

Étude sur l'intégration de l'internet des objets pour optimiser la gestion des déchets dans une ville de la RDC

[Study on the Integration of the Internet of Things to Optimize Waste Management in a City in the DRC]

MAZUNZE Bertin, KASONGO NYANGE Franck, TUBONGYE SHABANI Arlène, TSHIKA BILOMBA Bety, NGOMBE LENGE Hydro, and LUKUSA MUVUALA Vicky

Département de Sciences Informatiques, ISC-Lubumbashi, RD Congo

Copyright © 2025 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study explores the integration of the Internet of Things (IoT) into urban waste management in the Democratic Republic of Congo (DRC), focusing on Lubumbashi as a case study. The goal is to address the growing challenges of waste accumulation and inefficient infrastructure management using smart bins. These devices are equipped with sensors to monitor fill levels and communicate in real-time with management systems. The Unified Process (UP) method structured the development, while SysML modeling ensured precise design. A functional prototype was created, demonstrating the effectiveness of the proposed approach in an urban context of the DRC.

KEYWORDS: Internet of Things, Waste management, Smart bins, IoT, UP, SysML, sustainable development.

RESUME: Cette étude explore l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) dans la gestion des déchets urbains en République Démocratique du Congo (RDC), avec Lubumbashi comme étude de cas. L'objectif est de résoudre les défis croissants liés à l'accumulation des déchets et à la gestion inefficace des infrastructures en utilisant des poubelles intelligentes. Ces dispositifs sont équipés de capteurs pour surveiller le niveau de remplissage et communiquer en temps réel avec les systèmes de gestion. La méthode Unified Process (UP) a structuré le développement et la modélisation SysML a permis une conception précise. Un prototype fonctionnel a été réalisé, démontrant l'efficacité de l'approche proposée dans un contexte urbain de la RDC.

MOTS-CLEFS: Internet des Objets, Gestion des déchets, Poubelles intelligentes, IoT, UP, SysML, Développement durable.

1 INTRODUCTION

La gestion des déchets urbains constitue un défi majeur dans de nombreuses villes à travers le monde. Dans les villes africaines, la production sans cesse croissante d'ordures ménagères et autres déchets pose un important problème de gestion pour leur collecte et leur traitement [1] et ce problème est particulièrement aigu en République Démocratique du Congo (RDC). Dans les grandes villes de la RDC, les infrastructures de gestion des déchets sont souvent insuffisantes, entraînant un dépôt désordonné des déchets dans les rues et les canaux d'évacuation des eaux (terrassés). Cette situation conduit à une accumulation de déchets, provoquant des obstructions dans les systèmes de drainage et exacerbant les inondations pendant la saison des pluies, tout en créant des risques sanitaires importants pour la population.

Ces dernières années, la pandémie de COVID-19 a révélé de nouvelles vulnérabilités. Le contact avec des surfaces publiques, telles que les poubelles, s'est avéré être un vecteur de propagation des maladies, ajoutant un niveau supplémentaire d'urgence à la gestion hygiénique des déchets.

C'est dans ce contexte complexe que notre motivation pour cette étude prend racine. Nous sommes convaincus que l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) représente une opportunité innovante pour relever ces défis. En effet, les technologies IoT permettent une gestion plus intelligente des déchets, grâce à des dispositifs interconnectés capables de communiquer en temps réel. Pour notre recherche, nous envisageons l'utilisation de poubelles intelligentes, équipées de capteurs de remplissage et d'autres dispositifs, permettant d'améliorer les processus de collecte et de traitement des déchets en milieu urbain.

1.1 PROBLEMATIQUES

La gestion des déchets ménagers et, par extension, la planification et la gestion de l'environnement urbain sont des questions complexes pour les gestionnaires urbains en raison de leurs effets sur l'environnement et la santé humaine, ainsi que pour la situation financière des villes [2]. La question des déchets au cours de ces dernières décennies en République Démocratique du Congo est devenue une préoccupation majeure car la production journalière moyenne des déchets solides dans la ville de Kinshasa est estimée à 10 000 tonnes et le taux d'assainissement n'est estimé qu'à 20% sur l'étendue du pays [3]. L'environnement urbain est insalubre car les déchets solides, les eaux usées et les eaux pluviales dépassent les capacités financières des administrations communales à les traiter au même rythme de leur production. Les caniveaux sont bouchés avec des ordures jetées sans tri produisant ainsi des pollutions visuelles [4].

Depuis longtemps, plusieurs entreprises ont été créées par le gouvernement pour s'occuper des déchets. La loi n°11/009 du 9 juillet 2011, qui parle de la protection de l'environnement, dit que la gestion des déchets est importante pour protéger la nature. Cependant, cette loi n'est pas bien appliquée à cause du manque d'argent, du manque de contrôle, et de la faible participation des citoyens [5].

Dans presque toutes les villes de la RDC, des entreprises sont mises en place pour gérer les déchets. Mais ces entreprises n'arrivent pas à résoudre le problème, car on trouve encore beaucoup de déchets dans les rues, ce qui pose des problèmes pour les habitants. Même les entreprises privées qui viennent aider les entreprises publiques ont du mal à fonctionner, car elles manquent de moyens. Elles ne payent pas bien leurs travailleurs, accumulent des mois de retard de salaire et n'ont pas assez d'argent pour entretenir leurs équipements. Ces problèmes, comme le manque d'entretien des véhicules et des machines, rendent le travail difficile pour ces entreprises. De nombreuses campagnes lancées pour la salubrité telles que: « opération Kin-propre » en septembre 1977 « Salongo » et depuis mars 2005: opération coup de poing « Kin-Bopeto » et la récente de la Fédération des ONG laïques à vocation Economique au Congo (FOLECO) [6].

Le programme d'assainissement Kinshasa Bopeto, lancé le 19 octobre 2020 sous l'impulsion du gouverneur Gentiny Ngobila Mbaka et en présence du président Félix Antoine Tshisekedi. La population attendait impatientement de voir la propreté de la ville et surtout la réussite sur l'accumulation des immondices dans les avenues et des routes principales de Kinshasa. Mais malheureusement malgré ces efforts, les déchets continuent de s'accumuler dans divers quartiers de Kinshasa.

En posant notre regard dans la ville de Lubumbashi, il s'avère que de manière quotidienne, « les plastiques sont fortement utilisés à Lubumbashi » [7]. Mais sa gestion après usage pose un sérieux problème. On observe les plastiques usés partout, les longs des avenues, dans des caniveaux et autres canalisations d'eau. Sur le grand canal appelé Naviundu qui traverse la chaussée de Kasenga au niveau de l'arrêt de bus Texaco au quartier Bel-Air et sur l'avenue de Plaine, on y observe un tas de bouteilles en plastique formant une nappe qui couvrent tout le canal. Cette nappe empêche ainsi le passage des eaux. Il est donc difficile d'apercevoir l'eau.

Et pourtant, les autorités politico-administratives en partenariat avec les ONG évoluant dans le domaine de l'environnement organisent des séances de sensibilisation sur les conséquences des plastiques sur l'environnement. Ceci, en vue de lutter contre la pollution plastique. Mais le comportement des citoyens demeure le même et les objectifs sont loin d'être atteints.

1.2 HYPOTHESES

Pour remédier aux problèmes précités, nous estimons que l'intégration de nouvelles technologies, notamment l'Internet des Objets (IoT), apparaît comme une solution innovante et adaptée. L'utilisation de capteurs IoT dans les poubelles publiques permettrait de surveiller le niveau de remplissage en temps réel. Ces capteurs, connectés à une plateforme centrale, envoient des données sur le statut des poubelles, permettant ainsi aux entreprises publiques et privées de planifier de manière optimale les itinéraires de collecte. Cela éviterait le débordement des poubelles et réduirait le temps et les coûts liés à la collecte.

