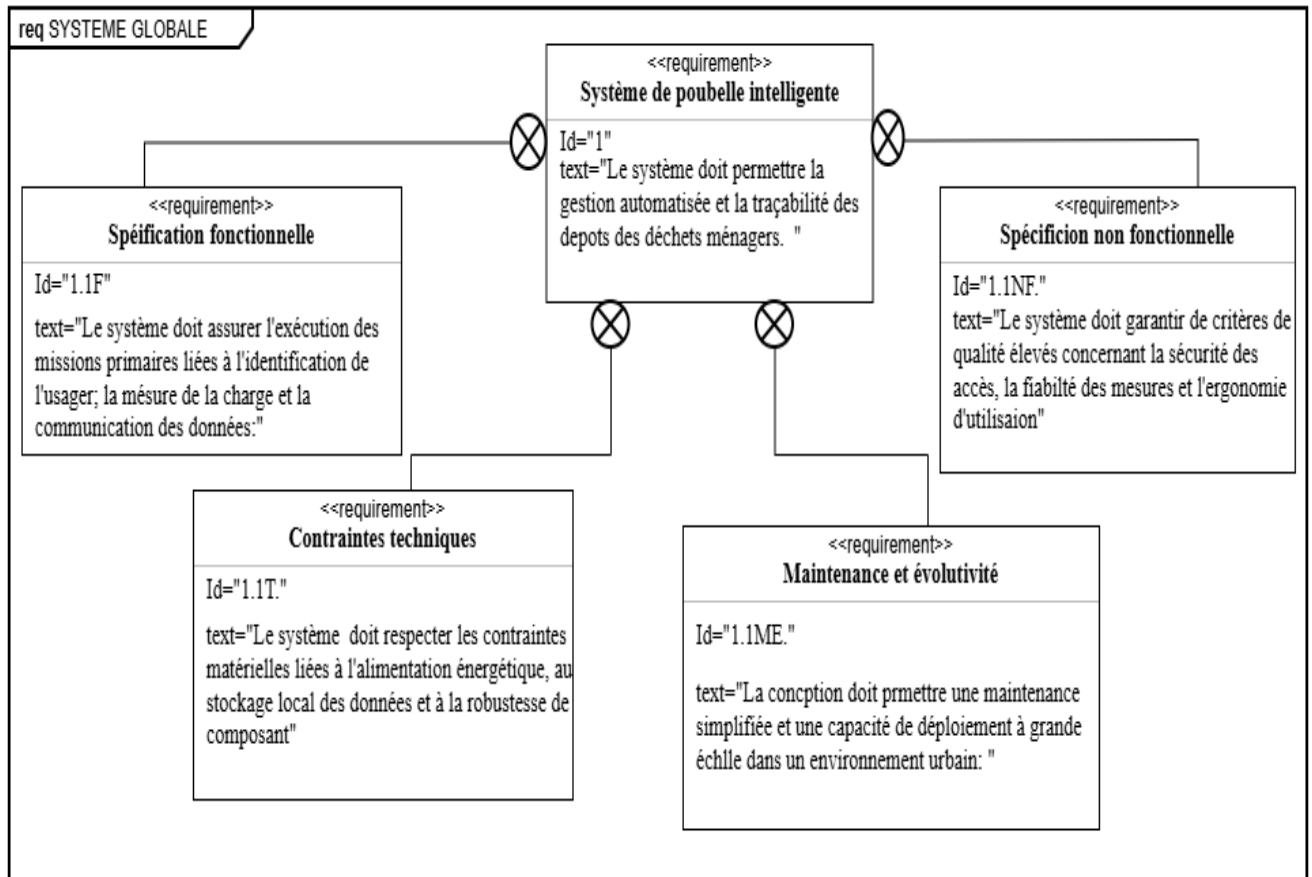


**Figure 2.3 Diagramme globale d'exigences du système**

Le diagramme d'exigences global, présenté à la Figure 2.3, illustre la structure de haut niveau du système. L'exigence racine, centrée sur la gestion des déchets, est décomposée en quatre grandes catégories de services et des contraintes. Cette organisation hiérarchique permet de s'assurer que chaque aspect du projet, qu'il soit fonctionnel, technique ou lié à la maintenance concourt à l'objectif principal de traçabilité et d'efficacité environnementale. Cette vue d'ensemble sert de fondation aux spécifications détaillées présentée dans les section 2.1.2 et 2.1.3.

## 2.4.2 Diagrammes d'exigences détaillés

Pour plus de clarté quelques blocs du diagramme d'exigences globales sont détaillés en sous diagrammes d'exigences notamment :

- Le diagramme détaillé d'exigence fonctionnelles (figure 2.4)
- Le diagramme détaillé des exigences non fonctionnelles (figure 2.5)
- Le diagramme détaillé des exigences lié aux contraintes techniques (figure 2.6)

## 2.4.3 Diagramme d'exigences fonctionnel

Le diagramme (figure 2.4) présente ici est une décomposition du bloc spécification fonctionnelles dont l'ID est 1.1F dans la Figure 2.3. Il a pour but démontrer clairement les exigences remplies dans ce bloc.

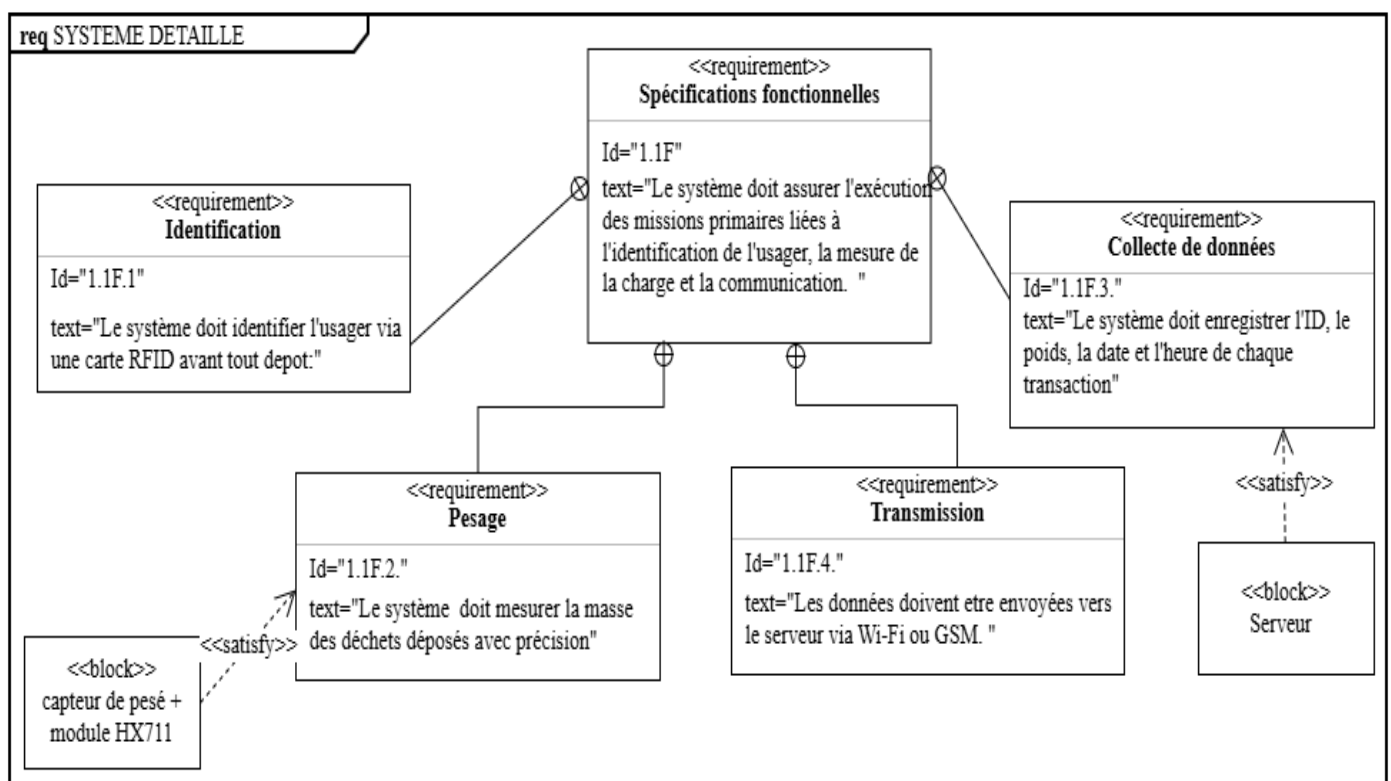


Figure 2.4 Diagramme d'exigences fonctionnelles

Ce diagramme de la Figure 2.4, détaille les fonctions de service que le prototype doit impérativement assurer pour l'utilisateur final. L'interaction débute par l'identification (RFID), la précision du pesage et l'automatisation de l'enregistrement garantissant l'intégrité des informations collectés. Enfin l'exigence de transmission souligne l'aspect connecté du dispositif, transformant une poubelle classique en un objet de l'internet des objets (IoT) capable de communiquer en temps réel avec un serveur distant.

#### 2.4.4 Diagramme d'exigence non fonctionnelles

Le diagramme qu'illustre la Figure 2.5 présente ici une décomposition du bloc spécification non fonctionnelles dont l'ID est 1.1NF dans la Figure 2.3. Il a pour but démontrer clairement les exigences remplies dans ce bloc.

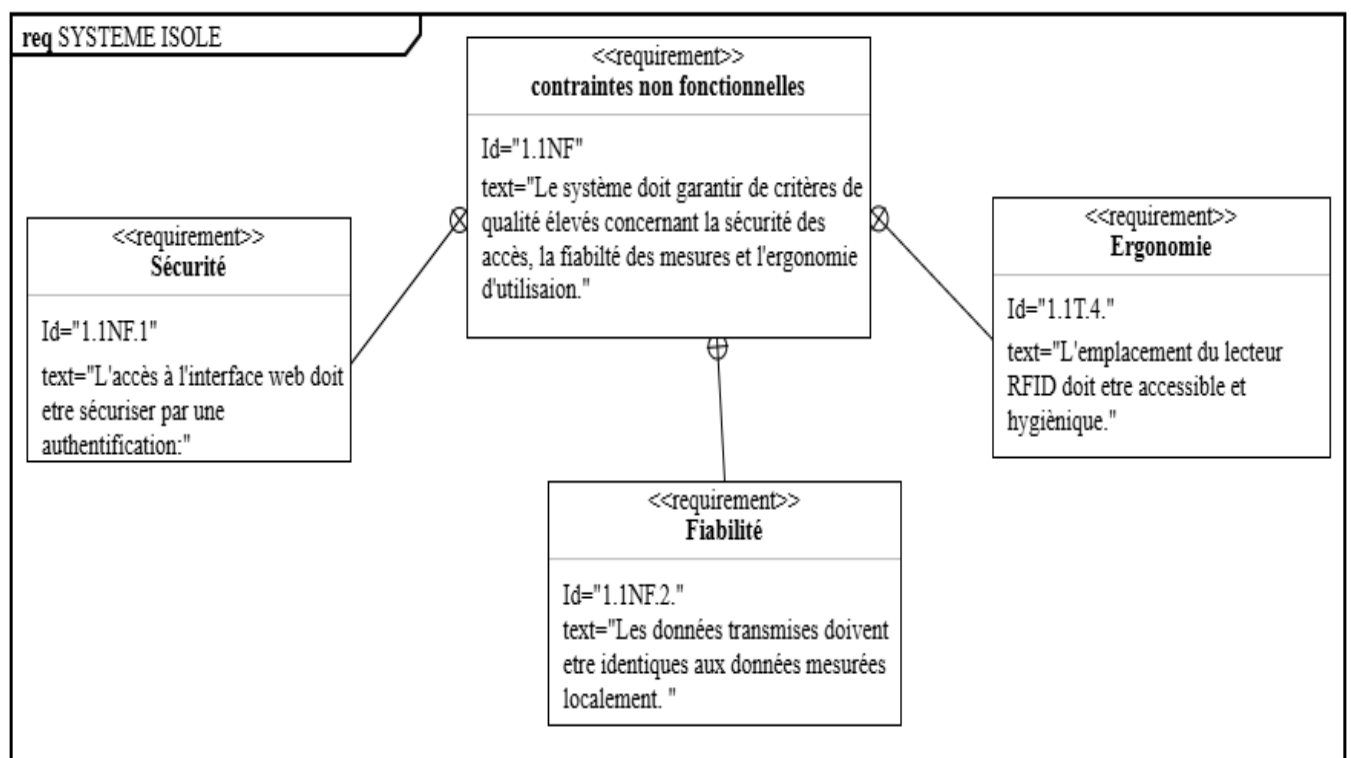


**Figure 2.5 Diagramme d'exigence non fonctionnelles**

Comme le montre la Figure 2.5, le diagramme lié au bloc d'exigence de maintenabilité se concentre sur la viabilité à long terme du projet. Les exigences de sécurité garantissent la

protection des données des usagers, tandis que les critères de maintenabilité imposent une conception modulaire. L'objectif est de permettre un remplacement aisé des composants (capteurs ou microcontrôleurs) par des techniciens locaux, favorisant ainsi l'appropriation technologiques et la pérennité du dispositif dans une perspective de ville durable.

## 2.4.5 Diagramme d'exigence lié aux contraintes techniques

Le diagramme ici présenté à la Figure 2.6, décompose le bloc « contraintes techniques » dont l'ID est 1.1T dans la Figure 2.4. Il a pour but de démontrer clairement les exigences remplies dans ce bloc.

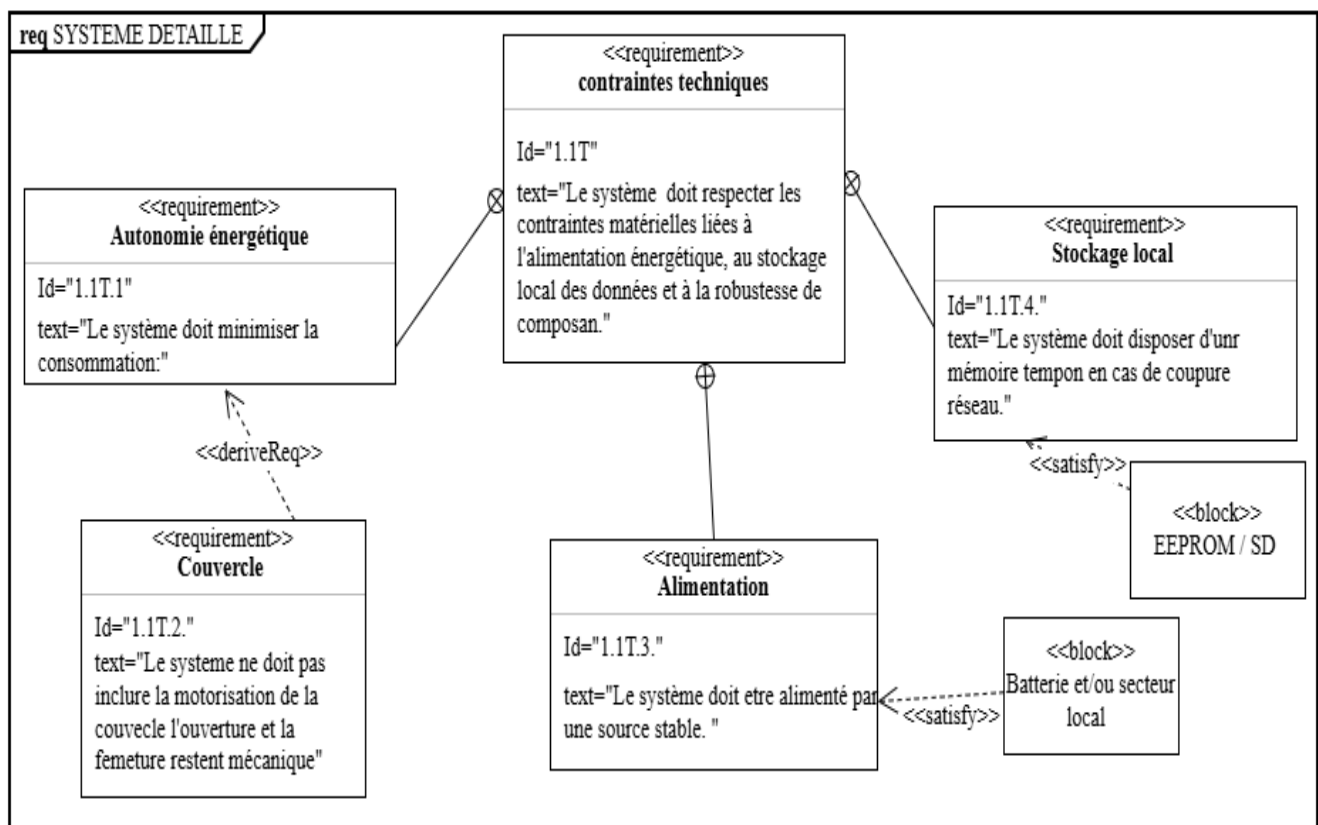


**Figure 2.6 Diagramme d'exigences contraintes techniques**

Les exigences techniques modélisées à la Figure 2.6, reflètent les défis liés à l'environnement de déploiement, particulièrement dans le contexte urbain de Goma. L'accent est mis sur

l'efficacité énergétique, justifiant le choix d'une ouverture mécanique pour préserver l'autonomie de la batterie. Les contraintes de stockage local répondent au besoin de résilience du système face aux instabilités potentielles de réseaux Wi-Fi ou GSM, assurant qu'aucune donnée de pesée ne soit perdue lors d'une éventuelle déconnexion.

Une fois ces exigences formellement établies, il convient de définir le périmètre d'interaction du système avec son environnement extérieur via le diagramme de contexte.

#### **2.4.6 Diagramme de contexte**

Après avoir défini les exigences auxquelles le dispositif doit répondre, il est impératif de délimiter le périmètre d'intervention du système. Le diagramme de contexte SysML, permet de visualiser la boîte noire du système en identifiant précisément ses frontières. Cette étape est cruciale pour répertorier l'ensemble des acteurs humain et les entités techniques externes qui interagissent avec la poubelle intelligente, ainsi que la nature de flux d'information (informations, énergie ou matière) échangés entre le dispositif et son environnement [34]. La Figure 2.8 illustre le diagramme de contexte du système.

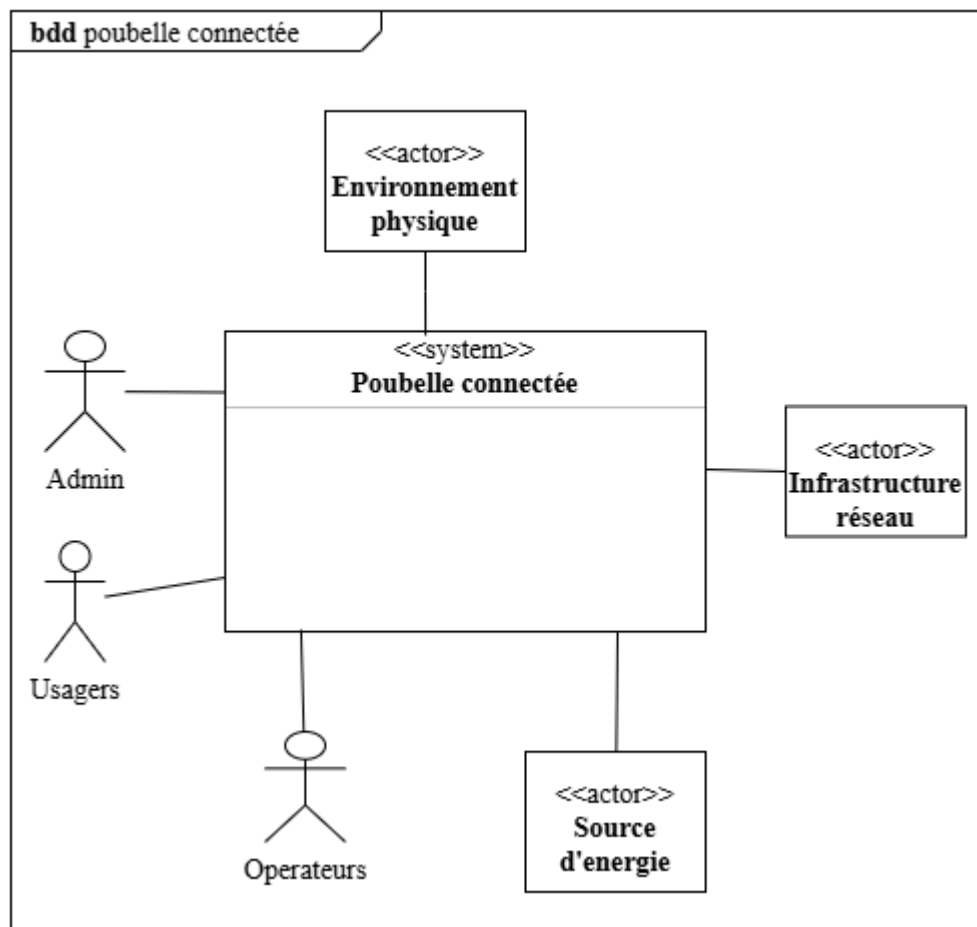


**Figure 2.7 Diagramme de contexte**

Comme illustre la Figure 2.7, le système se situe au carrefour d'interactions multidimensionnelles. Il agit comme une interface de capture pour l'utilisateur et l'environnement physique (déchets), tout en servant de source d'information pour L'administrateur et l'opérateur de collecte via l'infrastructure réseau. Ainsi l'analyse de ce diagramme met en évidence la dépendance du système vis-à-vis de deux flux critiques : l'alimentation énergétique pour sa survie opérationnelle et la connectivité réseau pour le transfert des données. Cette délimitation claire des frontières permet de passer à une analyse plus fine des rendus qui sera détaillée dans la section 2. 3.1.4 consacrée au diagramme de cas d'utilisation.

### **2.4.7 Diagramme de cas d'utilisation**

La définition du périmètre système effectuée précédemment permet désormais de définir les fonctionnalités attendues du point de vue des utilisateurs. Le diagramme de cas d'utilisation présenté à la Figure 2.8, modélise les interactions entre les acteurs et le système en précisant les services rendus par ce dernier. Pour ce projet, nous distinguons trois profils d'utilisateurs humains : l'utilisateur, l'Opérateur de collecte et l'Administrateur. Cette vue fonctionnelle assure que chaque besoin métier identifié dans le cahier des charges est traduit en une action concrète réalisable par le dispositif ou sa plateforme associée.

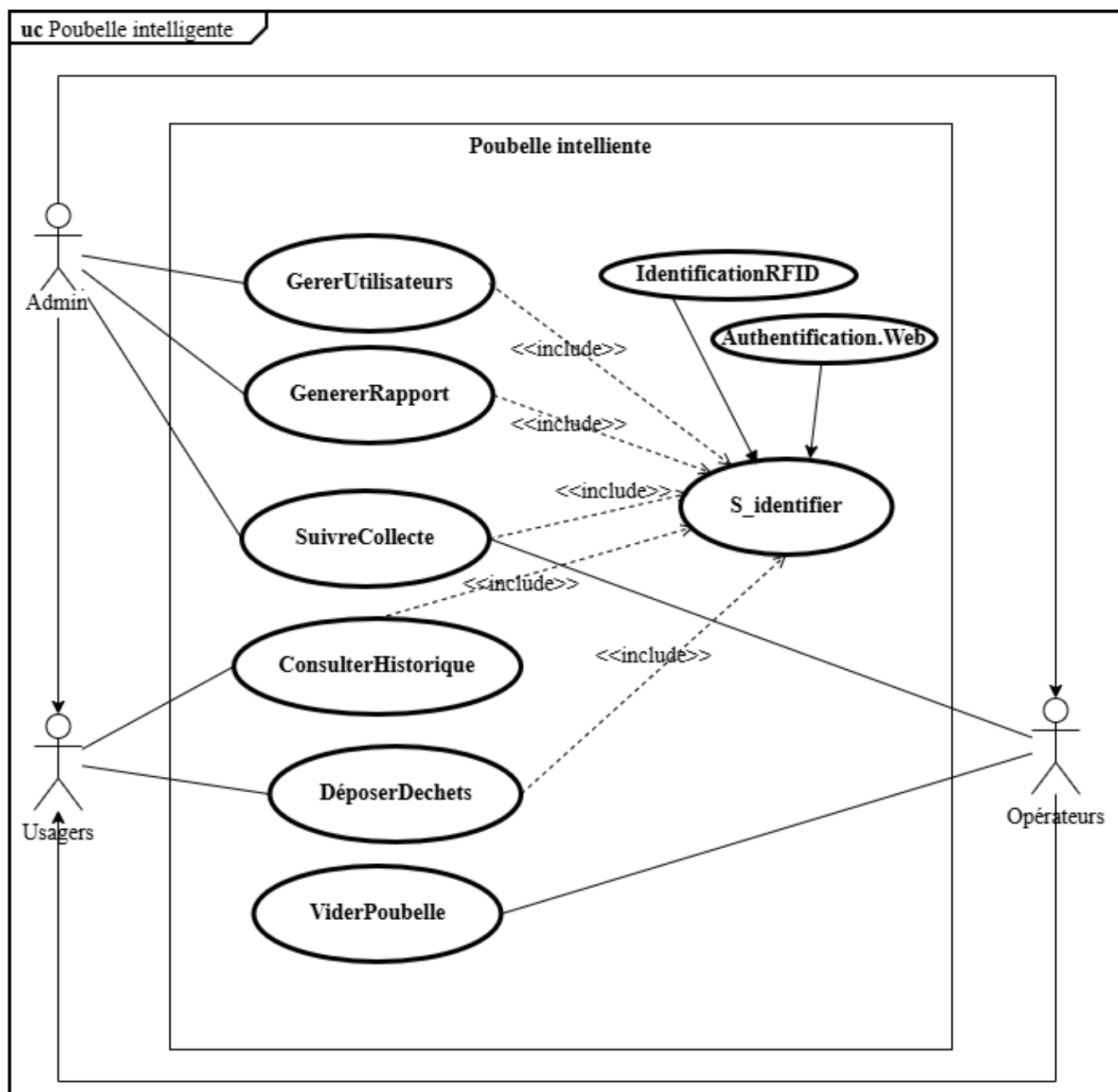


**Figure 2.8 Diagramme de cas d'utilisation**

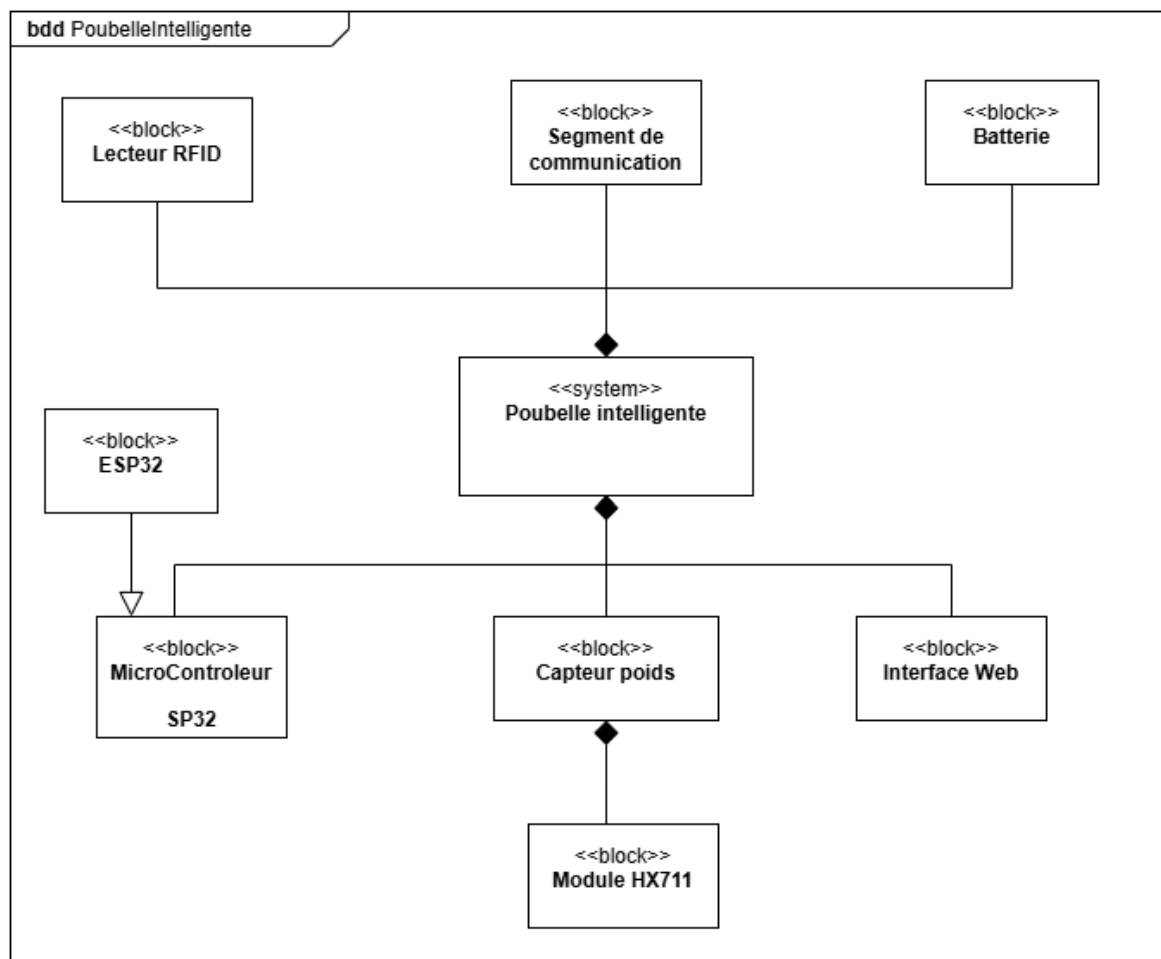
L'analyse de la Figure 2.8 révèle une répartition claire des responsabilités au sein de l'écosystème de gestion des déchets.

- *Le cycle utilisateur* : Repose sur une séquence logique : l'authentification qui est la condition nécessaire pour déposer les déchets ; la séquence est complétée par le cas d'utilisation « Consulter l'historique », offrant au citoyen une visibilité sur ces statistiques personnelles.
- *Le cycle de collecte* : L'opérateur de collecte intervient pour le vidage physique de la poubelle ce qui implique une réinitialisation de la balance du conteneur, l'opérateur a aussi la possibilité de suivre depuis son interface web l'état de remplissage de la poubelle.
- *Le cycle de supervision* : L'administrateur accède à des fonctionnalités de haut niveau telle que la gestion des comptes et l'analyse statistique, permettant une prise de décision basée sur des données réelles.
- *Le cycle général* : il est à noter que l'opérateur dispose de toutes les fonctionnalités de l'utilisateur simple du système, autant l'admin dispose de toutes les fonctionnalités de l'opérateur. Une authentification Web permet de séparer les rôles sur la plateforme web alors que la lecture de l'identifiant RFID permet d'associer chaque à déchets à un profil spécifique.

Cette modélisation fonctionnelle valide la capacité du système à répondre aux exigences de traçabilité et d'optimisation des collectes dans la ville de Goma. Elle préfigure l'organisation structurelle des composants internes qui sera détaillée dans le diagramme de définition de bloc (BDD).

#### **2.4.8 Diagramme de définition de block**

Après avoir défini les fonctionnalités attendues, il est nécessaire d'établir l'architecture matérielle et logicielle capable de les supporter. Le diagramme de définition de block (Figure 2.9) présente une vue statique et hiérarchique du système. Il décompose la poubelle intelligente en sous-système cohérents, isolant d'une part les composants physiques (capteurs, microcontrôleur, alimentation) et d'autre part les entités logicielles (base de données,



interface web). Cette décomposition permet d'identifier précisément chaque ressource technologique nécessaire à la réalisation du prototype.

La structure présentée dans la Figure 2.9 met en évidence la modularité du dispositif. Le segment de « perception » regroupe les organes sensoriels (RFID et Pesée), tandis que le segment de « Traitement » assure le rôle de cerveau central. Cette architecture modulaire est un atout majeur pour la maintenabilité du système, car elle permet le remplacement individuel de chaque bloc en cas de défaillance. Cette organisation doit être complétée par une vision des connexions internes entre ces blocs.

**Figure 2 .9 Diagramme de définition de block**

### 2.4.9 Diagramme de bloc interne

Alors que le diagramme de définition de bloc listait les composants, le diagramme de bloc interne (Figure 2.10) expose la connectivité réelle de flux qui transite au sein du dispositif. Il détaille les interfaces de communication (port) et la nature des signaux échangés (données numériques ou flux d'énergie). Ce diagramme constitue le plan de câblage logique indispensable pour garantir l'intégrité de la transmission des informations entre les capteurs et l'unité centrale.

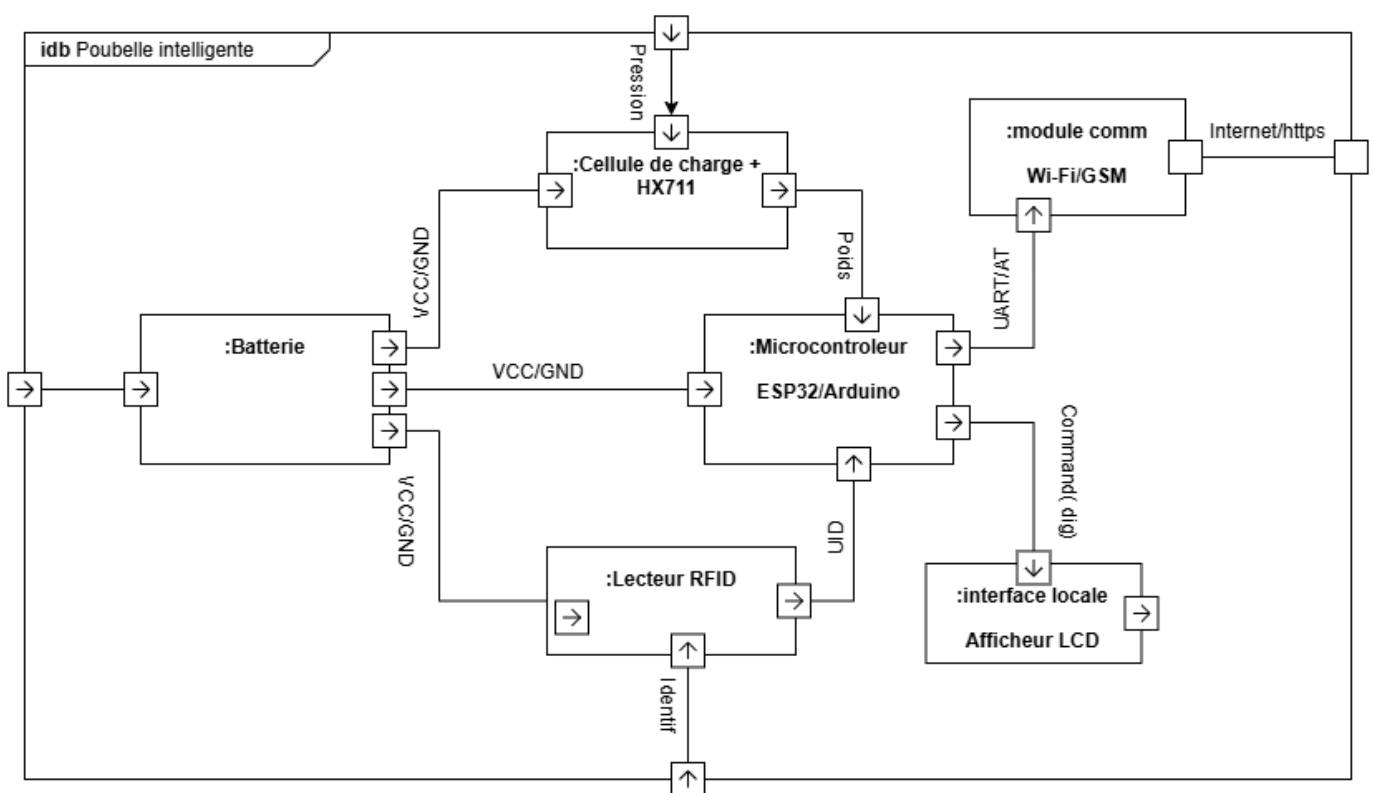


**Figure 2.10** Diagramme de bloc interne

Comme l'illustre la Figure 2.10 le microcontrôleur agit comme nœud central de communication. Le diagramme de bloc interne met en exergue l'utilisation de protocoles standards pour l'identification et le http (HyperText transfert protocole) pour la communication réseau. La séparation claire entre les flux de données et le flux de puissance (alimentation)

assure une immunité aux perturbations électromagnétiques et valide les choix de conception électrique. Cette connectivité physique étant établie, nous pouvons maintenant modéliser la dynamique temporelle des échanges lors d'un cycle d'utilisation.