Grâce aux données collectées par les capteurs IoT, les itinéraires de collecte des camions pourraient être optimisés pour se rendre uniquement dans les zones où les poubelles sont pleines. Cette solution réduirait non seulement le gaspillage de

carburant, mais aussi les coûts d'opération, tout en garantissant un service plus efficace. Le succès de toute solution technologique dépend aussi de la participation des citoyens. Une campagne de sensibilisation à grande échelle serait mise en place pour informer la population sur l'importance de la gestion des déchets et l'utilisation correcte des poubelles intelligentes. Les citoyens pourraient également être encouragés à participer via une application mobile, qui permettrait de signaler les zones problématiques en termes de déchets. De plus, les poubelles seraient équipées de haut-parleurs pour sensibiliser et assister les usagers sur la façon d'utiliser ces poubelles intelligentes. Afin de faciliter le recyclage, les poubelles intelligentes seraient équipées de deux compartiments, permettant ainsi de trier les déchets selon leur nature (plastiques, papiers, organiques, etc.). Le module GSM servirait à notifier les acteurs responsables des poubelles sur leur niveau de remplissage, tandis que le module GPS permettrait de localiser facilement les poubelles intelligentes.

Enfin, un partenariat entre les municipalités et les entreprises privées serait essentiel pour financer et déployer l'infrastructure IoT. Les entreprises privées, comme Katanga Usafi et autres, pourraient également bénéficier d'une meilleure organisation et efficacité grâce à la technologie, tout en contribuant à améliorer la propreté des villes. Grâce à l'infrastructure IoT, il est possible de suivre l'emplacement des conteneurs de déchets, de surveiller le niveau de déchets déposés, d'identifier les emplacements avec la plus forte demande, de suggérer le chemin le plus court pour l'optimisation de la collecte des déchets solides, ou même d'interagir avec les citoyens pour encourager le dépôt à des moments où le conteneur peut recevoir des déchets [8].

2 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Cette section décrit les ressources et approches utilisées pour concevoir et valider la solution IoT pour la gestion des déchets urbains à Lubumbashi.

2.1 MATÉRIELS

La mise en œuvre d'une poubelle intelligente pour la ville de Lubumbashi repose sur un ensemble de composants matériels et logiciels soigneusement sélectionnés pour répondre aux besoins du projet.

Parmi ces composants, on retrouve:

- Les matériels métalliques tel que les tôles, les tubes, les cornières pour fabriquer le prototype de la poubelle en métal. Le choix du métal est justifié par sa robustesse face aux conditions climatiques de Lubumbashi, où les températures peuvent varier énormément.
- **Panneau solaire:** Assure l'alimentation en énergie de manière durable.
- **Batterie:** Stocke l'énergie pour garantir une autonomie même en l'absence de soleil.
- **Capteurs IoT:** Incluent des capteurs de présence et de niveau de remplissage pour surveiller l'état des déchets.
- **Modules GPS et GSM:** Permettent la localisation et la transmission des données en temps réel.

Nous avons aussi utilisé les composants immatériels essentiels à la conception, au développement et à la gestion de notre projet de la poubelle intelligente. Ces outils et technologies immatériels ont été des piliers indispensables pour garantir l'efficacité et la fluidité de l'ensemble du système, allant de la programmation à la gestion des données. Nous avons utilisé ici les outils tel que:

- **Android Studio:** Cet IDE (Integrated Development Environment) est utilisé pour le développement de l'application mobile Android.
- **Framework Flutter:** Le Framework Flutter, développé par Google, est un SDK open-source pour le développement d'applications mobiles multiplateformes. Dans notre cas, Flutter est utilisé pour construire l'interface utilisateur de l'application mobile qui permet aux agents de l'assainissement urbain d'interagir avec la poubelle, de recevoir des notifications, et de gérer les commandes.
- **IDE Arduino:** L'environnement de développement Arduino (Arduino IDE) nous a été très essentiel pour programmer la carte Arduino Mega 2560 de notre système.
- **Langage de programmation Dart:** Dart est le langage de programmation utilisé par Flutter pour le développement d'applications mobiles. Il est optimisé pour les interfaces utilisateur réactives et fournit une grande flexibilité pour gérer les états de l'application, tels que les interactions avec les capteurs de la poubelle, l'ouverture et la fermeture des couvercles, ou encore les notifications envoyées aux utilisateurs.

- **Langage de programmation: C++ (Arduino):** Le langage de programmation Arduino, basé sur le C++, est conçu pour contrôler les microcontrôleurs de la carte Arduino. Ce langage a été utilisé dans notre étude pour nous aider à téléverser les codes dans la carte Arduino.
- **Base de données firebase:** Pour ce projet, nous utilisons Firebase comme système de gestion de base de données. Firebase est une plateforme de développement d'applications mobiles qui fournit des services cloud tels que la base de données en temps réel, l'authentification, et les notifications.

2.2 MÉTHODES

La méthodologie adoptée pour ce projet repose sur le Processus Unifié (UP), une approche itérative et incrémentale qui garantit la gestion efficace des risques et des exigences. Le système a été modélisé à l'aide du langage SysML, qui permet de représenter graphiquement les composants, les interactions et les états du système. Après l'analyse faite du système métier, nous avons identifié les acteurs et les cas d'utilisations suivants:

Tableau 1. Tableau des acteurs

N°	Acteur	Description
1	Utilisateur	Le citoyen qui utilise les poubelles intelligentes pour jeter ses déchets. Il interagit avec le système, notamment en recevant des messages de sensibilisation.
2	Collecteur de déchets	Le professionnel chargé de la collecte des déchets. Il reçoit des notifications concernant le niveau de remplissage des poubelles et leur localisation pour optimiser la collecte.
3	Administrateur	La personne responsable de la gestion et de la supervision du système. L'administrateur analyse les données, gère les utilisateurs et veille à l'efficacité globale du système.

Tableau 2. Identifications des cas d'utilisation

N°	Cas d'utilisation	Description
	Détecter présences	Ce cas d'utilisation permet au capteur de présences de détecter les présences des utilisateurs
1	Gérer les ouvrants	Ce cas d'utilisation permet aux servomoteurs de contrôler l'ouverture et la fermeture des ouvrants de la poubelle.
2	Déposer des déchets	Ce cas d'utilisation permet aux utilisateurs de jeter les déchets dans la poubelle.
3	Notifier le niveau de remplissage	Ce cas d'utilisation permet au module GSM de notifier le collecteur dès que la poubelle est pleine.
4	Sensibiliser les citoyens	Ce cas d'utilisation permet au module DF Player de passer le message de sensibilisation des citoyens.
5	Gérer les utilisateurs	Ce cas d'utilisation permet à l'administrateur de gérer les utilisateurs.
6	Gérer les poubelles	Ce cas d'utilisation aux collecteurs de gérer les poubelles dans le système.
7	Localiser les poubelles	Ce cas d'utilisation permet aux utilisateurs de localiser rapidement les poubelles dans la ville.
8	S'authentifier	Ce cas d'utilisation permet aux utilisateurs de se connecter dans le système.
9	Créer un compte	Ce cas d'utilisation permet aux nouveaux utilisateurs de créer un compte dans le système.

Plusieurs diagrammes SysML ont été utilisés pour concevoir et décrire le système parmi lesquels nous présentons ici:

1. Diagramme des exigences: Un diagramme des exigences (requirement diagram) répertorie en les classant les affinements des fonctions d'usage et les différentes contraintes et conditions qui doivent être respectées par le système afin qu'il puisse fonctionner correctement mais qui ne sont pas des buts principaux [9]. Nos exigences ont été regroupées en deux familles, les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles. Et chaque famille des exigences représente un diagramme à part. L'image ci-dessous montre le diagramme des exigences de notre système de la poubelle intelligente.