## 2.4.10 Diagramme de séquence

La structure statique étant établie, il convient d'en modéliser le comportement temporel. Le diagramme de séquence présenté à la Figure 2.11, décrit la chronologie des interactions entre les composants lors d'un scénario type de dépôts de déchets. Il permet de visualiser l'ordonnancement des messages, depuis l'identification de l'utilisateur jusqu'à la confirmation de l'enregistrement des données sur le serveur. L'utilisation des barres d'activations dans ce diagramme souligne les périodes d'activité de chaque module, illustrant ainsi la gestion séquentielle des ressources du système.

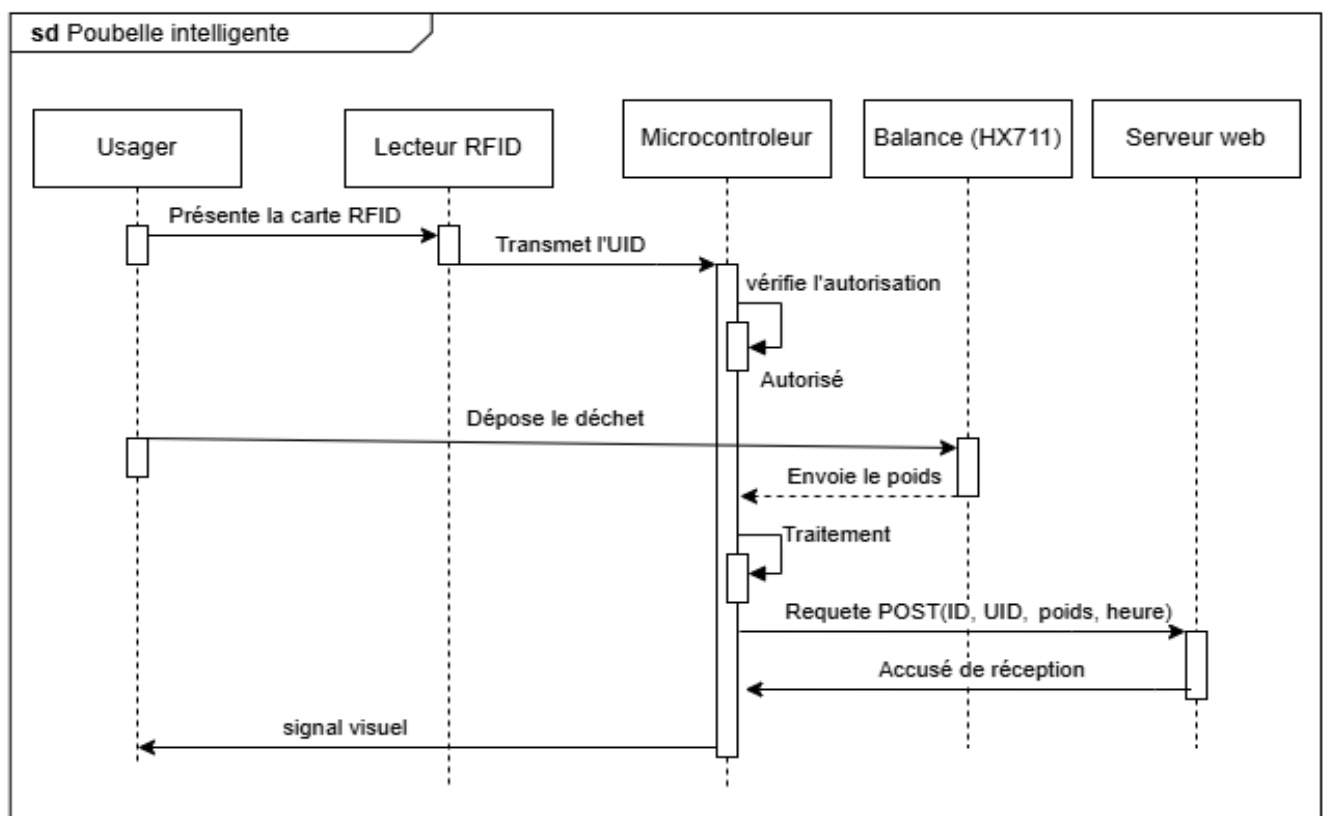


Figure 2.11 Diagramme des séquences

L'analyse de cette séquence dynamique confirme le rôle de chef d'orchestre du microcontrôleur. Ce dernier synchronise l'acquisition des données provenant des capteurs (RFID et Pesée) avant d'initier la communication vers l'API web. Ce séquençage garantit qu'aucune donnée de pesée n'est transmise sans être formellement lié à un identifiant d'utilisateur valide. Cette coordination temporelle sécurise le flux d'information et prépare la structuration des données en vue de leur stockage permanent.

#### **2.4.11 Diagramme des classes**

La finalité de la poubelle intelligente est la constitution d'une base de données fiables pour le suivi de la gestion des déchets. Le diagramme de classe UML (Figure 2.12) définit la structure logique de ces informations. En s'appuyant sur les concepts d'héritage et des spécialisations. Ce modèle organise les données relatives aux utilisateurs (Usagers, Opérateurs, Administrateurs) et aux événements de pesée, garantissant ainsi une traçabilité totale et une gestion optimisée des droits d'accès à la plateforme web.

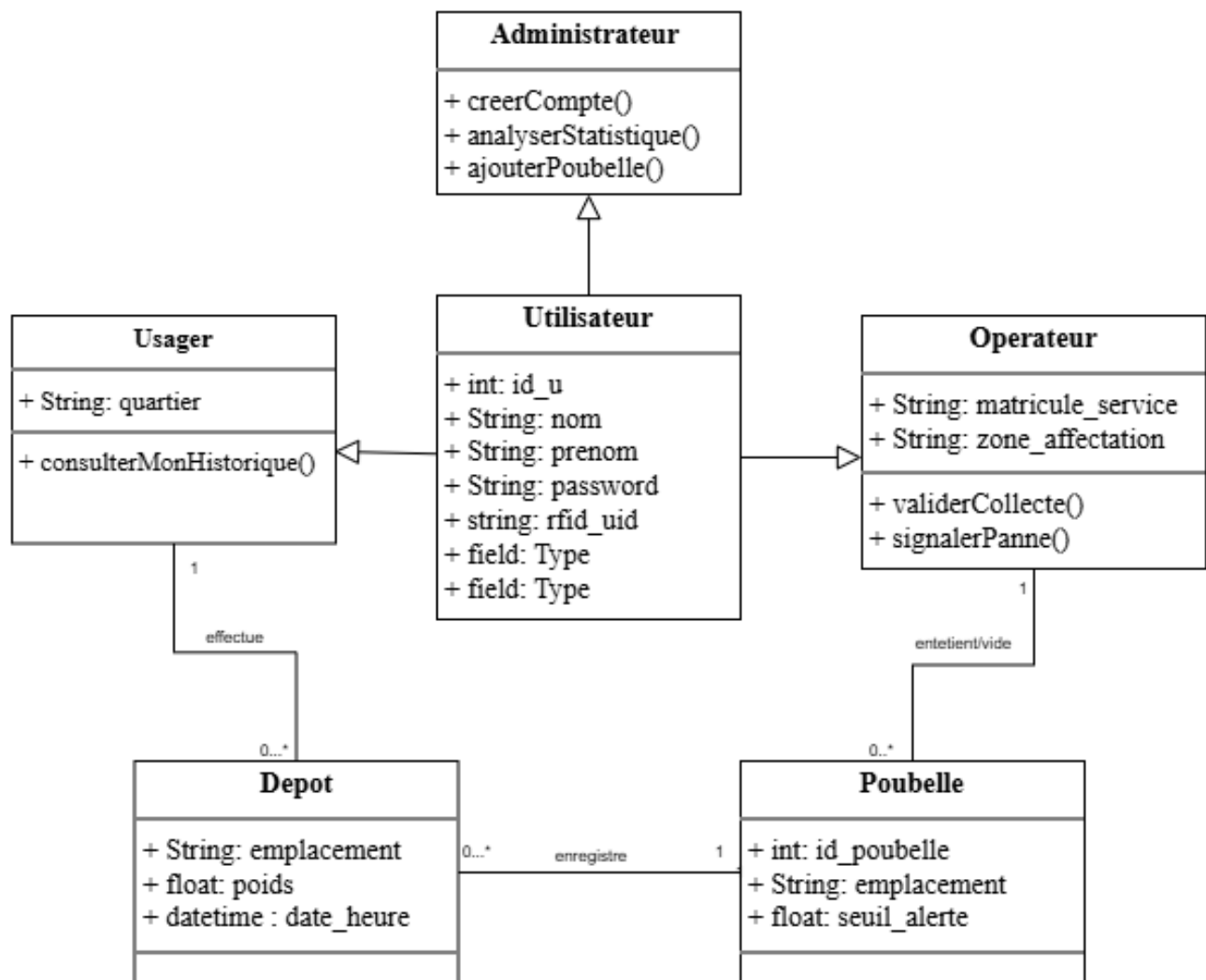


**Figure 2.12 Diagramme de classe**

La hiérarchie des classes présentée démontre la polyvalence du système. En faisant dériver les profils « Administrateurs » et « Opérateurs » d’une classe parente « utilisateur » le modèle assure une flexibilité d’utilisation. Les relations de multiplicité entre les usagers, les poubelles et les dépôts permettent de générer des statistiques précises, indispensable pour les structures d’assainissement de la ville.

## **2.5 Architecture matérielle et choix technologique**

Si la modélisation logicielle développée dans la section 2.3 définit la structure abstraite du système, sa mise en œuvre concrète repose sur une infrastructure matérielle adaptée. La réalisation effective des cas d'utilisation, tels que l'identification de l'utilisateur ou la pesée automatique des déchets, nécessite en effet l'intégration de plusieurs composants électroniques interconnectés.

Dans ce travail, le dispositif physique conçu à l'aide du logiciel SolidWorks constitue la structure principale de la poubelle intelligente. Par souci de précision terminologique, cette structure sera désormais désignée dans la suite du document par le terme *réceptacle*.

Cette section présente d'abord le modèle de conception du réceptacle, puis l'architecture matérielle du système ainsi que les principaux composants électroniques et les choix technologiques retenus pour assurer l'acquisition, le traitement et la transmission des données.

### **2.5.1 Conception du réceptacle**

La conception mécanique du réceptacle constitue une étape importante du projet, car elle permet d'intégrer les différents capteurs et dispositifs électroniques.

Le modèle a été réalisé à l'aide du logiciel SolidWorks, qui permet de concevoir et de visualiser en trois dimensions les différentes composantes du dispositif avant toute réalisation physique. Les Figures 2.13 et 2.14 présentent une vue globale du modèle 3D du réceptacle conçu dans le cadre de ce travail.

Le réceptacle est composé de plusieurs éléments structuraux permettant d'assurer à la fois la collecte des déchets et l'intégration du système électronique. Les différentes parties du modèle sont numérotées afin de faciliter leur identification sur les figures associées.

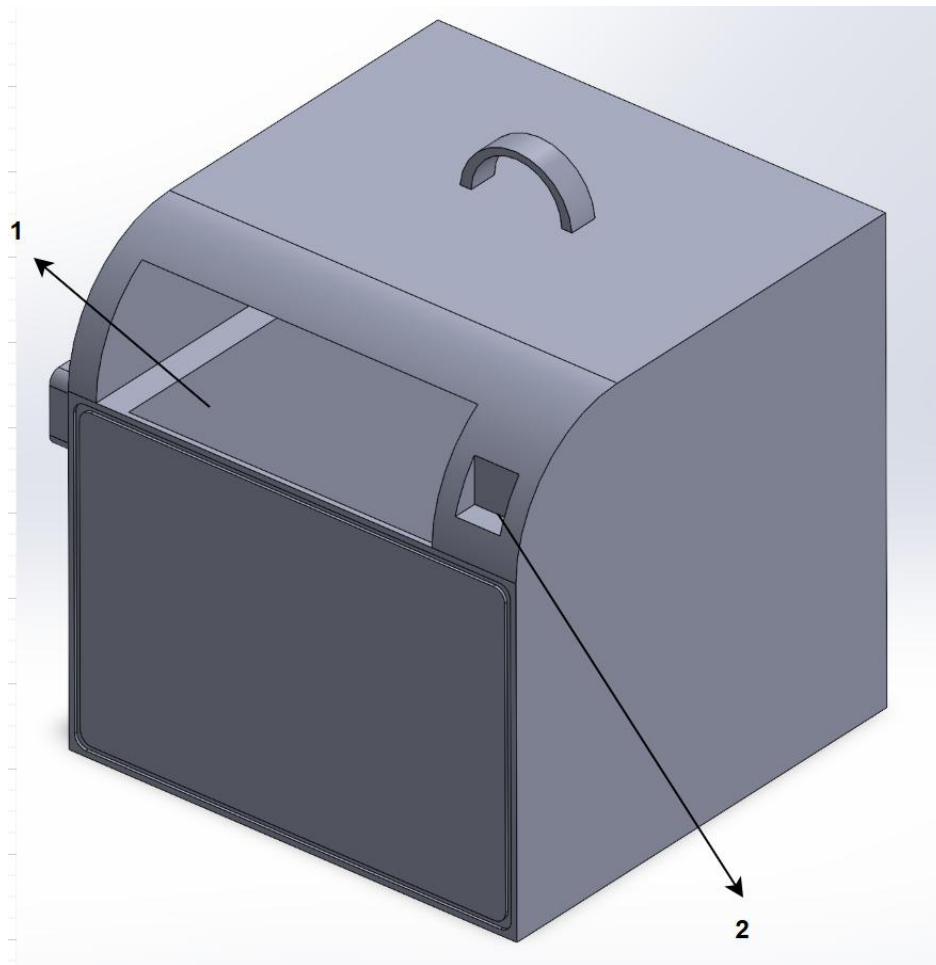


***Figure 2.13 Réceptacle façade principale et façade gauche***

Comme illustré la sur la Figure 2.13, Sur la façade principale l'élément numéroté « 1 » correspond à l'ouverture destinée au dépôt des déchets par l'utilisateur. L'ouverture et la fermeture du couvercle sont assurées par un mécanisme entièrement mécanique. Sur cette même façade, le compartiment numéroté « 2 » est prévu pour accueillir le lecteur RFID ainsi que l'afficheur LCD. Cet emplacement constitue l'interface homme-machine du système et

doit être protégé par une paroi transparente afin de garantir la lisibilité de l'écran et le bon fonctionnement du lecteur tout en protégeant les composants contre les agressions extérieures.

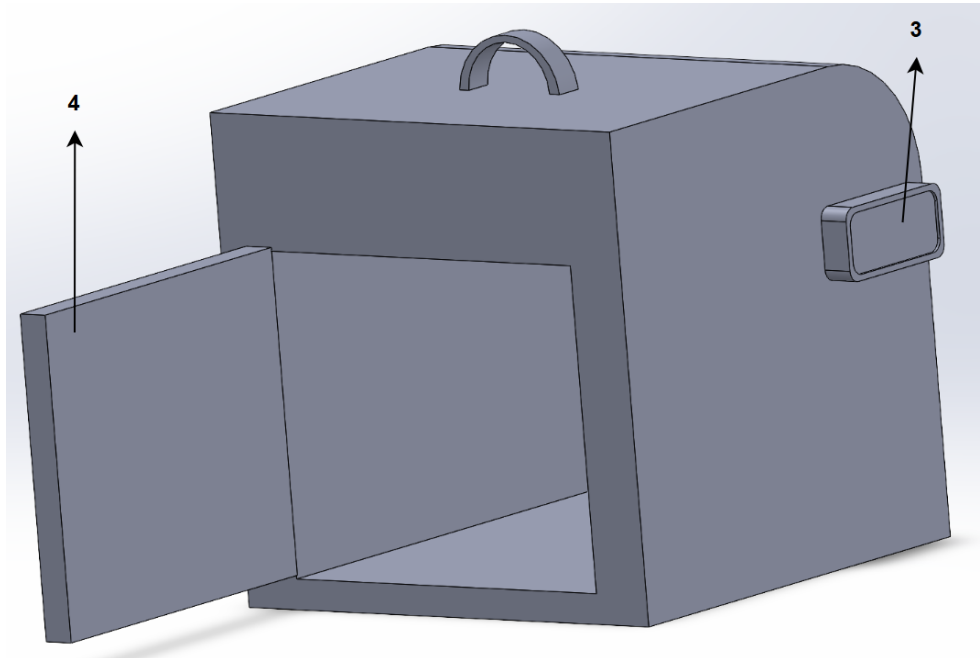


**Figure 2.14 Réceptacle façade arrière et façade droite**

Comme illustré à la Figure 2.14, le compartiment numéroté « 3 » est destiné à loger le microcontrôleur ainsi que la batterie assurant l'alimentation du dispositif. Sur cette même figure, la partie arrière comporte une ouverture facilitant le vidage du réceptacle. Le couvercle de cette ouverture, conçu sous forme de porte et identifié par le numéro « 4 », fonctionne également selon un mécanisme d'ouverture et de fermeture mécanique.