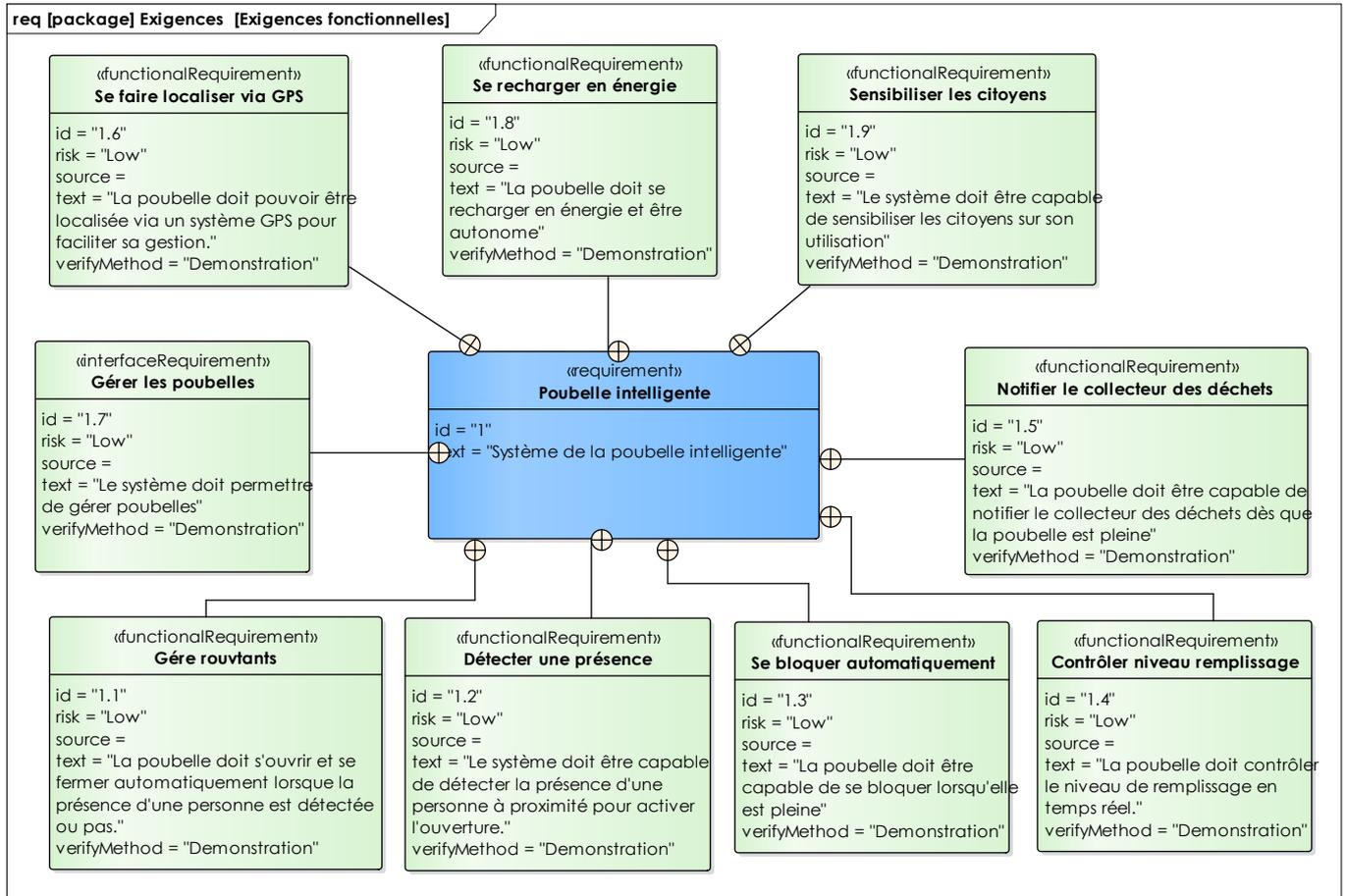


Fig. 1. Diagramme des exigences fonctionnelles

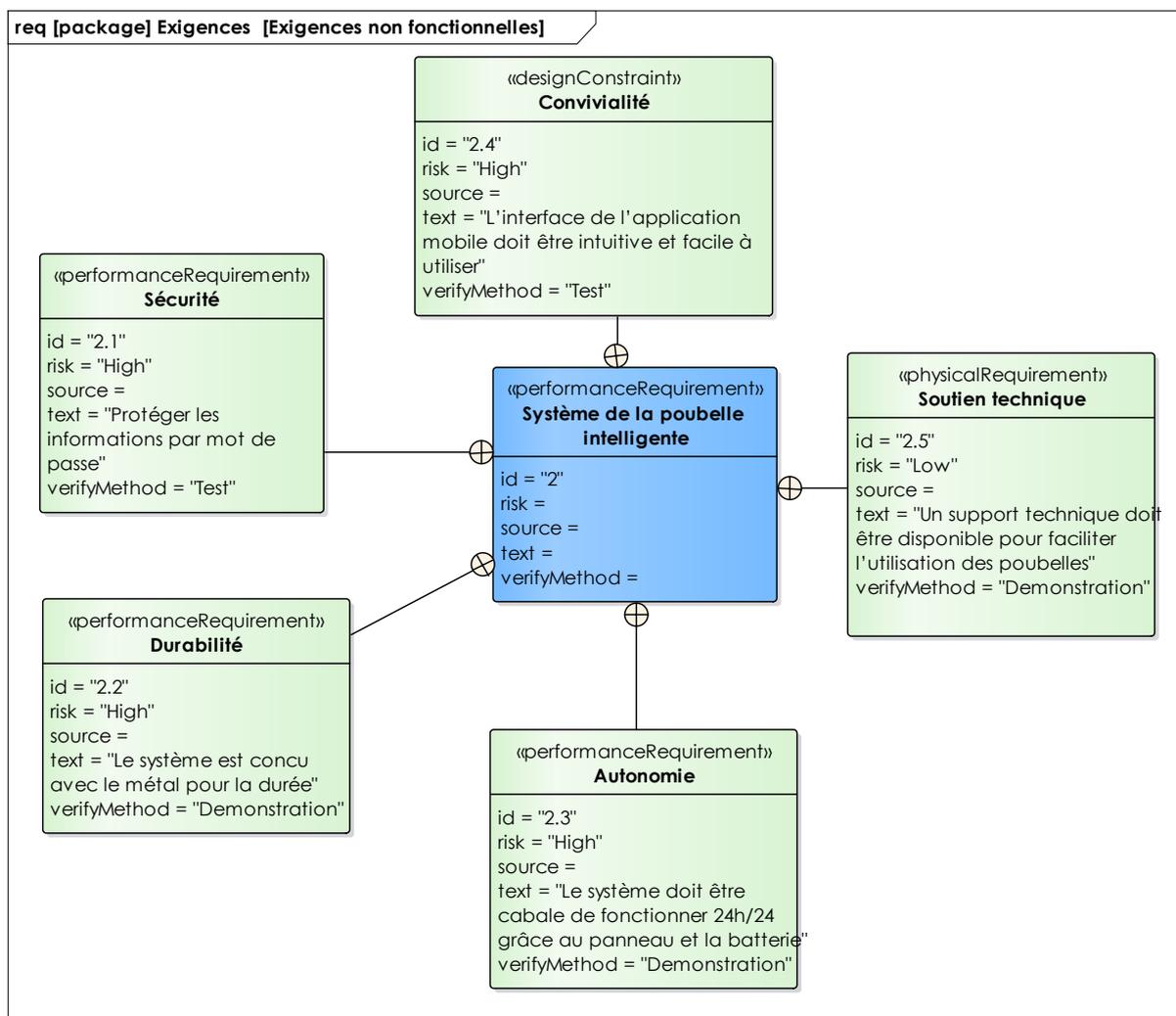


Fig. 2. Diagramme des exigences non-fonctionnelles

2. Diagramme des cas d'utilisation: Ce diagramme décrit les interactions entre les utilisateurs, les collecteurs, et le système. L'image ci-dessous représente notre diagramme de cas d'utilisations.