La partie supérieure du dispositif est équipée d'un arc de cercle en acier renforcé permettant l'accrochage du réceptacle à un système de levage en cas de remplacement ou lors du déploiement. Quant à la base du dispositif, elle est réservée pour accueillir la cellule de charge et son module d'amplification afin de garantir la mesure précise du poids des déchets contenus dans le réceptacle.

Cette modélisation permet d'anticiper l'intégration des différents composants électroniques et d'optimiser l'organisation interne du dispositif avant sa réalisation physique. Une fois la conception du réceptacle présentée, il convient désormais de décrire les principaux composants électroniques qui constituent l'architecture matérielle du système.

### 2.5.2 Schéma bloc matériel du système

Avant de détailler les différentes composantes électroniques, il convient de présenter l'organisation fonctionnelle globale du système. Les schéma bloc à la Figure 2.15 illustre l'interaction entre les unités de perception la couche de communication et l'écosystème logiciel.

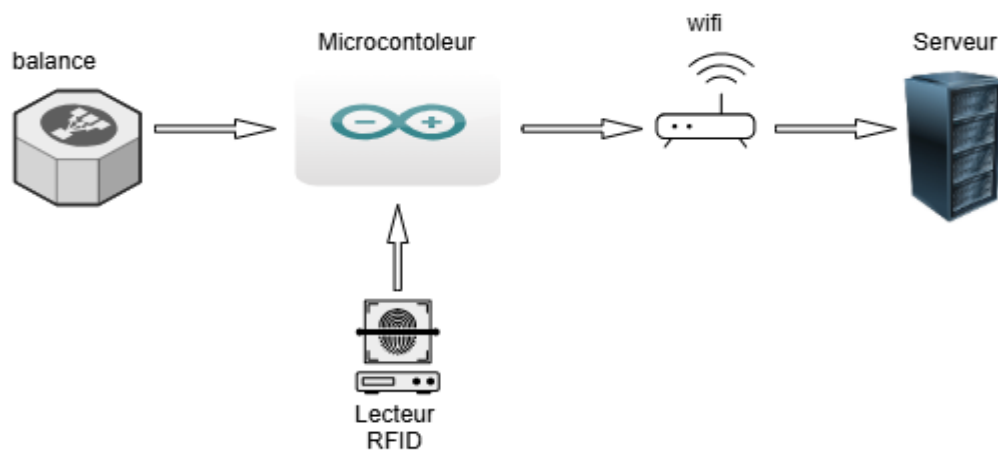


*Figure 2.15 schéma bloc matériel du système*

Ce schéma met en évidence trois composantes principales :

1. **La composante de perception** : constitué des capteurs (cellule de charge associé au module HX711 et lecteur RFID) qui convertissent les actions physiques en signaux électriques exploitables.

2. **La composante de traitement** : centré sur l'ESP32, chargé d'agréger les données issues des capteurs, de les traiter et de préparer leur transmission.
3. **La composante de transmission** : qui assure le pont entre le matériel et l'écosystème logiciel via le protocole Wi-Fi.

### 2.5.3 Présentation et justification des organes matériels

Le passage de la conception logique à la réalisation physique nécessite une sélection des composants électroniques afin de garantir la précision des mesures, la fiabilité de l'identification des usagers et la transmission correcte des données. Les principaux éléments matériels retenus dans ce projet sont présentés ci-dessous.

- *Le microcontrôleur (ESP32)* : Unité de traitement intégrant nativement le Wi-Fi. Il est privilégié pour sa puissance de calcul (Dual Core) et sa gestion optimisée de la consommation d'énergie, garantissant l'autonomie du système. La Figure 2.16 illustre une carte ESP32.

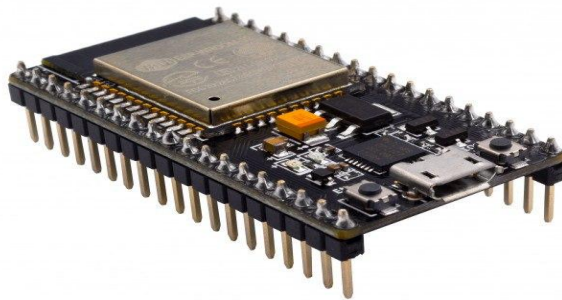


**Figure 2.16 Une carte ESP32 [38]**

- ***L'unité de pesée (HX711 et Cellule de charge)*** : Système de mesure de précision convertissant une force mécanique en donnée numérique 24 bits. Ce choix assure la collection des statistiques de masse, même pour des dépôts légers. La Figure 2.17 illustre une cellule de charge et son module HX711

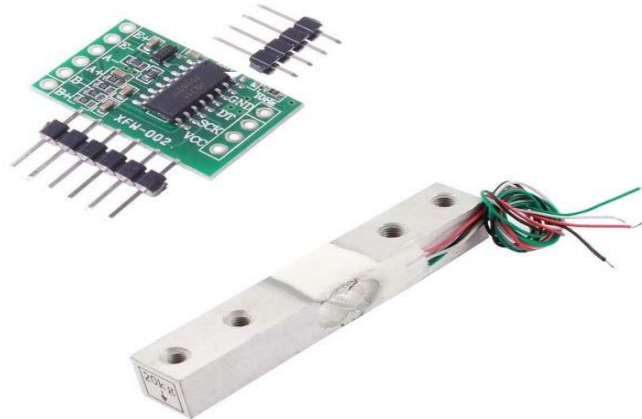


***Figure 2.17 Cellule de charge et module HX711 [35]***

- ***L'interface RFID (RC522)*** : Module d'identification (Figure 2.16) sans contact opérant à 13,56 MHz. Il est retenu pour sa robustesse face à la poussière et son coût d'exploitation réduit pour la distribution des badges aux usagers.

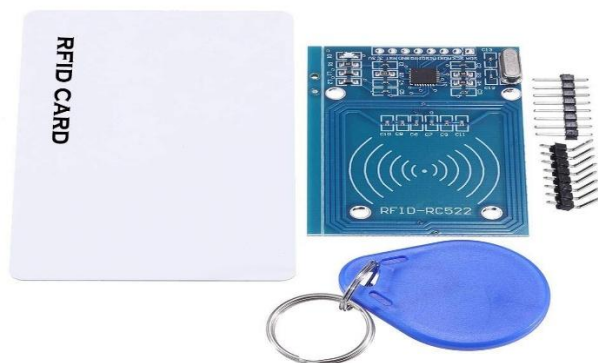


***Figure 2.17 Module RFID [36]***

- **Interface visuelle LCD (LCD 16x2) :** Afficheur à cristaux liquides (Figure 2.18) permettant un retour d'information en temps réel à l'utilisateur (poids, statut de l'envoi, etc.)



**Figure 2.18 Afficheur LCD**

- **L'alimentation :** Une batterie de 5 volts servant de source d'énergie rechargeable permettant un déploiement nomade.

#### **2.5.4 Architecture logicielle et protocoles de communication**

La communication entre les unités de collecte et l'écosystème de gestion repose sur une architecture orientée services, garantissant l'interopérabilité entre le matériel et le logiciel. Ce dialogue est structuré autour de trois piliers technologiques :

1. **Le protocole HTTP/REST :** Le système utilise des requêtes HTTP via une architecture REST (Representational State Transfer). Ce choix est justifié par la standardisation universelle dans le monde de l'IoT, permettant à l'ESP32 de communiquer avec le serveur de manière simple et structurée, facilitant ainsi la scalabilité du réseau de poubelles à Goma et même en dehors de Goma [37].

2. ***Le format d'échange JSON*** : Les données collectées par le système, telles que le poids des déchets ou l'identifiant de l'utilisateur, sont encapsulées sous forme d'objets JSON (*JavaScript Object Notation*). Ce format est largement utilisé dans les applications web et les systèmes IoT en raison de sa structure simple, de sa lisibilité et de sa facilité d'intégration avec les API REST. Sa relative légèreté permet de limiter la consommation de bande passante, ce qui favorise la transmission des données même dans des contextes où la connectivité réseau est instable ou limitée.
3. ***L'architecture Logicielle (Arduino, Django et Next.js)*** : La logique métier est portée par le Framework Django, choisi pour sa gestion robuste de la sécurité et sa capacité à traiter les API complexes. La restitution visuelle est assurée par Next.js, dont la réactivité permet de mettre à jour le tableau de bord de supervision en temps réel sans rechargement de la page, offrant ainsi une expérience utilisateur fluide. Le code embarquée dans l'ESP32 développé en langage Arduino via l'environnement Arduino. Ce choix est justifié par la richesse des bibliothèques disponible pour la gestion du capteur HX711 et RFID, permettant un contrôle précis des ressources matérielles et une gestion efficace des interruptions.

## 2.6 Conclusion partielle

Ce deuxième chapitre a permis de mener une analyse approfondie et une conception détaillée du système de poubelle connectée. À travers l'utilisation combinée des langages SysML et UML, nous avons transformé un besoin social et environnemental en une architecture technique cohérente et documentée. La définition des exigences, la délimitation du contexte, l'organisation structurelle des blocs et la modélisation dynamique des échanges constituent désormais le référentiel technique du projet. Cette phase de conception étant achevée, le chapitre suivant sera consacré à la réalisation matérielle et logicielle du prototype, étape où ces modèles seront concrétisés par le choix des composants électroniques et le développement des algorithmes.

## Chapitre 3

### Réalisation, résultats et discussions

Après avoir défini les exigences fonctionnelles et modélisé l'architecture du système dans le deuxième chapitre, ce troisième chapitre est consacré à la phase de concrétisation technique du projet. Il s'agit de l'étape de transition où les modèles abstraits (UML, SysML schémas blocs) sont traduits en composants physiques et en lignes de code fonctionnelles. Nous détaillons dans ce chapitre, l'environnement de développement, le processus d'implémentation de l'objet connecté ainsi que la présentation des résultats obtenus. Cette démarche inclut également une phase de tests et de discussions visant à évaluer la performance de la solution face aux défis environnementaux de la ville de Goma.

#### 3.1 Environnement de réalisation

La mise en œuvre de ce système hybride (IoT et Web) a nécessité un écosystème d'outils spécifiques, tant sur le plan matériel que logiciel pour garantir l'interopérabilité entre la poubelle connectée et le centre de contrôle.

##### 3.1.1 Ressources matérielles

La phase de réalisation s'est appuyée sur les composants matériels justifiés à la section 2.4.2 (ESP32, HX711, RFID RC522, LCD 16x2). La mise en œuvre du prototype a nécessité des ressources matérielles suivantes :

- **Station de développement** : un PC doté d'un processeur Intel Core i7 et de 16 Go de RAM, indispensable pour la compilation rapide des logiciels et l'exécution simultanée du serveur backend basé sur Django (python) et du serveur frontend développé avec Next.js.

- **Outils d'assemblage** : Une plaque d'essais pour le prototypage rapide, un fer à souder pour la fixation définitive des liaisons et un multimètre numérique pour le contrôle des tensions critiques (3.3V et 5V) et la vérification de continuité dans les fils.

Si ces outils ont permis l'assemblage physique du dispositif, la gestion de la logique embarquée et de la plateforme de supervision a nécessité une suite logicielle spécifique.

### 3.1.2 Environnement logiciel

Pour la mise en œuvre logicielle, nous avons utilisé les environnements et utilitaires suivants, venant concrétiser les choix technologiques justifiés au deuxième chapitre :

- **Editeur de code** : Visual studio code pour le développement de l'application web (Python et Next.js) et Arduino IDE pour le téléversement du code Arduino dans l'ESP32.
- **Gestion des API et tests** : REST client, qui a été indispensable pour simuler les envois de données de l'ESP32 et valider les réponses du serveur avant l'intégration matérielle finale.
- **Système de gestion de base de données** : SQLite3, un système de gestion de base de données relationnelle intégré à Django, utilisé pour la structuration et la persistance des données récoltées.

Une fois l'environnement de travail configuré et les outils maîtrisés, l'étape suivante a consisté à matérialiser l'architecture du système par l'intégration des composants et le développement des algorithmes.

## 3.2 Implémentation du système

L'implémentation représente la phase de matérialisation où les composants électroniques et les lignes de code s'unissent pour former une solution fonctionnelle. Cette étape s'est déroulée en

deux volets complémentaires : l'interconnexion physique des organes et le développement de la logique embarquée.

### 3.2.1 Réalisation matérielle et prototypage

La réalisation du prototype physique a consisté à assembler les différents organes sensoriels autour du microcontrôleur ESP32 afin de créer une unité de collecte capable d'interagir avec son environnement.

Le montage a d'abord été réalisé sur une plaque d'essai (breadboard) pour la phase de test, permettant une flexibilité dans l'ajustement des connexions. L'agencement suit une architecture modulaire où chaque composant est relié à l'unité centrale via des protocoles de communication optimisés :

- *L'interface d'identification* : Le lecteur RFID-RC522 est connecté via le bus SPI, utilisant les broches GPIO dédiées pour assurer un échange de données lors de la lecture des badges.
- *Le système de pesée* : La cellule de charge est reliée au module HX711. Ce dernier convertit les micro-variations analogiques en signaux numériques, limitant l'impact du bruit électromagnétique sur la précision de la mesure.
- *L'interface d'affichage* : Un afficheur LCD 16x2 avec module I2C fournit un retour visuel (identifiant, poids, statut d'envoi) avec seulement deux fils de données (SDA et SCL).
- *Gestion énergétique* : Un circuit de monitoring, basé sur un pont diviseur de tension, est relié à l'entrée analogique GPIO 34. Ce dispositif permet de surveiller l'état de charge de la batterie et d'anticiper la maintenance. Toute fois en l'absence de la batterie le montage est alimenté par un cordon Micro-USB relié directement au port de l'ESP32.

La Table 3.1 présente de manière synthétique l'affectation des broches de l'ESP32 utilisées pour l'interconnexion des différents capteurs et actionneurs, en veillant à éviter les conflits de

signaux ainsi que l'utilisation de broches sensibles. Par ailleurs, la Figure 3.1 illustre le schéma global du montage retenu pour la réalisation du prototype.

Table 3.1 *Correspondance des broches*

| Composant     | Broche du module | Bronche ESP32 (GPIO) | Type de signal   |
|---------------|------------------|----------------------|------------------|
| RFID-RC522    | SDA(SS)          | GPIO 5               | SPI (Digital)    |
|               | SCK              | GPIO 18              | SPI (Clock)      |
|               | MOSI             | GPIO 19              | SPIN (Data In)   |
|               | RST              | GPIO 22              | Reset            |
| HX711         | DT (Data)        | GPIO 21              | Digital Input    |
|               | SCK (Clock)      | GPIO 4               | Digital Output   |
| Batterie      | V-Out (Pont)     | GPIO 34              | Analogique (ADC) |
|               | VCC/GND          | 3.3V/GN              | Puissance        |
| Afficheur LCD | SCL              | GPIO 16              | Numérique I2C    |
|               | SDA,             | GPIO 17              | Numérique I2C    |

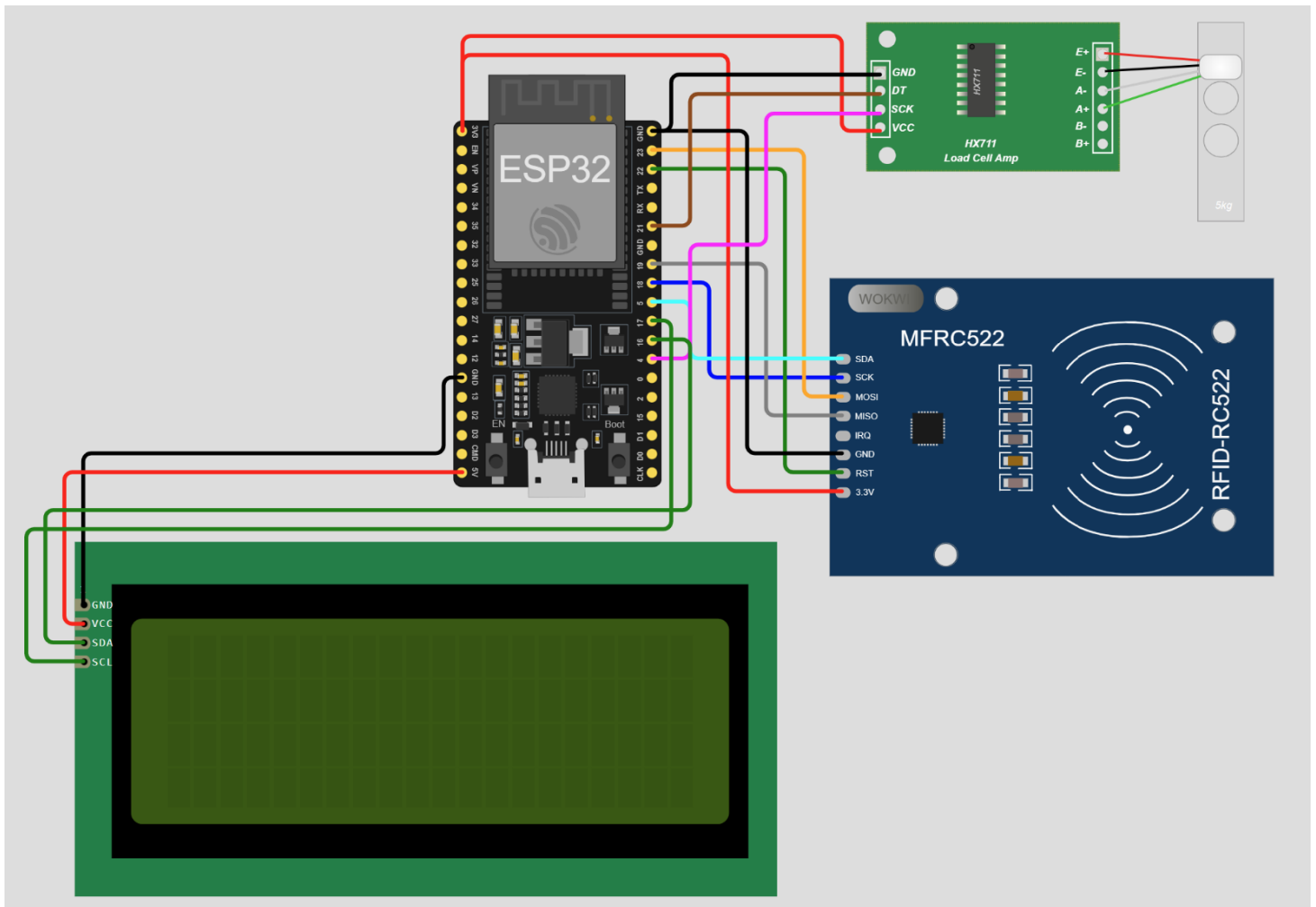


*Figure 3.1 Schéma de câblage générale du prototype*

Une fois l'intégrité électrique du montage validée, la logique du système a été structurée autour d'un micrologiciel capable d'orchestrer ces composants.

### 3.2.2 Fonctionnement du micrologiciel

Le programme embarqué dans l'ESP32 est structuré selon une séquence opérationnelle du micrologiciel permettant d'assurer un fonctionnement stable du système et une gestion

cohérente des interactions avec les utilisateurs. Le cycle de fonctionnement du programme peut être décrit à travers les états suivants :

### **1. État d'initialisation du système**

Au démarrage du microcontrôleur, le programme procède à l'initialisation des différents périphériques matériels. Les interfaces de communication SPI et I2C sont activées afin d'assurer respectivement la communication avec le lecteur RFID et l'afficheur LCD. Le module de pesée HX711 est également initialisé et une procédure de tare automatique est exécutée afin de remettre la balance à zéro. Par ailleurs, le système initialise la mémoire locale LittleFS, destinée au stockage temporaire des données lorsque la connexion réseau est indisponible, puis tente d'établir une connexion Wi-Fi avec le serveur distant. Une fois la connexion établie le microcontrôleur transmet automatiquement au serveur les données stockées localement, puis assure l'envoi en temps réel des nouvelles données collectées.

### **2. État d'attente d'interaction**

Une fois l'initialisation terminée, le système entre dans un état de veille au cours duquel il attend une interaction avec l'utilisateur. Le seul événement pouvant déclencher une transition vers un autre état est la détection d'un badge RFID, permettant d'ouvrir une section de dépôt nominative.

### **3. État de session de dépôt**

Lorsqu'un badge RFID valide est détecté, le système ouvre une session temporaire de dépôt associée à l'identifiant de la carte. Pendant cette phase, l'utilisateur dispose de d'un intervalle de temps limité (20 secondes) pour déposer ses déchets dans le réceptacle, l'utilisateur peut toutefois décider de mettre fin à sa session par une nouvelle lecture de son badge RFID.

Le système surveille alors en continu les variations du poids mesuré par la cellule de charge. Pour améliorer la fiabilité de la mesure, une moyenne arithmétique de 10 lecture successive

du capteur HX711 est effectuée afin de réduire le bruit électronique et stabiliser la valeur mesurée.

#### **4. État de validation et de transmission des données**

Une fois le poids validé, les informations associées au dépôt (identifiant RFID, masse des déchets, identifiant du réceptacle et niveau de la batterie) sont encapsulées dans une structure JSON puis transmises au serveur via une requête HTTP POST.

En cas d'indisponibilité du réseau ou d'échec de transmission, les données sont stockées localement dans la mémoire LittleFS afin d'être synchronisées ultérieurement lorsque la connexion Wi-Fi est rétablie.

#### **5. État de maintenance et de vidage**

Un mode spécifique est également prévu pour les opérations de maintenance. Lorsqu'un badge RFID appartenant à l'opérateur de collecte est détecté, le système active un mode de vidage, réinitialise la balance par une nouvelle tare et enregistre l'événement dans le système afin de signaler que le réceptacle a été vidé.

Après l'exécution de ces opérations, le système retourne automatiquement à l'état d'attente. Lors d'un dépôt, le système effectue une moyenne arithmétique de dix lectures du poids déposé via le HX711 pour éliminer le bruit électronique et stabiliser la valeur avant validation. Une fois la valeur stabilisée, le micrologiciel calcule le poids net en soustrayant la tare initiale. Cette logique de contrôle a été implémenté en langage Arduino. Une portion du code source est commenté et représenté en annexe A.

### **3.2.3 Etalonnage de la balance**

La précision de mesure envoyé au serveur a nécessité une phase préalable d'étalonnage de la balance. Le facteur de calibrage du module HX711 a été fixé à 240.37 à l'issue de tests comparatifs réalisés avec des masses étalonnées. Ce coefficient est ensuite intégré dans le micrologiciel de l'ESP32 afin de convertir les valeurs brutes fournies par le capteur en valeurs de masse directement exploitables par le système.

Ces essais métrologiques révèlent une erreur relative moyenne de 1.25%. Cette valeur est jugée tolérable car elle s'inscrit dans les marges d'incertitude admises par la recommandation internationale OIML R 60 pour les dispositifs de pesage de classe ordinaire en service, confirmant ainsi la fiabilité de la chaîne d'acquisition analogique-numérique [38]. Les détails des mesures expérimentales sont présentés en Annexe B. La fiabilité des mesures étant ainsi validée, l'intégration physique du système de pesée dans un contenant adapté est devenue la priorité.

### **3.2.4 Réalisation et aménagement du prototype de la poubelle**

La phase de réalisation a consisté à matérialiser le modèle de réceptacle défini au chapitre 2 afin de permettre l'intégration des différents composants électroniques du système. Dans la conception initiale, le réceptacle devait être réalisé en acier en raison de sa robustesse, de sa durabilité et de sa résistance aux contraintes extérieures, notamment lorsqu'il est traité contre la corrosion. Toutefois, pour les besoins du prototypage et des essais expérimentaux, un prototype en bois a été réalisé. Ce choix s'explique par la facilité de mise en œuvre de ce matériau, permettant un prototypage rapide et économique.

L'aménagement interne du dispositif a été organisé de manière à assurer une intégration fonctionnelle des capteurs et l'unité de contrôle :

- *Intégration du système de pesée* : Le fond de réceptacle est solidarisé à une structure rigide accueillant la cellule de charge et le module HX711, garantissant que seule la masse des déchets déposés à l'intérieur du récipient est prise en compte lors de la mesure.
- *Logement de l'unité centrale* : un boîtier de protection situé dans la partie supérieure du dispositif abrite le microcontrôleur ESP32, le protégeant contre l'humidité et les débris.
- *Interface d'identification* : le lecteur RFID est fixé sur la paroi interne du boîtier afin d'assurer sa protection tout en facilitant la lecture des badges des usagers lors du dépôt des déchets.

Cette configuration a permis de tester le fonctionnement global du système et de valider l'intégration des différents modules électroniques au sein du réceptacle.

Une fois l'unité de collecte physique opérationnelle, le développement s'est tourné vers la plateforme web chargée de centraliser et traiter ces flux de données, la section 3.3 présente l'analyse de résultat obtenu tant pour le matériel que pour le logiciel.

### 3.3 Présentation et analyses de résultats

Cette section expose l'aboutissement technique du projet. Les résultats présentés ici témoignent de l'interconnexion réussie entre le réceptacle et l'écosystème de supervision.

#### 3.3.1 Résultat Matériels

La réalisation physique a abouti à une unité de collecte autonome capable de capter, traiter et afficher localement les informations de pesée.

- **Le réceptacle** : Le prototype finalisé intègre de manière ergonomique le lecteur RFID sur sa paroi latérale et la cellule de charge sous sa base. La structure assure une protection adéquate de l'électronique embarquée tout en restant fonctionnelle pour l'utilisateur.
- **L'interface homme-machine** : L'afficheur LCD 16x2 permet un retour immédiat. Les tests montrent qu'un citoyen reçoit une confirmation visuelle de son poids (ex : « Dépôt valide : 0.6 kg »), du statut de sa session (Session Terminé) et du statut d'envoi (« Envoi réussi » ou « échec d'envoi stockage locale »).
- **Fiabilité de la pesée et imputation nominative** : Grâce au facteur de calibrage de 240.37, le dispositif délivre une mesure stable ne dépassant pas 1.25 % d'erreur relative tel que révélé par les tests comparatifs avec des masses témoins. L'innovation majeure réside dans la corrélation de cette mesure avec l'identifiant unique de l'utilisateur : le micrologiciel garantit que le poids stabilisé n'est transmis au serveur qu'après validation de la session RFID. Cette synchronisation entre la pesée et l'identification

assure l'intégrité des statistiques et permet une traçabilité des apports individuels sur la plateforme de supervision.

### 3.3.2 Résultat Logiciels : Plateformes de supervision

Les données brutes acquises par le microcontrôleur sont transmises vers le serveur puis centralisées et transformées en indicateur décisionnels sur le tableau de bord de l'application web. Cette section présente quelques interfaces de l'application web développée.

#### 3.3.2.1 Interface de l'administrateur

L'administrateur dispose de sept options de menu dont chacune offrant des fonctionnalités spécifiques.

#### 3.3.2.2 Le menu Dashboard

Le tableau de bord (Dashboard, Figure 3.2) constitue le centre de supervision des activités essentielles pour au bon fonctionnement du système. Cette interface est structurée en plusieurs panels synthétiques présentant les indicateurs clé suivant :

- *Le premier panel* : subdivisée en trois sections, elle affiche le poids total des déchets accumulés depuis la dernière collecte, la fréquence d'utilisation des réceptacles sur une période de 24 heures ainsi que le taux de tentatives d'usage non autorisé ayant contourné le système d'identification. Ce dernier indicateur permet d'évaluer le risque potentiel de vandalisme sur les réceptacles déployés.
- *Le deuxième panel* : elle présente des graphiques de type *line chart*, où l'axe des ordonnées représente le poids des déchets et l'axe des abscisses les jours de la semaine. Ces visualisations illustrent la production journalière des déchets et permettent à l'administrateur d'identifier les journées caractérisées par une forte ou faible activité, facilitant ainsi la planification des interventions sur le terrain.
- *Le troisième panel* : positionnée à gauche du graphique principal, elle affiche la répartition du poids des déchets par catégorie. Cette information permet d'analyser la distribution des types de déchets accumulés et recyclé.

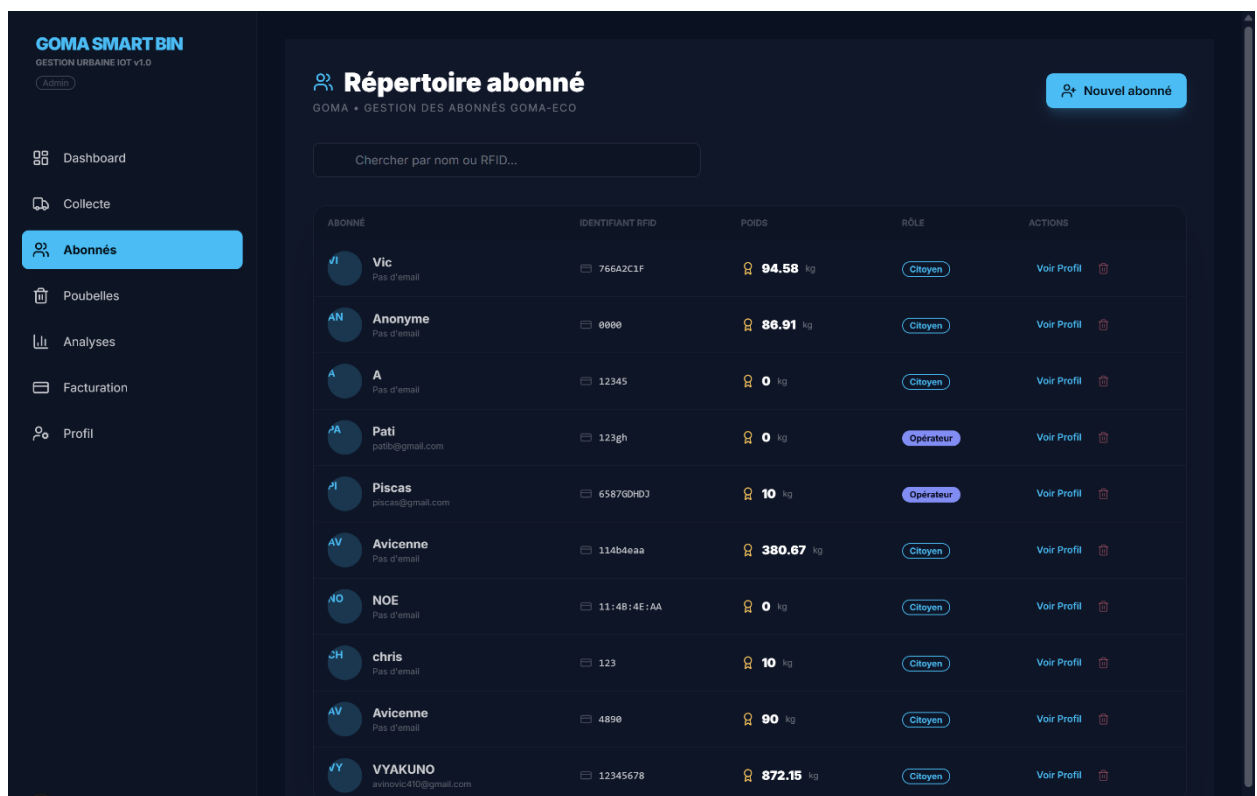
- **Le quatrième panel** : elle regroupe autant de cartes qu'il y a de poubelles déployées sur le terrain. Chaque carte indique le nom ou l'emplacement de la poubelle, le type de déchets collectés, le niveau de charge de la batterie ainsi qu'une barre de progression circulaire représentant le pourcentage de remplissage. Lorsque le seuil critique de 80 % est atteint, la carte passe de la couleur bleue à rouge clignotant afin d'alerter l'administrateur.
- **Le cinquième panel (Annexe C.1)** : elle présente un tableau récapitulatif des dix derniers dépôts effectués. Ce tableau précise l'heure, la quantité et le poids du dépôt, l'emplacement de la poubelle concernée ainsi que le statut de l'utilisateur (identifié par RFID ou anonyme).



**Figure 3.2 Dashboard central**

### 3.3.2.3 Gestion des utilisateurs

Cette option redirige l'administrateur vers la page de gestion des utilisateurs (Figure 3.3). Cette interface affiche un tableau récapitulatif contenant les informations suivantes : le nom, l'adresse électronique, l'identifiant unique, le poids total déposé ainsi que le rôle attribué à l'utilisateur (usager standard ou opérateur). Plusieurs actions sont disponibles : **supprimer**, permet à l'administrateur de retirer un utilisateur du système ; **Nouvel abonné**, offre la possibilité d'ajouter un nouveau membre à la plateforme ; **Voir profil**, accessible via un lien intégré au tableau, cette action permet de consulter les informations détaillées relatives à un utilisateur spécifique. La Figure 3.4 illustre un exemple de page de consultation de profil utilisateur.



| ABONNÉ                                                                                                                     | IDENTIFIANT RFID | POIDS     | RÔLE      | ACTIONS     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------|-----------|-----------|-------------|
|  <b>Vic</b><br>Pas d'email              | 766A2C1F         | 94.58 kg  | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>Anonyme</b><br>Pas d'email          | 0000             | 86.91 kg  | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>A</b><br>Pas d'email                | 12345            | 0 kg      | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>Pati</b><br>pati@gmail.com          | 123gh            | 0 kg      | Opérateur | Voir Profil |
|  <b>Piscas</b><br>piscas@gmail.com      | 6587GHDJ         | 10 kg     | Opérateur | Voir Profil |
|  <b>Avicenne</b><br>Pas d'email         | 114b4eaa         | 380.67 kg | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>NOE</b><br>Pas d'email              | 11:4B:4E:AA      | 0 kg      | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>chris</b><br>Pas d'email            | 123              | 10 kg     | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>Avicenne</b><br>Pas d'email         | 4890             | 90 kg     | Citoyen   | Voir Profil |
|  <b>VYAKUNO</b><br>vynovc.110@gmail.com | 12345678         | 872.15 kg | Citoyen   | Voir Profil |

Figure 3.3 Interface de gestion des utilisateurs

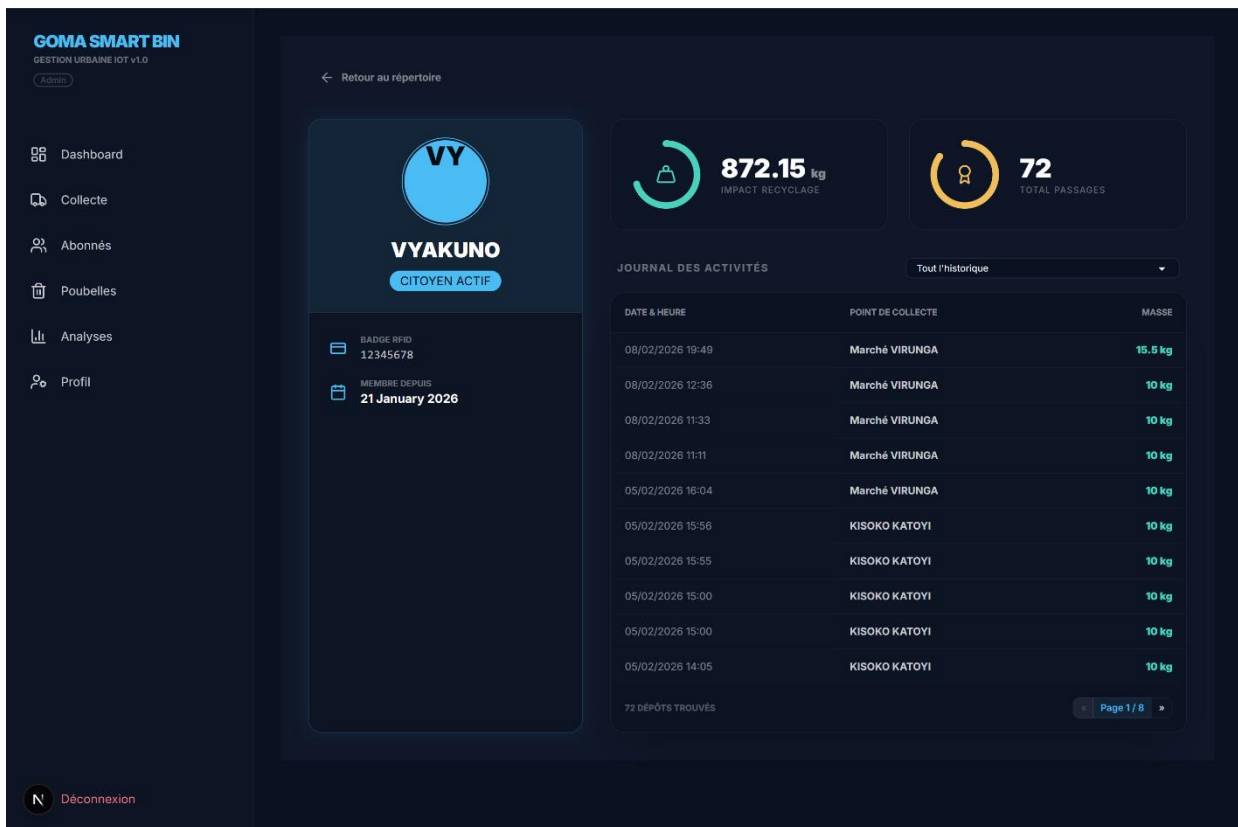


**Figure 3.4 Interface de consultation du profil utilisateur**

### 3.3.2.4 L'option poubelle

Cette option redirige l'administrateur vers la page de gestion des poubelles déployées (Figure 3.5). L'interface présente, sous forme de panel les informations relatives à l'état de chaque unité, notamment le niveau et le seuil de remplissage, le niveau de charge de la batterie, l'identifiant de la poubelle ainsi que le type de déchets collectés. Au-delà des données techniques liées aux unités physiques, la page intègre une cartographie interactive permettant de localiser l'ensemble des poubelles sur la carte de Goma. Les marqueurs bleus indiquent les poubelles en état de fonctionnement normal, tandis que les marqueurs rouges signalent les unités ayant atteint un seuil critique de remplissage et nécessitant une intervention urgente.