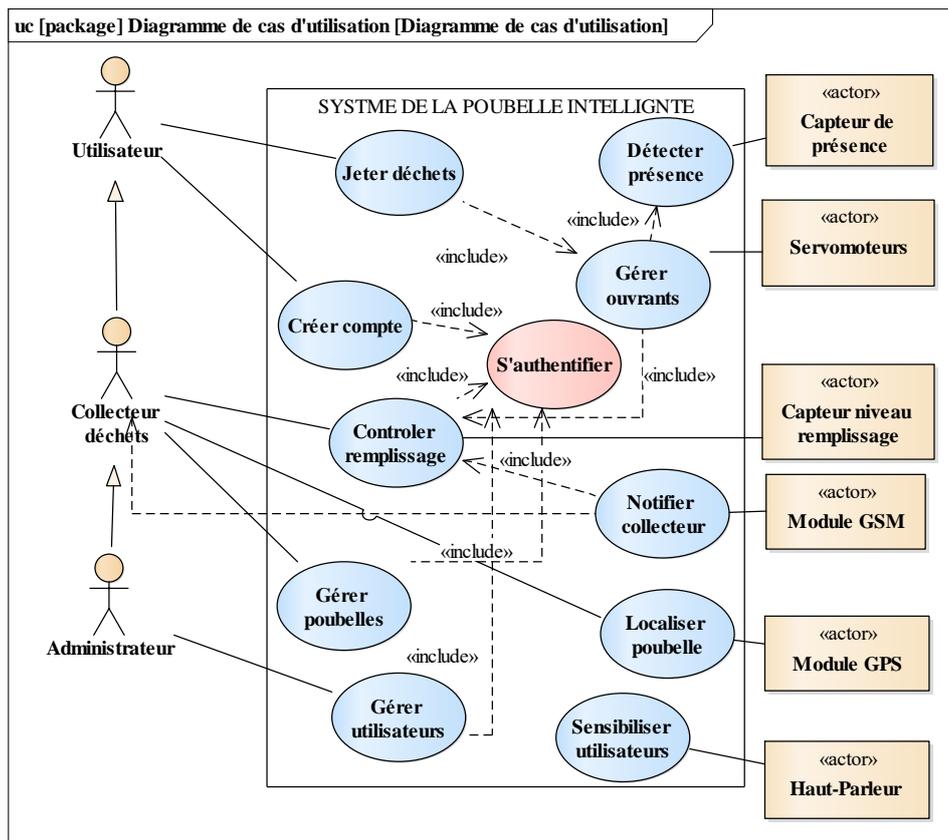


Fig. 3. Diagramme de cas d'utilisations

3. Diagramme de définition des blocs: le diagramme de définition de bloc (BDD, ou Block Definition Diagram en anglais) représente la vue boîte noire d'un bloc [10]. Ce diagramme représente les composants matériels et logiciels (capteurs, modules GSM, serveurs). L'image suivante présente notre diagramme de définition des blocs dans le système de la poubelle intelligente.

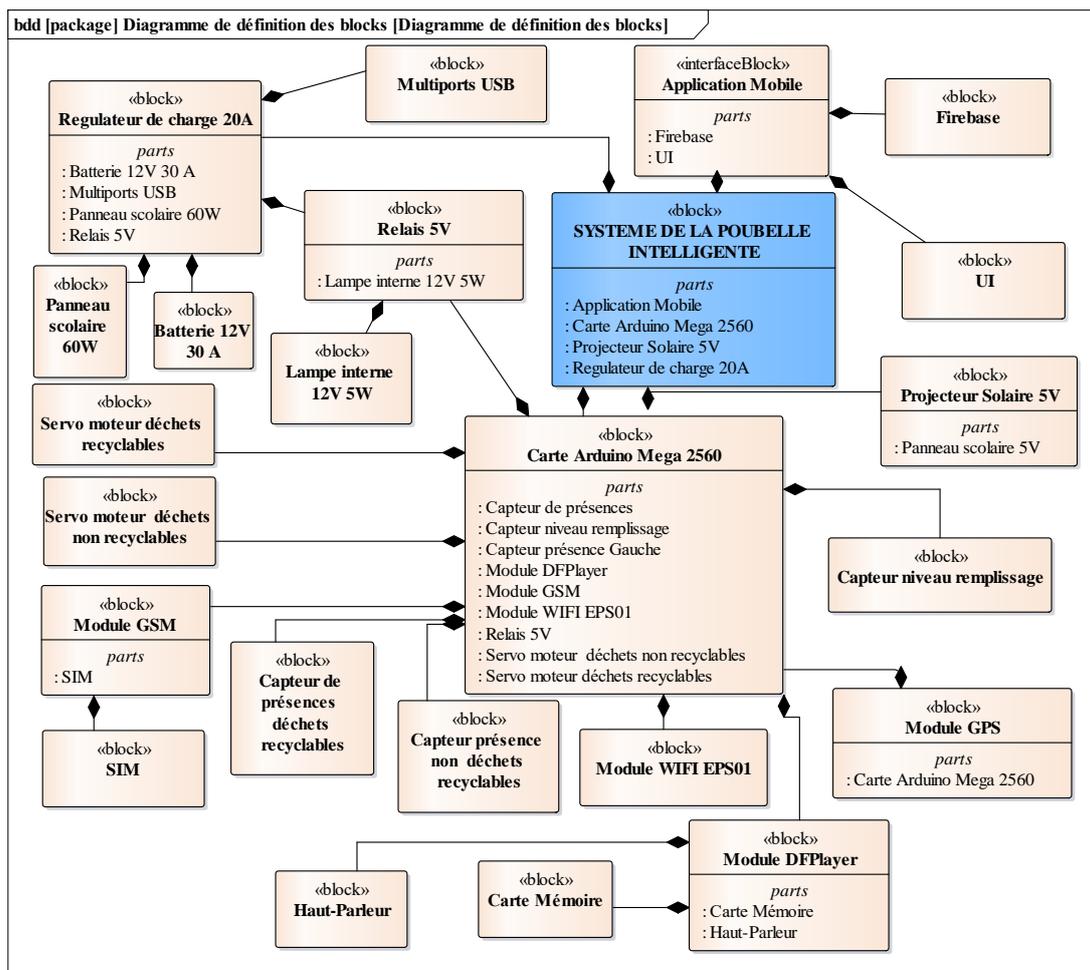


Fig. 4. Diagramme des blocks système de la poubelle intelligente

4. Diagramme des blocs internes: ce diagramme décrit les interactions entre les composants internes, comme les capteurs et les modules de communication. L'image suivante montre le diagramme de blocks internes de notre système de la poubelle intelligente:

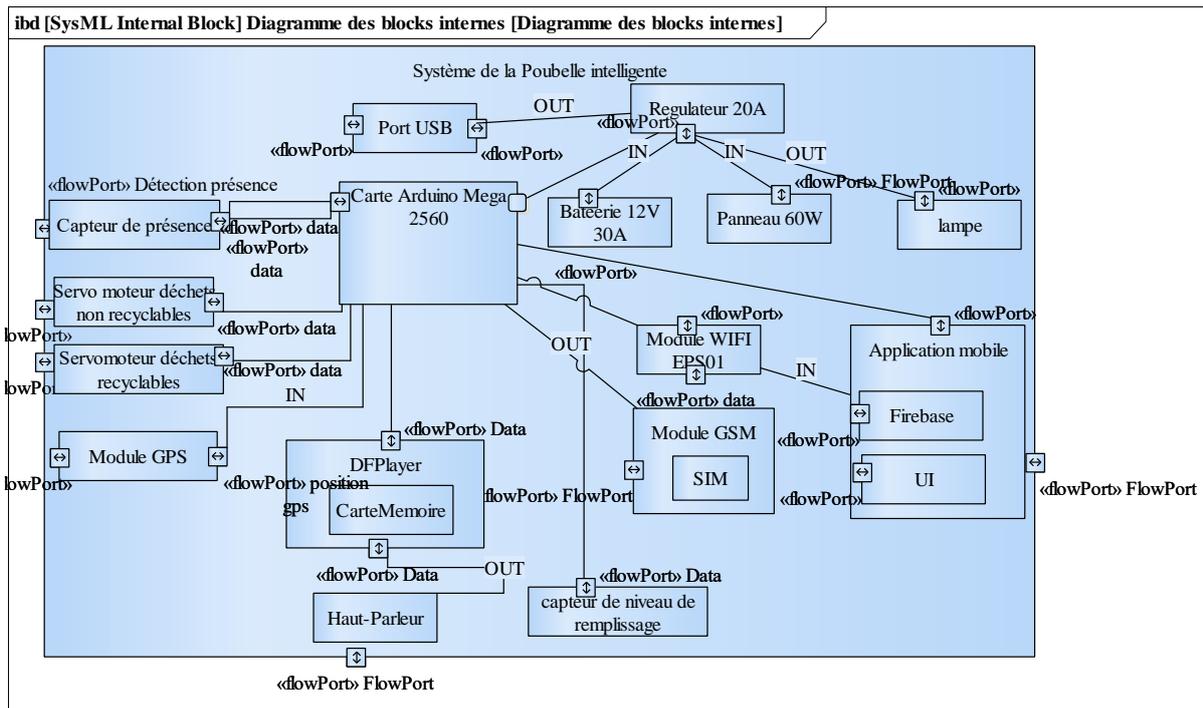


Fig. 5. Diagramme des blocs internes

5. Le diagramme d'état de transition: ce diagramme, est un type de diagramme comportemental qui illustre les différents états par lesquels un système ou un objet peut passer, ainsi que les transitions qui les relient en fonction d'événements spécifiques. Ce diagramme est particulièrement utile pour modéliser la dynamique d'un système en réaction aux événements externes ou internes.