L'interface propose également des actions de gestion :

- Le bouton « **Déployer une unité** » permet d'ajouter une nouvelle poubelle au système ;
- Le bouton « **Configurer** » disponible sur chaque panel, offre la possibilité de modifier les paramètres associés à l'unité concernée (seuil critique, type de déchets, emplacement, coordonnées géographiques).

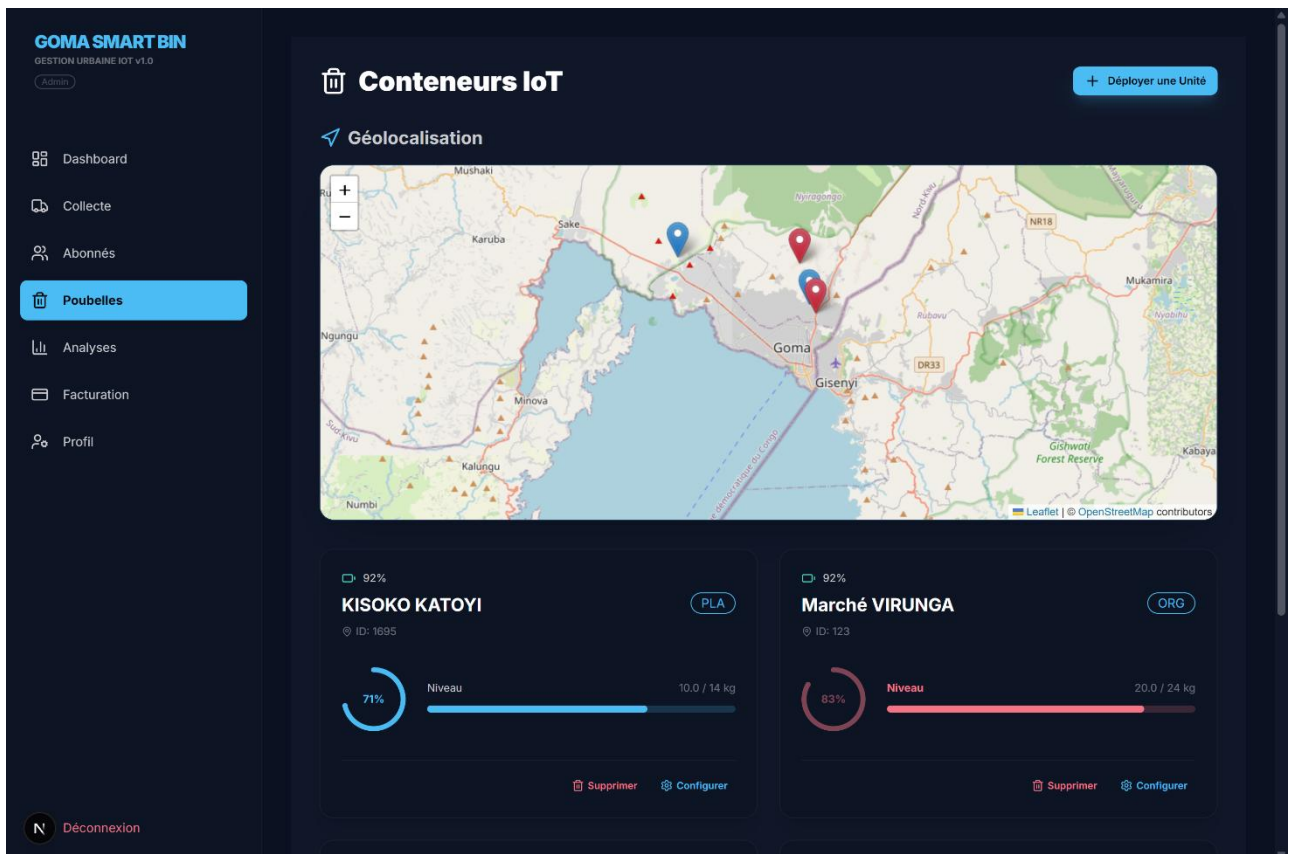


*Figure 3.5 Interface de gestion des unités de collectes déployées*

### 3.3.2.5 Interface d'analyse

Cette page (Figure 3.6) offre à l'administrateur une vue globale de l'évolution de la collecte des déchets dans le temps. Un graphique de type line chart permet de visualiser la production des déchets par quartier ou selon une période sélectionnée (semaine, mois, année ou période globale). L'axe des ordonnées représente le poids cumulé des déchets tandis que l'axe des abscisses correspond au temps (jours ou mois). Un tableau paginé (affichage de dix éléments par page) fournit des informations détaillées relatives aux données représentées graphiquement,

notamment le nom de l’usager, le poids déposé, la date et l’heure du dépôt ainsi que la poubelle concernée. Enfin, le bouton « Exporter le rapport » permet de télécharger les données filtrées au format CVS, facilitant ainsi leur exploitation ultérieure.

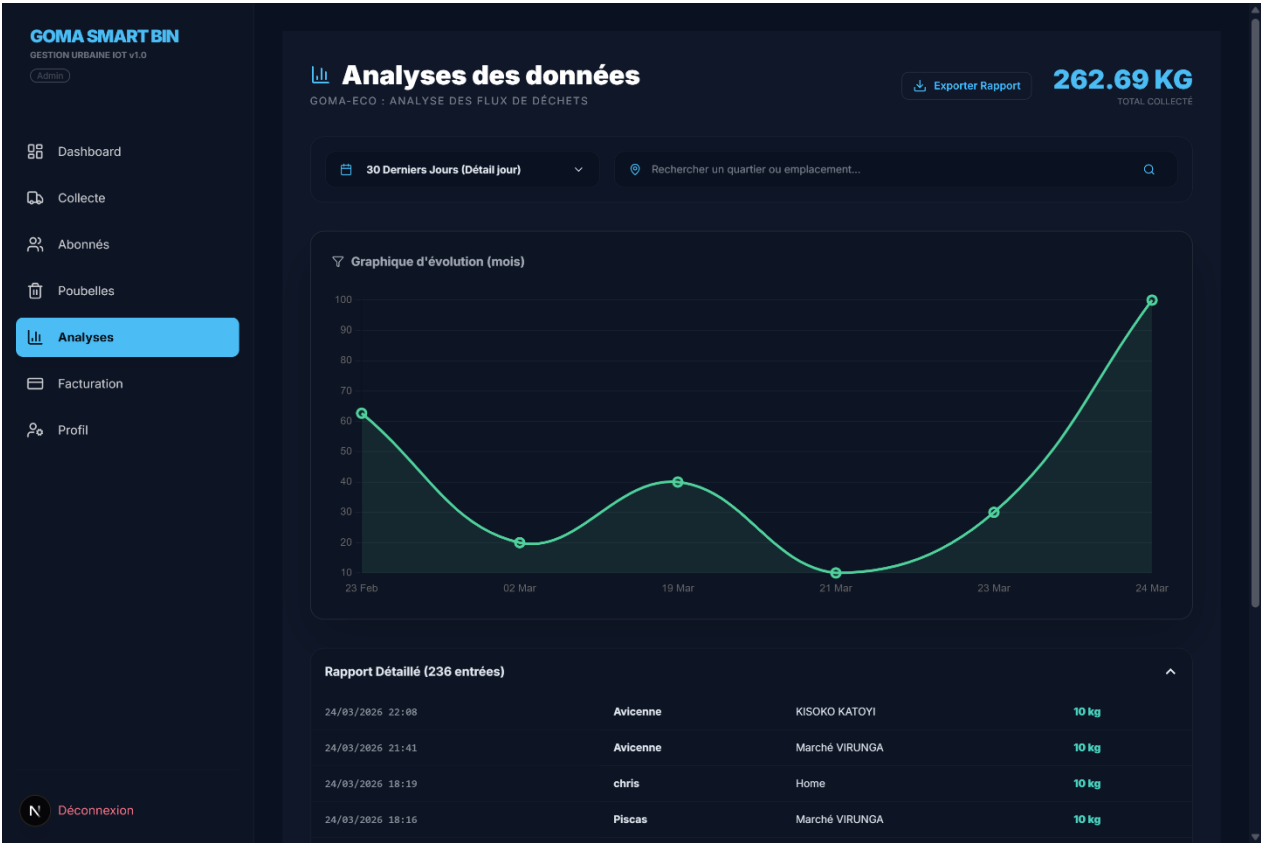


Figure 3.6 Interface d’analyse des données

3.3.2.6 Gestion de la redevance et facturation

Cette interface (Figure 3.7) constitue un élément central du système. Elle permet à l’administrateur de suivre les montants associés aux dépôts de déchets, calculés automatiquement à partir des mesures de la plateforme de pesée et de l’identification par RFID.

L’interface s’organise autour de deux rubriques principales :

- *Mois en cours* : cette section présente les usagers actifs durant la période actuelle (mois courant) avec les détails du poids cumulé des déchets déposés ainsi que le montant correspondant.
- *Dettes en attente* : cette rubrique regroupe les montants non réglés des périodes précédentes, permettant un suivi structuré des paiements en retard.

Deux fonctionnalités majeures complètent cette interface :

- *Configuration des tarifs* : le bouton « Tarifs par déchet » déclenche l'ouverture d'un panneau de réglage qui permet de définir le prix par kilogramme selon le type de déchet (organique, plastique, verre, etc.), offrant ainsi une certaine flexibilité en fonction du contexte local.
- *Génération de factures PDF* : une option permet de produire un document récapitulatif détaillé, incluant l'historique des dépôts (date, heure, poids) ainsi que le montant restant. Ce document sert de preuve des opérations enregistrées par le système.



*Figure 3.7 Gestion de la redevance et facturation*

### 3.3.2.7 Edition du profil

La page accessible via le menu profil (Figure 3.7.), disponible pour l'ensemble des utilisateurs du système, permet la modification des informations associées au compte notamment l'identité, l'adresse électronique et le mot de passe

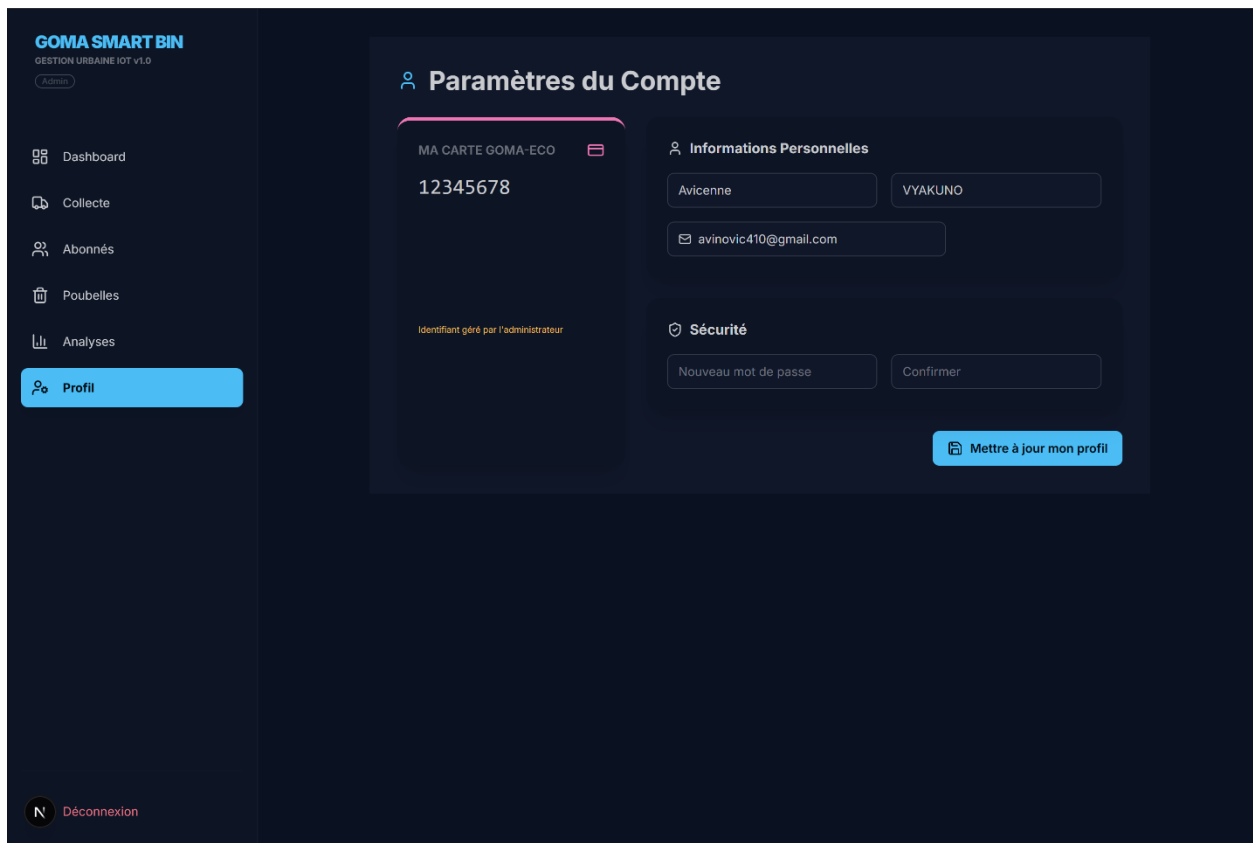


*Figure 3.7.1 Interface d'Édition du profil*

### 3.3.2.8 Interface de l'opérateur

L'interface dédiée aux opérateurs de terrain (Figure 3.8) a été conçue et optimisée pour favoriser la mobilité et l'efficacité opérationnelle. Cette interface reste accessible à l'administrateur à des fins de supervision. Contrairement à la vue globale proposée à l'administrateur, cette interface applique un filtrage des données afin de n'afficher que les priorités de collecte. L'opérateur étant avant tout un utilisateur du système, il dispose dans son menu de l'option « **mon impact** », qui lui permet de suivre sa propre évolution en terme de production de déchets. Plus des détails sur cette option sont donnés dans la section consacrée aux utilisateurs finaux dont les opérateurs représentent une catégorie spéciale. De même, l'option profil identique à celle présentée dans la section relative à l'interface administrateur

ne sera plus détaillé ici. L'élément central restant à présenter est donc l'option collecte, qui guide l'opérateur vers la page de gestion de tournée.

Cette page filtre automatiquement les données pour ne présenter que les poubelles nécessitant une intervention. Elle affiche les informations suivantes :

- Les poubelles en état critique (taux de remplissage supérieur à 80%) ;
- Les poubelles “en anticipation” (à partir de 70% de remplissage).

Un code de couleur facilite la distinction des niveaux d'urgence : orange pour l'anticipation et rouge pour l'état critique. En l'absence de poubelles en alerte, un message est affiché à l'opérateur (« Félicitations, toutes les poubelles de votre zone ne sont pas en alerte », Annexe C.2).

Chaque carte d'alerte comporte deux boutons offrant des fonctionnalités spécifiques :

- **Le bouton Itinéraire** : il déclenche une ouverture de l'application Google Maps afin de guider l'opérateur à partir de sa position courante jusqu'aux coordonnées GPS de la poubelle concernée. Le choix de cette application se justifie non seulement par sa capacité de guidage, mais également par son calcul d'itinéraire optimisé.
- **Le bouton valider vidage** : il permet à l'opérateur de confirmer le vidage une fois sur site. Cette action met immédiatement à jour l'état de la poubelle dans l'interface administrateur, faisant passer une poubelle critique à un état vide (0 % de remplissage). Par ailleurs, la détection du badge RFID de l'opérateur par le microcontrôleur déclenche également une validation automatique du vidage, entraînant la mise à jour simultanée de toutes les interfaces affichant l'état de la poubelle.

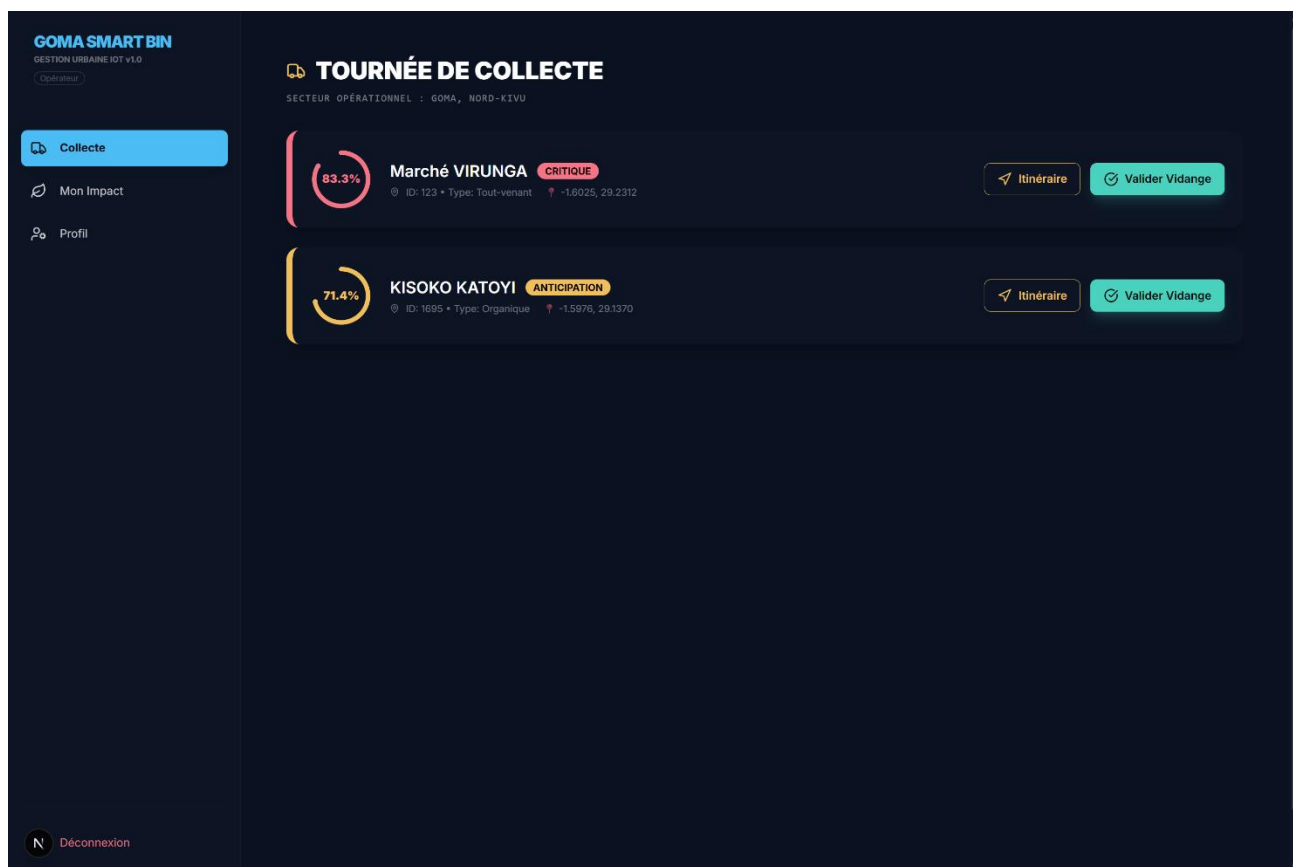


**Figure 3.8 Interface des poubelles filtré pour l’opérateur**

### 3.3.2.9 Interface de l’utilisateur final

Dans une perspective de sensibilisation et de ludification, chaque utilisateur dispose d'un espace personnel (Figure 3.9) lui permettant de suivre sa contribution aux efforts de salubrité l’option Mon impact, donne accès aux informations suivantes :

- *Statistique de tri* : L'utilisateur peut consulter la masse totale de déchets qu'il a produit et recyclé ainsi que la fréquence de ses dépôts. Ces données sont présentées d’abord sous forme des valeurs numériques au sein des cartes dédiées en suite sous forme de graphiques illustratifs (Figure 3.10).

- *Historique et Archivage* : un système de filtrage permet de visualiser l'historique complet des dépôts effectués. Cette fonctionnalité offre à l'utilisateur la possibilité de suivre son évolution et d'améliorer progressivement ses habitudes de tri.
- *Point Eco* : un calcul automatique convertit le poids total recyclé en Points Éco, ouvrant la voie à l'implémentation future de mécanismes de récompense destinés à encourager la participation active aux initiatives d'assainissement.

Concernant l'option Profil : le compte utilisateur étant créé exclusivement par l'administrateur, l'utilisateur peut toutefois modifier ses informations personnelles et changer le mot de passe par défaut (PassWord123!) attribué lors de la création du compte.

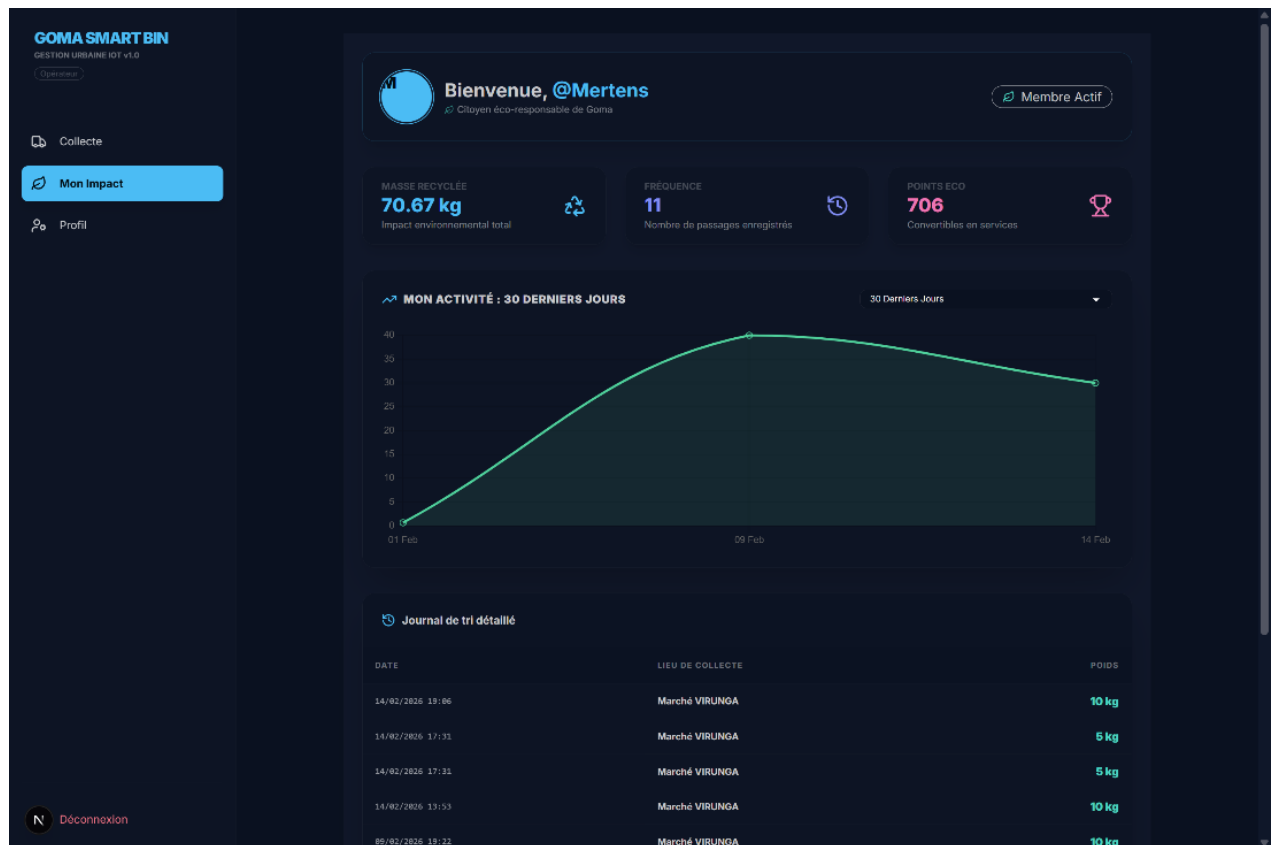


*Figure 3.9 Interface de l'utilisateur*

### 3.4 Analyses de robustesse et latence

La phase de tests est essentielle pour valider la fiabilité du prototype et s'assurer que les données collectées sont fidèles à la réalité physique. Nous avons procédé à une série d'évaluations techniques portant sur la réactivité du réseau.

- *Gestion de coupures* : Les tests de déconnexion volontaire du Wi-Fi effectués plus de 6 fois ont confirmé l'efficacité du stockage LittleFS. Une fois le réseau rétabli, la synchronisation du cache se fait de manière transparente sans perte de données.
- *Latence de transmission* : Le temps de latence entre un scan de badge et l'apparition de la donnée sur le Web est généralement contenu entre 3 et 5 secondes.

Les résultats confirment la viabilité du prototype et montrent que l'évolution vers une gestion de déchets efficace dépend désormais davantage d'une organisation sérieuse que de limitations techniques.

### 3.5 Impact social du système proposé

Le prototype de poubelle développé dans ce travail s'inscrit dans une démarche visant à améliorer les pratiques de gestion des déchets et à encourager des comportements plus responsables au sein de la population. En facilitant la collecte et le suivi numérique des dépôts, le système contribue à structurer davantage les mécanismes de gestion des déchets dans l'espace urbain.

L'un des apports sociaux importants de la solution proposée réside dans *l'incitation au tri des déchets à la source*. En effet, le dispositif n'est pas destiné à être déployé de manière à recevoir toute sorte de déchet. Il est plutôt destiné à être déployé sous la forme *d'un ensemble de réceptacles spécialisés*, chacun étant dédié à une catégorie spécifique de déchets. Ainsi, dans un environnement urbain donné, plusieurs unités peuvent être installées simultanément, par

exemple : une poubelle destinée aux déchets organiques, une autre aux plastiques, une aux verres, ou encore aux déchets recyclables. Cette organisation encourage naturellement les usagers à adopter des pratiques de tri lors du dépôt des déchets.

Par ailleurs, l'intégration conjointe de l'identification des usagers et de la mesure du poids des déchets, associée à un module de suivi et de facturation, permet d'introduire une logique de responsabilisation progressive. En effet, le système rend possible l'association entre la quantité de déchets produite et les informations relatives à chaque utilisateur. Cette approche constitue une base technique pouvant soutenir, à terme, l'application du principe du « pollueur-payeur », en établissant un lien direct entre la production de déchets et les contributions associées.

Cependant, l'innovation technologique ne saurait à elle seule résoudre les défis liés à la gestion des déchets. Une sensibilisation continue de la population au tri à la source, à la réutilisation et au recyclage demeure essentielle. La persistance de certaines pratiques inadaptées traduit souvent un manque d'information ou de sensibilisation quant aux conséquences sanitaires, environnementales et esthétiques de la mauvaise gestion des déchets.

Dans cette perspective, les interfaces numériques associées au système peuvent également jouer un rôle pédagogique important. En permettant la consultation des informations relatives aux dépôts effectués et à la gestion des déchets, elles peuvent contribuer à renforcer la prise de conscience des usagers et encourager progressivement l'adoption de comportements plus respectueux de l'environnement.

Les résultats de cette phase de réalisation étant désormais présentés, il convient à présent d'en synthétiser les principaux acquis avant d'établir le bilan général de l'étude.

### **3.6 Conclusion partielle**

En définitive, ce troisième chapitre a constitué la phase de matérialisation du projet. Partant d'un assemblage des composants électroniques (ESP32, HX711, RFID) au sein d'un réceptacle constituant le corps de la poubelle, nous avons réussi à donner vie à une unité de collecte intégrant une logique de traitement des données et communicante. L'implémentation de

l'écosystème logiciel, articulé autour de Django pour la gestion des données et de Next.js pour la supervision, a permis de transformer des signaux physiques en indicateurs décisionnels concrets. Les tests de performance ont révélé un résultat de pesée satisfaisant et une latence de transmission tolérable pour un usage urbain en temps réel. Bien que des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la stabilité énergétique et la couverture réseau dans certains quartiers de Goma, les résultats obtenus valident la faisabilité technique et l'utilité sociale de la solution. Ce chapitre clôture ainsi la phase de réalisation, ouvrant la voie à la conclusion générale de ce travail qui dressera le bilan global et les perspectives d'avenir de cette recherche.

# Conclusion générale

## Contributions

Ce travail avait pour objectif de proposer une solution technologique adaptée au contexte urbain de Goma afin d'améliorer la gestion des déchets solides à travers la conception et la réalisation d'un système de poubelle connectée. Face aux défis environnementaux et sanitaires identifiés, notamment en Afrique subsaharienne et en République Démocratique du Congo, il est apparu nécessaire d'explorer des approches innovantes basées sur l'électronique embarquée et l'Internet des Objets (IoT).

La première partie de ce travail a permis d'analyser l'état actuel des pratiques de gestion des déchets et de mettre en évidence les limites des systèmes traditionnels, marqués par un manque de traçabilité et une collecte inefficace. Cette analyse a confirmé la pertinence d'une solution capable d'assurer le suivi des dépôts, la mesure pondérale des quantités collectées et la transmission des données vers une plateforme de supervision centralisée.

La seconde partie a été consacrée à la conception du système. À travers l'élaboration d'un cahier des charges et l'utilisation de la modélisation UML, le besoin initial a été transformé en une architecture technique structurée. Un choix de conception stratégique a été effectué en privilégiant une robustesse mécanique alliée à une intelligence numérique, afin de réduire la consommation énergétique et d'assurer une meilleure adaptabilité au contexte d'usage public de Goma. Cette phase a également permis de justifier les choix technologiques critiques tels que l'usage du microcontrôleur ESP32, du lecteur RFID pour l'identification et du module HX711 pour la précision de la pesée.

Enfin, la phase de réalisation a concrétisé cette architecture par l'intégration de composants électroniques et le développement d'un écosystème logiciel complet associant Django pour la gestion des API et Next.js pour le tableau de bord de supervision. Le prototype obtenu démontre une fiabilité technique, avec une certaine précision de mesure (erreur moyenne relative  $< 1,26\%$ ) et une réactivité en temps réel. Les fonctionnalités implémentées, telles que

la cartographie interactive et l'exportation de rapports d'analyse, confirment l'intérêt d'une approche combinant sobriété matérielle et puissance numérique.

Au-delà de la réussite technique, ce travail démontre que des solutions locales, adaptées aux réalités socio-économiques et climatiques, peuvent répondre efficacement aux enjeux de gestion des déchets urbains.

Ainsi, ce projet constitue une étape décisive vers une gestion plus structurée, transparente et durable des déchets, mettant la technologie au service du développement urbain intelligent.

## Critique du travail

Malgré les résultats encourageants obtenus lors des tests de prototypage, le déploiement du système à l'échelle industrielle dans une ville comme Goma soulève des défis techniques et opérationnels parmi lesquels nous pouvons citer :

- *Dépendance à la couverture réseau* : Le prototype repose sur une connectivité Wi-Fi. Dans certains quartiers périphériques de Goma où la couverture internet est instable, la transmission en temps réel peut être perturbée. Bien que le stockage local (LittleFS) soit implémenté, une latence prolongée peut affecter la réactivité et l'importance du Dashboard.
- *Autonomie Énergétique* : L'utilisation d'une batterie standard limite l'autonomie à quelques jours en cas de sollicitation intense du système. Une maintenance régulière pour la recharge reste nécessaire, ce qui peut représenter un coût logistique.

## Perspectives d'amélioration

Pour transformer ce prototype en une solution urbaine pérenne, plusieurs axes d'évolution sont envisagés :

1. **Transition vers le protocole LoRaWAN** : afin de surmonter les contraintes liées au Wi-Fi, l'adoption du protocole LoRaWAN permettrait de garantir une transmission de

données à longue portée, avec une très faible consommation énergétique et une meilleure couverture pour un déploiement à grande échelle en milieu urbain.

2. ***Alimentation Solaire Autonome*** : L'ajout de panneaux photovoltaïques sur le dessus des réceptacles permettrait une auto-recharge continue de la batterie, rendant les unités de collecte totalement indépendantes du réseau électrique.
3. ***Intelligence Artificielle et Maintenance Prédictive*** : L'implémentation d'algorithmes de Machine Learning sur le serveur Django permettrait de prédire les pics de remplissage par quartier en fonction de l'historique. Cela optimiserait encore davantage les tournées des opérateurs de collecte.
4. ***Application Mobile Native*** : Développer une application mobile (Android/iOS) permettant aux abonnés de recevoir des notifications sur leur impact éco et de localiser la poubelle disponible la plus proche en temps réel.
5. ***Système de paiement en ligne*** : Mettre en place un système de notification permettant d'informer les utilisateurs, via des messages électroniques (SMS, e-mail ou application mobile), des montants associés à leurs dépôts. Ce dispositif pourrait être complété par l'intégration de solutions de paiement en ligne, offrant aux usagers la possibilité de régler leurs montants à distance de manière simple.
6. ***Renforcement de sécurité lié au dépôt des déchets*** : Ajouter un système de verrou interne commandé par la validation de l'identifiant unique de l'utilisateur avant le dépôt de ses déchets.