L'image ci-dessous montre les différents états que notre poubelle intelligente traverse dans son fonctionnement:

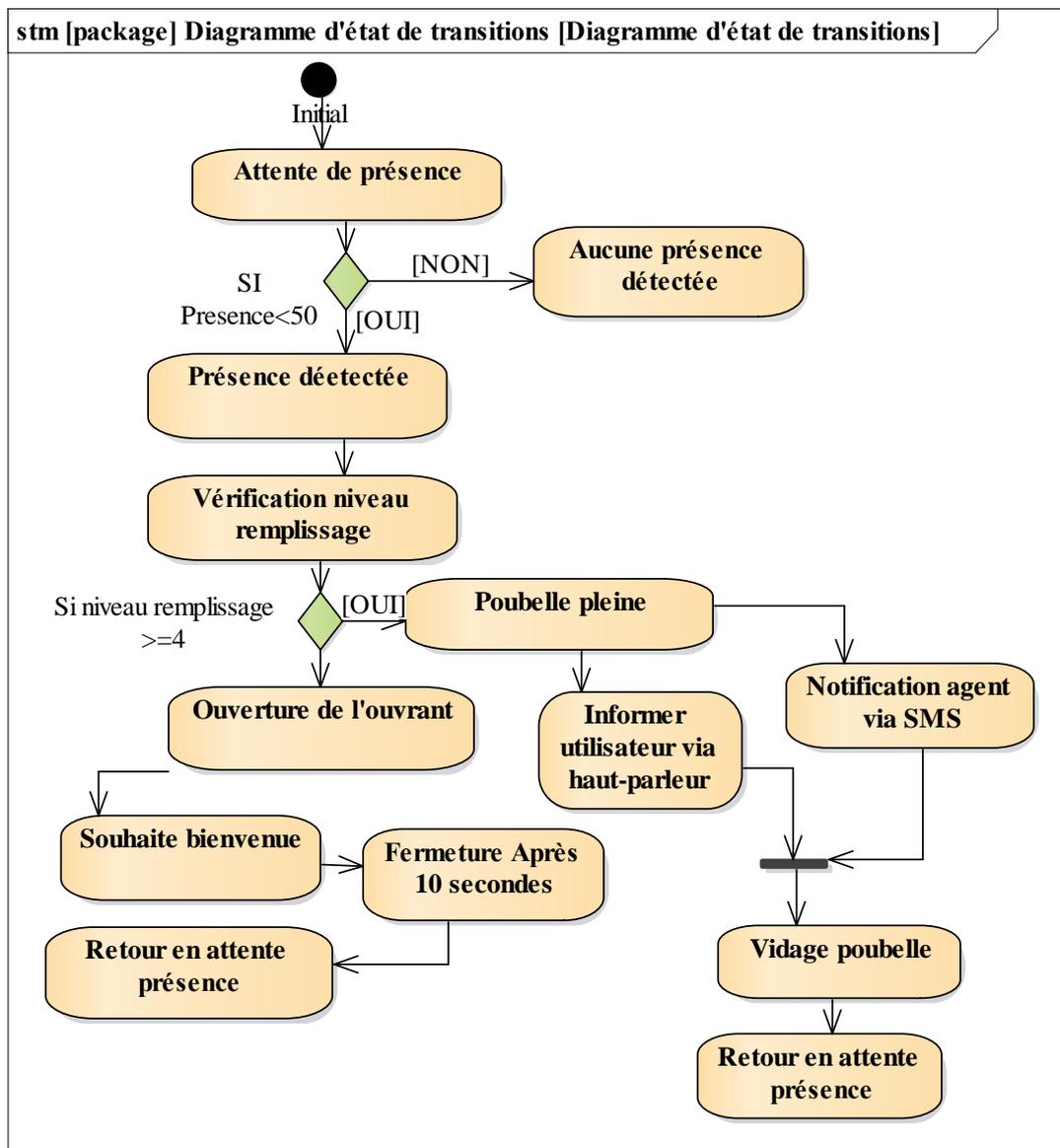


Fig. 6. Diagramme d'état de transitions

3 RÉSULTATS

3.1 RÉSULTATS OBTENUS

Sur l'image ci-dessous, nous présentons le résultat de notre étude, concrètement la poubelle intelligente.



Fig. 7. Présentation de la poubelle intelligente

Notre poubelle intelligente est équipée de technologies avancées qui facilitent son utilisation, permettent un suivi en temps réel et optimisent la gestion des déchets. Ses principales fonctionnalités sont les suivantes:

1. Capteur de présence: La poubelle s'ouvre automatiquement à l'approche d'une personne, sans nécessiter de contact manuel. Cette fonctionnalité assure hygiène et commodité pour les utilisateurs.
2. Détecteur de niveau de remplissage: Un capteur intégré mesure en temps réel le niveau de remplissage de la poubelle. Lorsque le niveau atteint un seuil critique, une alerte est envoyée aux équipes de collecte via une application dédiée, optimisant ainsi le ramassage des déchets.
3. Notifications automatiques: Notre poubelle intelligente est capable d'envoyer des notifications par SMS aux services municipaux dès qu'elle est pleine, garantissant une intervention rapide et évitant les débordements.
4. Géolocalisation par GPS: Grâce à un module GPS, la localisation de la poubelle est suivie en temps réel, facilitant la planification des itinéraires de collecte.
5. Synthèse vocale pour sensibilisation: La poubelle diffuse des messages vocaux en français et en langues locales pour encourager les citoyens à jeter leurs déchets dans les poubelles, renforçant ainsi la sensibilisation écologique.
6. Autonomie énergétique: Alimentée par des panneaux solaires, la poubelle fonctionne de manière autonome sans besoin de branchement électrique externe, assurant un fonctionnement continu et écologique.

Sur image ci-dessous, nous présentons l'application mobile de notre poubelle intelligente. Ici, l'application récupère la position de l'utilisateur et lui indique la poubelle la plus proche, en affichant la distance ainsi que le temps nécessaire pour s'y rendre. Et l'image à droite, montre l'interface de contrôle de niveau de remplissage de la poubelle.

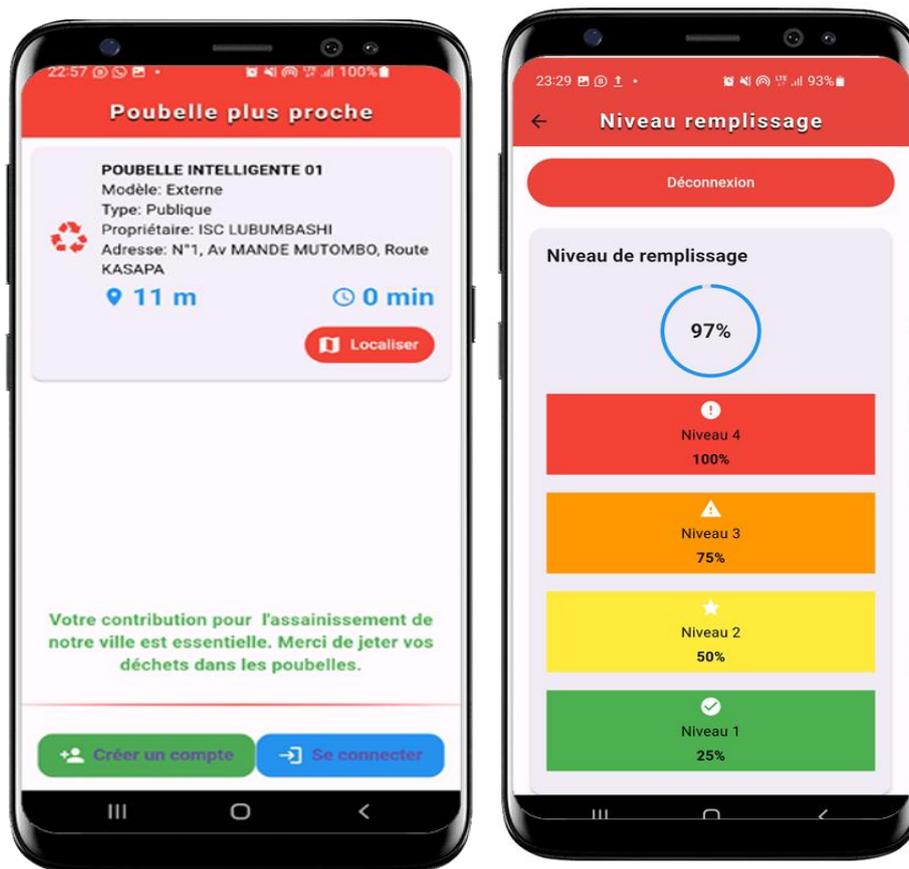


Fig. 8. Localisation de la poubelle et contrôle du niveau de remplissage



Fig. 9. Système de notification agent collecteur par SMS

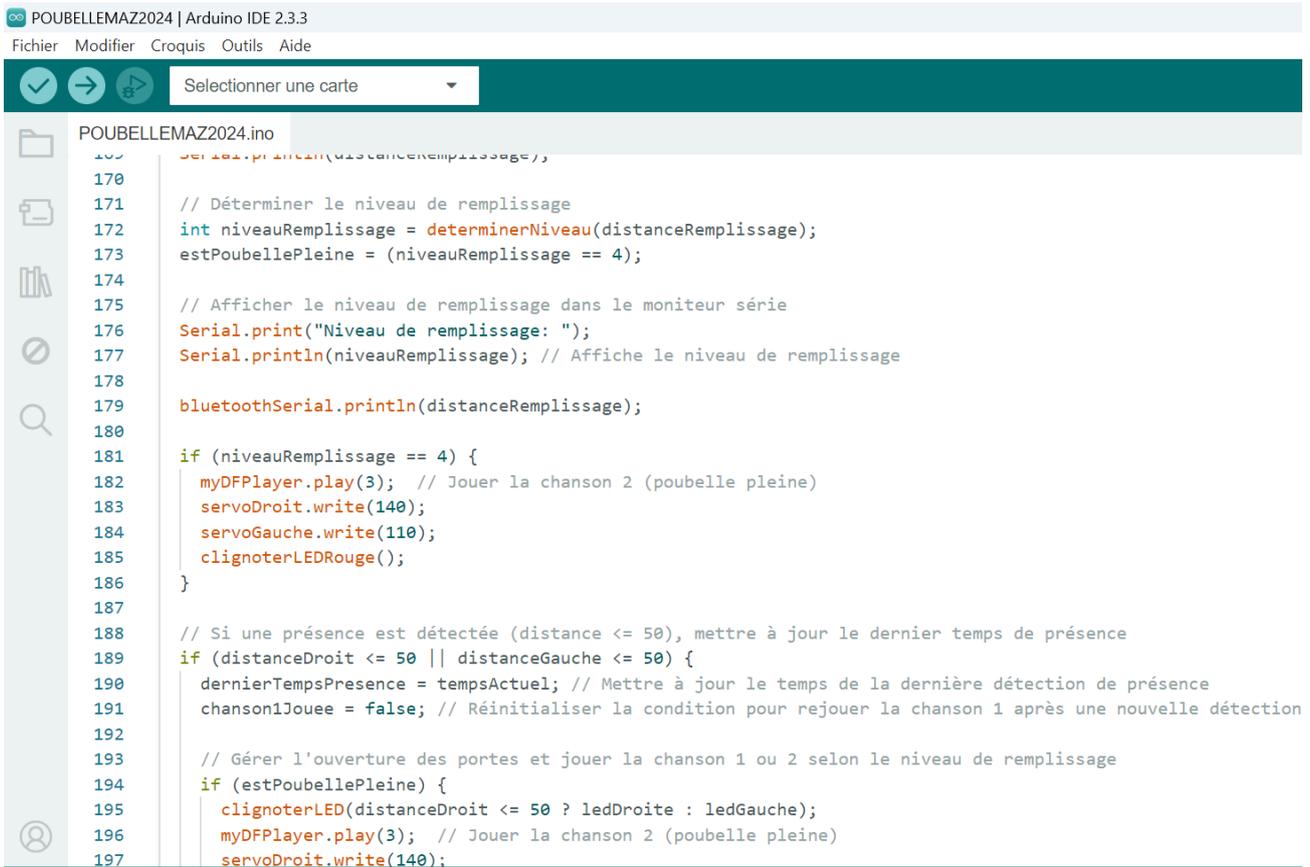
Les tests réalisés dans le cadre de ce projet ont mis en évidence des améliorations significatives dans la gestion des déchets grâce aux poubelles intelligentes. Plusieurs résultats clés ont émergé:

- **La Réduction des trajets inutiles:** Les agents de collecte ont constaté une diminution notable des déplacements inutiles, réduisant ainsi les coûts opérationnels et l’empreinte carbone. Selon leurs propres mots, « nous savons exactement quand intervenir, ce qui nous fait économiser du temps et des ressources. »
- **L’autonomie énergétique fiable:** Les panneaux solaires ont permis de garantir un fonctionnement continu du système, même dans des conditions météorologiques variables. Un collecteur a mentionné que « c’est rassurant de voir que le système ne dépend pas de l’électricité de la ville, souvent instable. »
- **Impact sur les citoyens:** De nombreux utilisateurs ont témoigné d’une meilleure accessibilité aux poubelles et d’une prise de conscience accrue. Une autorité locale a déclaré: « les gens commencent à respecter davantage l’environnement grâce à cette innovation. »

3.2 CODES SOURCES

L’image suivantes montre l’extrait des codes sources de notre solution de la poubelle intelligente. Il s’agit ici des codes sources de la partie Intelligente de notre système de la poubelle intelligente.