## Bibliographie

- [1] Banque mondiale, «Urban Development in Sub-Saharan Africa,» 2020.
- [2] Envynature, Waste Management in Africa: What's Next?, 2022.
- [3] ONU-Habitat, Waste Management in African Cities, UNEP, 2021.
- [4] e. a. A. Diallo, «Air Pollution from Open Waste Burning,» *J. Environ. Sci*, vol. 45, pp. 112-125, 2022.
- [5] OMS, «Health Impacts of Improper Waste Disposal,» Genève, 2023.
- [6] M. Kouassi, «Economic Analysis of Waste Collection Systems,» *Afr. J. Urban Manag*, vol. 12, n° 13, pp. 45-60, 2021.
- [7] Ministère Environnement RDC, Plan National de Gestion des Déchets, Kinshasa, 2021.
- [8] Programme de Nations Unies pour l'Environnement, «etat de l'environnement en Afrique,» Nairobi, 2021.
- [9] M. N. S. K. M. S. E. V. Kasereka, Quantification, qualification et gestion des déchets ménagers dans la ville de Goma, cas du quartier Himbi, Parlons Terre et Biodiversité, Goma, 2022.
- [10] M. B. E. KAKULE KANIKI Toussaint, Défis des services privés dans la gestion des déchets ménagers solides au sein de la Commune de Karisimbi à Goma, Goma, 2025.
- [11] ICT Journal Zambia, «IoT-based Smart Waste Collection System: A Pilot Implementation in Lusaka,» *Zambian ICT Journal*, vol. 10, n° 12, pp. 88-94, 2022.
- [12] B. Mondiale, «What a waste 2.0: A global Snapshot of solid waste Management to 2050,» Wshington DC World Bank, 2018.
- [13] T. A. Couth et C, «Waste management activities and carbon emissons in Africa,» *Waste Management*, vol. 31, n° 11, pp. 131-137, 2011.
- [14] C. V. e. R. C. E. Wilson, «Role of informal sector recycling in waste managment in developing countries,» *Habitat International*, vol. 30, n° 14, pp. 797-808.

- [15] M. d. l. e. D. D. (MEDD), «Atelier sur la problématique de gestion des déchets en RDC,» 2025.
- [16] «. v. 1. n. 1. 2. T. K. Kaniki & B. M. Zaina, « Les pratiques populaires en matière de gestion des déchets ménagers et leurs conséquences à Goma,» *Cahier d'Étude et de Recherche en Sciences de l'Homme et de la Société*, vol. 1, n° %11, 2023.
- [17] «kayence.fr,» [En ligne]. Available: [https://www.keyence.fr/ss/products/marketing/traceability/basic\\_about.jsp#:~:text=La%20tra%C3%A7abilit%C3%A9%20est%20la%20capacit%C3%A9,le%20produit%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20fabriqu%C3%A9%20%C2%BB..](https://www.keyence.fr/ss/products/marketing/traceability/basic_about.jsp#:~:text=La%20tra%C3%A7abilit%C3%A9%20est%20la%20capacit%C3%A9,le%20produit%20a%20%C3%A9t%C3%A9%20fabriqu%C3%A9%20%C2%BB..) [Accès le 17 septembre 2025].
- [18] L. .N, LE PRINCIPE POLLUEUR-PAYEUR, UN MECANISME DE LUTTE CONTRE LA POLLUTION ET DE PROTECTION DE L'ENVIRONNEMENT EN DROIT POSITIF CONGOLAIS, ULPGL GOMA TFC FACULTE DE DROIT, 2021.
- [19] Z. E. M. A. (ZEMA), Smart Waste Management in Lusaka: IoT-Based Monitoring Initiative, Lusaka, 2022.
- [20] R. E. M. A. (REMA), Kigali Smart Waste Pilot Program Report, Kigali, 2023.
- [21] M. o. H. a. U. A. Government of India, Swachh Bharat Mission: Smart Waste Solutions for Urban India, New Delhi, 2021.
- [22] W. W. C. P. UN-Habitat, Global Case Studies and Lessons Learned, Nairobi, 2022.
- [23] C. o. Barcelona, Smart Waste Collection System Overview, Barcelona, 2020.
- [24] P. O. Baraka, Initiation à la programmation des systemes embarqués, cours ULPGL/FST, Goma, 2025.
- [25] “. ‘. o. T. T. R. J. 2. K. Ashton . Ashton, «That 'internet of things' Thing,» *RFID journal*, 2009.
- [26] SAP, «sap.com,» 2025. [En ligne]. Available: <https://www.sap.com/france/products/technology-platform/what-is-iot.html>. [Accès le 08 09 2025].

- [27] D. S. e. E. G. A. Nuñez, «Internet of Things (IoT) for Smart Solid Waste Management: A Comprehensive Review,» *Internet of Things (IoT) for Smart Solid Waste Management: A Comprehensive Review*, 2020.
- [28] P. O. Baraka, Automatique, cours ULPGL/FST, 2025.
- [29] N. B. A. C. L. V. a. M. Z. A. Zanella, «Internet of Things for Smart Cities,» *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 1, n° %11, pp. 22-32, 2014.
- [30] A. D. e. B. Martin, «Critere de selection des microcontrolleurs pour le systèmes IoT industriels,» *Rev. Électron. Ind.*, vol. vol. 45, n° %1 no. 2 , p. 115–123 , Mars 2023.
- [31] M. 1. Q.-c. q. Arduino. (2024. [En ligne]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Guide>. [Accès le 11 Oct 2025].
- [32] E. Gauthier, Programmation de l'Internet des Objets avec l'ESP32. Montréal, QC, Canada : Presses Intégrées, 2023..
- [33] B. SERGE, CONCEPTION ET REALISATION D'UN BRACELET CONNECTE POUR LE SUIVI EN TEMPS REEL DES PERSONNES SOUFFRANT DES MALADIES CARDIOVASCULSIREs, Memoire ULPGL/GOMA FST, 2023.
- [34] C. FES. [En ligne]. Available: <https://youtu.be/YdfMg0N9sPU>.
- [35] [En ligne]. Available: [https://a2itronic.ma/wp-content/uploads/2024/07/Capteur-force-1-a-20-KG-ampli-HX711\\_1.jpg](https://a2itronic.ma/wp-content/uploads/2024/07/Capteur-force-1-a-20-KG-ampli-HX711_1.jpg).
- [36] [En ligne]. Available: <https://www.indiamart.com/proddetail/rfid-reader-and-tags-efficient-identification-for-access-control-and-automation-2855450906712.htm>.
- [37] D. & T. V. Guinard, Building the Web of Things: With examples in Node.js and Raspberry Pi. Manning Publications., 2016.
- [38] [En ligne]. Available: <httpswww.pedagogie.ac-nice.frsvtp=4319>.
- [39] D. M. KALIMUMBALO, Conception et réalisation d'un système de distribution automatique de boisson, memoire ULPGL FSTA, 2018.

# Annexe A

## Extrait du micrologiciel embarqué



```
correctionbug_collecteur | Arduino 1.8.19
Fichier Édition Croquis Outils Aide

correctionbug_collecteur §
// LOOP PRINCIPAL
// =====
void loop() {
  // Gestion Wi-Fi en arrière-plan
  if (WiFi.status() != WL_CONNECTED && millis() - last_wifi_check > 10000) {
    WiFi.begin(ssid, password);
    last_wifi_check = millis();
  }

  // Détection du retour du WiFi pour envoyer le cache
  bool wifi_actuellement_connecte = (WiFi.status() == WL_CONNECTED);
  if (wifi_actuellement_connecte && !wifi_etait_connecte) {
    Serial.println("WiFi rétabli - Tentative d'envoi du cache...");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print("WiFi OK - Envoi...");
    envoiFichiersHorsLigne();
    delay(2000);
    lcd.clear();
  }
  wifi_etait_connecte = wifi_actuellement_connecte;

  // Vérification périodique du cache (toutes les 30 secondes)
  if (wifi_actuellement_connecte && millis() - last_cache_check > 30000) {
    last_cache_check = millis();
    if (LittleFS.exists("/offline.json")) {
      envoiFichiersHorsLigne();
    }
  }

  // Acquisition constante du poids
  float poids_actuel = scale.get_units(10) * 0.001;

  switch (etat) {

    case ATTENTE_CARTE:
      lcd.setCursor(0,0); lcd.print("SYSTEME PRET ");
      lcd.setCursor(0,1); lcd.print("Scanner Badge...");

      // A. DÉTECTION ANONYME
```



correctionbug\_collecteur \$

```
// A. DÉTECTION ANONYME
if ((poids_actuel - dernier_poids_stable) > 0.150) {
    float delta_anonyme = poids_actuel - dernier_poids_stable;
    afficherMsg("DEPOT ANONYME", String(delta_anonyme, 2) + " Kg");
    traiterDepot("ANONYME", delta_anonyme, lireBatterie());
    dernier_poids_stable = poids_actuel;
    delay(2500);
    lcd.clear();
}

// B. DÉTECTION BADGE
if (rfid.PICC_IsNewCardPresent() && rfid.PICC_ReadCardSerial()) {
    carte_active = lireCarte();
    if (carte_active == UID_OPERATEUR) {
        gererVidange();
    } else {
        poids_initial = poids_actuel;
        session_timer = millis();
        afficherMsg("BIENVENUE", "ID: " + carte_active);
        delay(1500);
        etat = DEPOT_EN_COURS;
    }
}
break;

case DEPOT_EN_COURS:
    int sec = (TIMEOUT_SESSION - (millis() - session_timer)) / 1000;
    lcd.setCursor(0,0); lcd.print("DEPOSEZ VOS DECHETS");
    lcd.setCursor(0,1); lcd.print("TEMPS: " + String(sec) + "s");

    if ((rfid.PICC_IsNewCardPresent() && rfid.PICC_ReadCardSerial() && lireCarte() == carte_active)
        || (millis() - session_timer > TIMEOUT_SESSION)) {

        float poids_final = scale.get_units(10) * 0.001;
        float delta_citoyen = poids_final - poids_initial;

        if (delta_citoyen > 0.05) {
            lcd.clear();
            lcd.setCursor(0,0); lcd.print("POIDS VALIDE");

```

## Annexe B

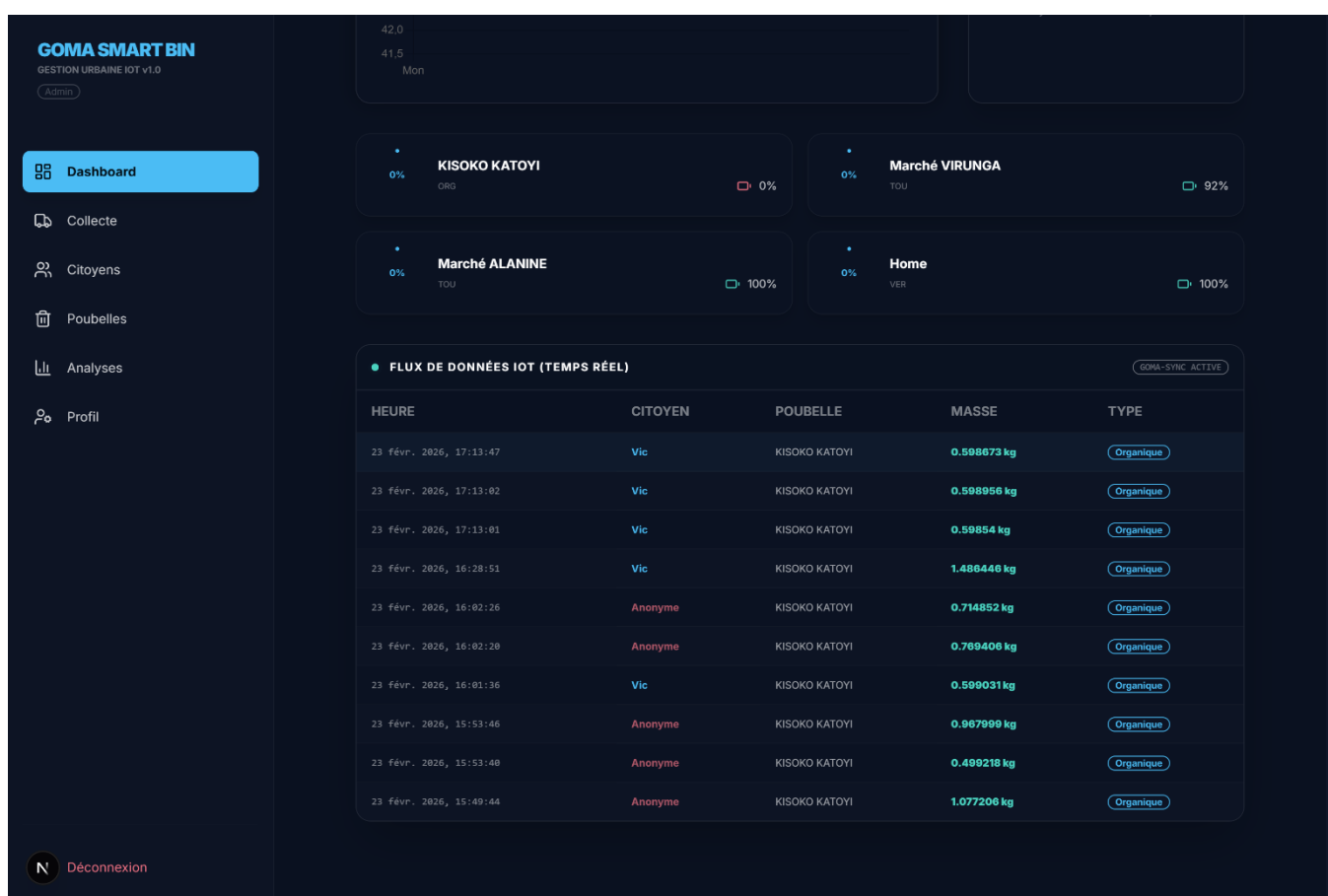
### Relevés de tests de précision de la pesée

| Essais          | Masse connue<br>(Kg) | Valeur Mesurée<br>(kg) | Ecart absolu<br>(kg) | Erreur relative |
|-----------------|----------------------|------------------------|----------------------|-----------------|
| Bouteille d'eau | 0.600                | 0.59                   | 0.01                 | 1.66 %          |
| Amas de pierre  | 1.0                  | 0.99                   | 0.01                 | 1.00 %          |
| Bouteille d'eau | 1.5                  | 1.48                   | 0.02                 | 1.33 %          |
| Sac de déchets  | 2                    | 1.98                   | 0.02                 | 1.00 %          |
| MOYENNE         |                      |                        | 0.015Kg              | 1.25            |

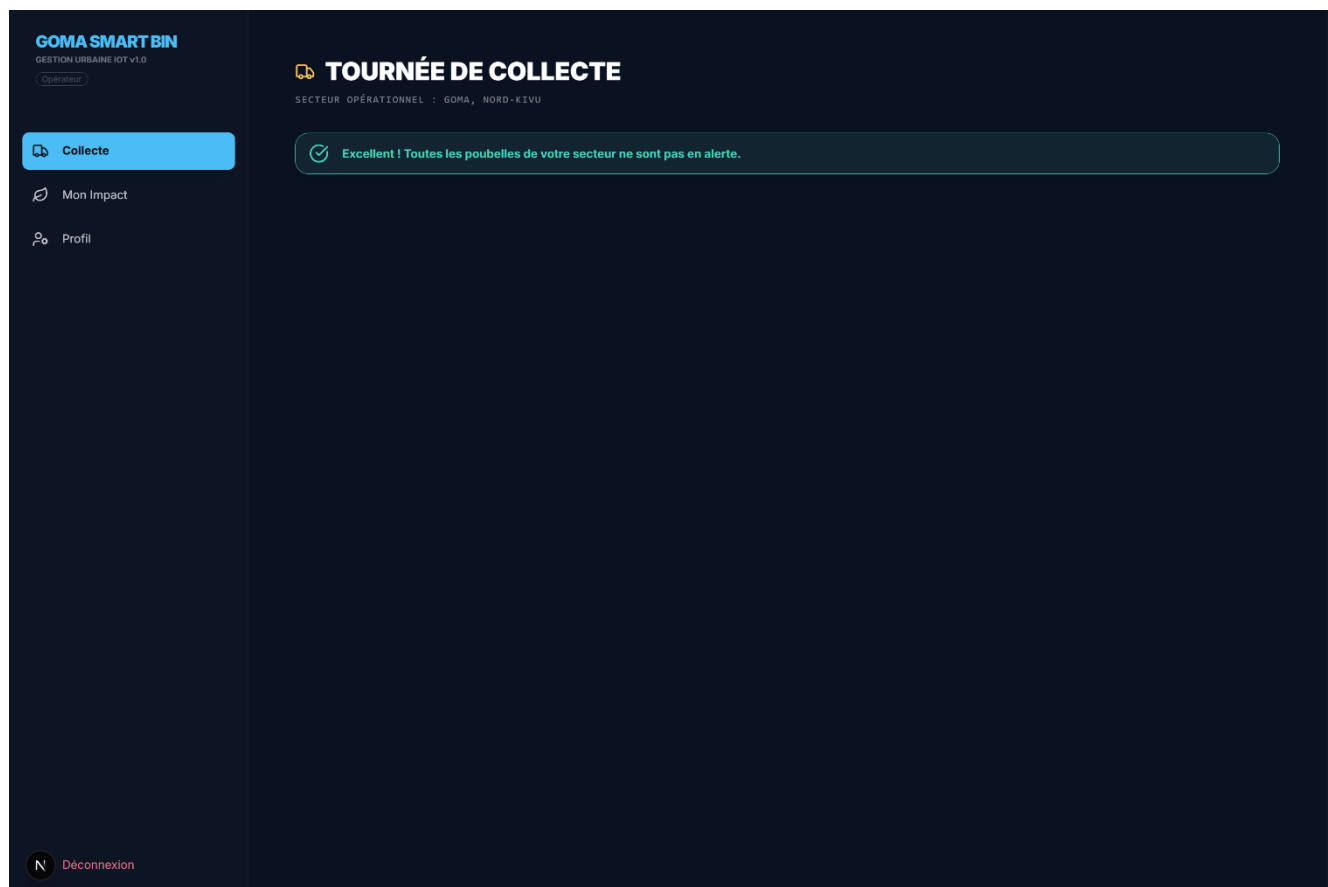
# Annexe C

## Interface de suivi complémentaire

### C.1 Tableau de suivi de flux des données IoT



## C.2 État de la page collecte sans poubelle en alerte



## C.3 Page de connexion



**GOMA SMART BIN**  
GESTION INTELLIGENTE DES DÉCHETS

NOM D'UTILISATEUR

MOT DE PASSE  
 

**CONNEXION**

[MOT DE PASSE OUBLIÉ?](#)

N