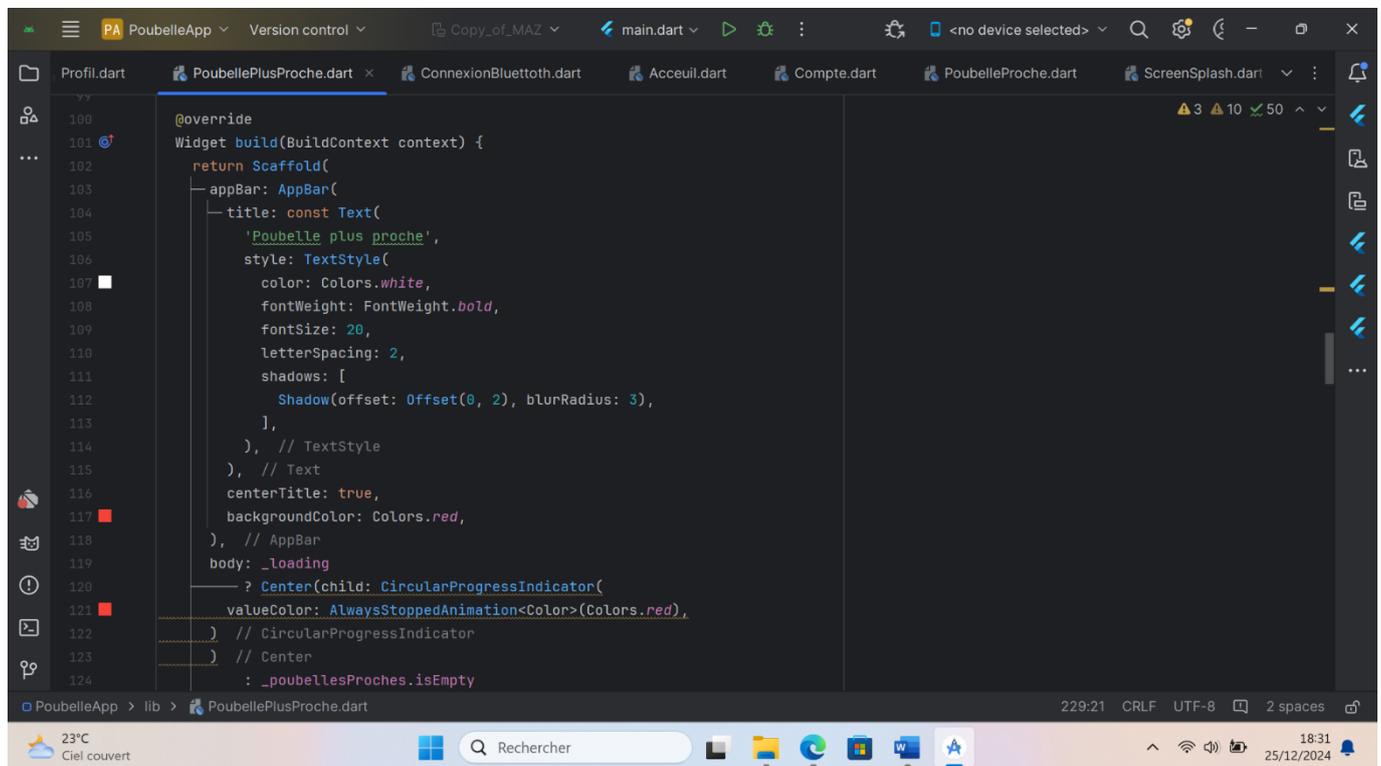
```
POUBELLEMAZ2024 | Arduino IDE 2.3.3
Fichier Modifier Croquis Outils Aide
Selectionner une carte
POUBELLEMAZ2024.ino
1 #include <Servo.h> // Librairie pour contrôler les servomoteurs
2 #include "DFRobotDFPlayerMini.h"
3 #include <SoftwareSerial.h>
4
5 SoftwareSerial bluetoothSerial(17, 16); // Configuration du port série pour Bluetooth
6 DFRobotDFPlayerMini myDFPlayer;
7 bool isPlaying = false;
8
9 // Définir les broches pour le capteur ultrason droit
10 const int trigPinDroit = 9;
11 const int echoPinDroit = 8;
12 unsigned long dernierTempsPresence = 0; // Temps de la dernière détection de présence
13 const long delaiSansPresence = 120000; // 2 minutes (120 000 millisecondes)
14 bool chanson1Jouee = false; // Pour s'assurer que la chanson 1 n'est jouée qu'une fois toutes les 2 minutes
15
16 // Définir les broches pour le capteur ultrason gauche
17 const int trigPinGauche = 11;
18 const int echoPinGauche = 10;
19 const int ledRouge = 2;
20
21
22 // Définir les broches pour le capteur de niveau de remplissage
23 const int trigPinNiveau = 12;
24 const int echoPinNiveau = 13;
25
26 // Définir la broche du relais pour la lampe
27 const int relaisPin = 5;
28
```



```
POUBELLEMAZ2024 | Arduino IDE 2.3.3
Fichier Modifier Croquis Outils Aide

POUBELLEMAZ2024.ino
169 Serial.println(distanceRemplissage);
170
171 // Déterminer le niveau de remplissage
172 int niveauRemplissage = determinerNiveau(distanceRemplissage);
173 estPoubellePleine = (niveauRemplissage == 4);
174
175 // Afficher le niveau de remplissage dans le moniteur série
176 Serial.print("Niveau de remplissage: ");
177 Serial.println(niveauRemplissage); // Affiche le niveau de remplissage
178
179 bluetoothSerial.println(distanceRemplissage);
180
181 if (niveauRemplissage == 4) {
182     myDFPlayer.play(3); // Jouer la chanson 2 (poubelle pleine)
183     servoDroit.write(140);
184     servoGauche.write(110);
185     clignoterLEDRouge();
186 }
187
188 // Si une présence est détectée (distance <= 50), mettre à jour le dernier temps de présence
189 if (distanceDroit <= 50 || distanceGauche <= 50) {
190     dernierTempsPresence = tempsActuel; // Mettre à jour le temps de la dernière détection de présence
191     chanson1Jouee = false; // Réinitialiser la condition pour rejouer la chanson 1 après une nouvelle détection
192
193     // Gérer l'ouverture des portes et jouer la chanson 1 ou 2 selon le niveau de remplissage
194     if (estPoubellePleine) {
195         clignoterLED(distanceDroit <= 50 ? ledDroite : ledGauche);
196         myDFPlayer.play(3); // Jouer la chanson 2 (poubelle pleine)
197         servoDroit.write(140);
```

Fig. 10. Extrait des codes sources de la poubelle intelligente



```
PA PoubelleApp Version control Copy_of_MAZ main.dart <no device selected>
Profil.dart PoubellePlusProche.dart ConnexionBluetooth.dart Accueil.dart Compte.dart PoubelleProche.dart ScreenSplash.dart
100 @override
101 Widget build(BuildContext context) {
102     return Scaffold(
103         appBar: AppBar(
104             title: const Text(
105                 'Poubelle plus proche',
106                 style: TextStyle(
107                     color: Colors.white,
108                     fontWeight: FontWeight.bold,
109                     fontSize: 20,
110                     letterSpacing: 2,
111                     shadows: [
112                         Shadow(offset: Offset(0, 2), blurRadius: 3),
113                     ],
114                 ), // TextStyle
115             ), // Text
116             centerTitle: true,
117             backgroundColor: Colors.red,
118         ), // AppBar
119         body: _loading
120             ? Center(child: CircularProgressIndicator(
121                 valueColor: AlwaysStoppedAnimation<Color>(Colors.red),
122             )) // CircularProgressIndicator
123             : _poubellesProches.isEmpty
```

Fig. 11. Extrait des codes sources de l'application mobile

3.3 RETOUR D'EXPÉRIENCE

3.3.1 FEEDBACK DES UTILISATEURS

Les retours des utilisateurs, comprenant les agents de collecte des déchets et les autorités locales, ont été globalement positifs. Les utilisateurs ont apprécié l'ergonomie, l'ouverture automatique, et le système de notifications pour le niveau de remplissage. Cependant, ils ont suggéré d'augmenter la taille de la poubelle, soulignant qu'une capacité plus grande serait préférable pour un usage public, afin de mieux gérer des volumes de déchets plus importants dans les espaces publics.

3.3.2 ANALYSE CRITIQUE

L'analyse critique du prototype a mis en avant les points forts et quelques pistes d'amélioration. L'autonomie énergétique fournie par les panneaux solaires et l'efficacité des notifications automatiques réduisant le risque de débordement sont parmi les réussites majeures du projet. Cependant, la suggestion d'augmenter la capacité de la poubelle est pertinente pour son utilisation en milieu urbain. Cette observation guidera la conception de prochaines versions, en veillant à adapter la taille de la poubelle pour des lieux publics et ainsi garantir une gestion des déchets plus efficace.

3.3.3 SUGGESTIONS UTILISATEURS

Les utilisateurs ont formulé plusieurs suggestions pour améliorer l'efficacité de la poubelle intelligente dans un cadre public:

- **Augmentation de la capacité:** La principale recommandation est d'augmenter la taille de la poubelle pour une capacité de stockage plus importante, adaptée aux espaces publics où les volumes de déchets sont généralement plus élevés.
- **Renforcement de la structure:** Pour faire face aux conditions climatiques locales, il est suggéré de renforcer la structure de la poubelle avec des matériaux plus résistants.
- **Optimisation des notifications:** Certains utilisateurs ont proposé d'affiner le système de notifications pour éviter les alertes multiples inutiles et les ajuster en fonction du niveau exact de remplissage.

4 DISCUSSION DES RESULTATS

L'implémentation de notre solution de gestion intelligente des déchets, basée sur l'Internet des objets (IoT), a permis de développer un prototype de poubelle connectée capable de recueillir et de transmettre des informations en temps réel sur le niveau de remplissage et la localisation de chaque unité. Ce dispositif, une fois testé, a montré une capacité significative à répondre aux besoins de gestion des déchets dans des zones urbaines à forte densité, permettant ainsi une optimisation du ramassage et une réduction des coûts opérationnels. En effet, les causes de la production des déchets sont multiples et varient en fonction de plusieurs facteurs socio-économiques, démographiques et culturels. L'activité humaine a, de tout temps, été génératrice de déchets et chaque époque a eu son mode de traitement et... ses problèmes spécifiques [11]. Aujourd'hui, le déchet est un indicateur de l'existence humaine qui dégrade l'environnement si les mesures de protection ne sont pas réunies. Plus de 6000000 de tonnes de déchets sont évacuées sauvagement, et la manière de les gérer constitue un danger affectant notre écosystème [12]. Sur ce, il faut donc une solution durable pour maintenir les villes de la RDC plus propre. Les résultats de notre étude ont démontré que l'intégration de capteurs dans le système de gestion des déchets permet de suivre en temps réel les niveaux de remplissage, contribuant ainsi à réduire le nombre de trajets de collecte inutiles. L'accès aux données via une interface mobile et le stockage de ces informations dans un serveur cloud assurent leur disponibilité pour les agents de collecte et les responsables municipaux.

Cependant, des défis subsistent, notamment en ce qui concerne la durabilité de l'équipement électronique face aux conditions environnementales et la nécessité d'une couverture réseau étendue pour garantir la transmission continue des données. Des recherches supplémentaires seraient nécessaires pour évaluer la viabilité de la solution dans différentes conditions climatiques et topographiques en République Démocratique du Congo. Au cours de notre étude sur l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) pour optimiser la gestion des déchets dans la ville de Lubumbashi, nous avons formulé plusieurs hypothèses qui ont été testées tout au long de notre recherche. Nous avons démontré que l'IoT offre des solutions concrètes aux problèmes rencontrés par les villes de la RDC en matière de gestion des déchets. Nous avons constaté que l'intégration de capteurs IoT dans les poubelles permet une collecte basée sur des données en temps réel. Grâce à l'analyse des niveaux de remplissage, les itinéraires de collecte peuvent être optimisés, réduisant ainsi les coûts opérationnels et améliorant l'efficacité. Des simulations ont montré une diminution significative des trajets inutiles, permettant ainsi aux équipes de collecte de gagner du temps et d'énergie.

La mise en place d'une infrastructure IoT a également contribué à sensibiliser les citoyens. L'interface vocale intégrée aux poubelles a facilité l'éducation des usagers sur l'importance de la propreté urbaine et du tri des déchets. Les campagnes de sensibilisation menées en parallèle ont conduit à une augmentation de la participation des citoyens aux initiatives de recyclage, avec une hausse des déchets correctement triés.

Enfin, notre analyse a montré que le modèle économique proposé est viable. Les économies réalisées grâce à la réduction des coûts de collecte et à l'amélioration des conditions sanitaires justifient l'investissement initial nécessaire à la mise en place de cette technologie. Le soutien financier du gouvernement, combiné à des partenariats public-privé, est essentiel pour assurer la pérennité de cette solution.

Les objectifs fixés au début de cette recherche ont été atteints de manière satisfaisante. Nous avons:

- **Optimisé l'efficacité de la collecte des déchets:** L'utilisation de capteurs IoT a permis d'automatiser le suivi du niveau de remplissage, réduisant ainsi les coûts et les impacts environnementaux.
- **Amélioré la santé publique:** En réduisant les risques associés à l'accumulation de déchets, notre solution contribue à un environnement plus sain.
- **Facilité l'accès aux données en temps réel:** Les autorités locales peuvent désormais prendre des décisions éclairées sur la gestion des infrastructures de déchets, grâce aux données fournies par le système IoT.
- **Proposé une solution autonome et durable:** En intégrant des sources d'énergie renouvelable, notre modèle s'adapte aux coupures d'électricité fréquentes dans la région.

5 CONCLUSION

En conclusion, l'intégration de l'Internet des Objets dans la gestion des déchets à Lubumbashi représente une avancée significative vers une ville plus intelligente et durable. Cette recherche a mis en lumière l'impact positif de l'IoT sur l'optimisation des processus de gestion des déchets, la sensibilisation des citoyens, et l'amélioration des conditions de vie en milieu urbain.

Les résultats obtenus démontrent non seulement la faisabilité technique de la solution, mais également son potentiel à transformer la gestion des déchets dans d'autres villes de la RDC et au-delà. Nous espérons que cette étude servira de modèle pour d'autres initiatives similaires et incitera les décideurs à adopter des technologies innovantes pour résoudre des problèmes critiques, tels que la gestion des déchets, qui affectent tant la santé publique que l'environnement.

Les résultats de cette étude laissent entrevoir des développements possibles pour l'avenir:

1. Renforcement des technologies de détection: Pour plus de fiabilité, des capteurs robustes et des panneaux solaires de grande capacité seront à envisager, garantissant ainsi la durabilité du système dans divers environnements.
2. Déploiement dans d'autres villes de la RDC: Après les résultats encourageants à Lubumbashi, un élargissement de ce modèle de gestion pourrait être envisagé dans d'autres villes comme Kinshasa, Kisangani, Kikwit et voire toute la RDC.
3. Ajouter le Tri de déchets automatique: L'intégration d'un système de tri automatique des déchets au sein des poubelles intelligentes pourrait également améliorer l'efficacité de la gestion des déchets. Grâce à des capteurs capables de différencier les types de matériaux (plastique, verre, papier, etc.), ce système permettrait un tri à la source, réduisant ainsi la contamination des recyclables et augmentant le taux de recyclage.
4. Intégration d'une dimension prédictive avec l'IA: Intégrer l'intelligence artificielle pour anticiper les niveaux de remplissage et identifier les besoins de maintenance contribuerait à une meilleure réactivité et une optimisation continue des ressources. L'IA pourrait également analyser les données collectées pour prévoir les tendances de production de déchets en fonction des événements locaux, des saisons, et d'autres facteurs socio-économiques, permettant ainsi d'adapter les stratégies de collecte en conséquence. En outre, grâce à l'analyse des données historiques et des modèles de production de déchets, il serait possible de prédire les coins les plus sales de chaque ville de la RDC et d'identifier la ville la plus sale selon les taux de production de déchets mensuels ou journaliers. Cela aiderait non seulement à cibler les interventions de nettoyage de manière proactive, mais aussi à optimiser le déploiement des ressources en fonction des besoins spécifiques de chaque zone, améliorant ainsi l'efficacité de la gestion des déchets dans l'ensemble du pays.
5. Renforcement de l'éducation et sensibilisation des citoyens: En parallèle des développements technologiques, il est crucial de renforcer les programmes de sensibilisation auprès des citoyens. Des campagnes d'éducation sur l'importance du tri des déchets et de la gestion responsable des ressources doivent être mises en place pour accompagner l'introduction de nouvelles technologies. L'utilisation d'applications mobiles et de plateformes interactives peut aider à engager la communauté et à promouvoir une culture de durabilité.

REFERENCES

- [1] P. Magali, *Les déchets ménagers entre privé et public : approches sociologiques.*, Harmattan. Paris, 2002.
- [2] L. E. Nkenku, « La gestion et la gouvernance des déchets dans la ville-province de Kinshasa. », Mémoire de fin de cycle, Université de Kinshasa., 2006.
- [3] T. NTENDAYI, « ASSAINISSEMENT : LES DECHETS TUENT EN RDC », Ministère de l'Environnement et Développement Durable (MEDD). Consulté le: 29 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://medd.gouv.cd/assainissement-les-dechets-tuent-en-rdc/>.
- [4] V. Simbu *et al.*, « ETUDE DE LA GESTION ACTUELLE DES DECHETS URBAINS A KINSHASA PAR OBSERVATION LE LONG DE L'AVENUE UNIVERSIT », vol. 4, 2022, [En ligne]. Disponible sur: <https://hal.science/hal-03565511v4>.
- [5] G. Ajabu Mastaki et N. Anaclet, « LA RECONNAISSANCE ET LA GARANTIE CONSTITUTIONNELLE DU DROIT A L'ENVIRONNEMENT EN RÉPUBLIQUE DÉMOCRATIQUE DU CONGO », *Beijing Law Rev.*, vol. 14, n° 4, Art. n° 4, déc. 2023.
- [6] A. V. Simbu *et al.*, « ETUDE DE LA GESTION ACTUELLE DES DECHETS URBAINS A KINSHASA PAR OBSERVATION LE LONG DE L'AVENUE UNIVERSITE », *Environ. Ingénierie Dév.*, vol. 88, 2022, Consulté le: 29 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://eid.episciences.org/10310/pdf>.
- [7] Mediacongo, « Lubumbashi : la gestion des plastiques, un vrai problème », 6 juin 2023. Consulté le: 21 septembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.mediacongo.net/article-actualite-122865_lubumbashi_la_gestion_des_plastiques_un_vrai_probleme.
- [8] K. Pardini, J. J. P. C. Rodrigues, S. A. Kozlov, N. Kumar, et V. Furtado, « IoT-based solid waste management solutions: a survey », *J. Sens. Actuator Netw.*, vol. 8, n° 1, Art. n° 1, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/jsan8010005>.
- [9] J.-P. Lamy, « SysML, un langage modèle », *J. Technol.*, vol. 179, p. 32-48, 2012.
- [10] G. Finance, « Modélisation SysML ». UMLchannel, 2010. Consulté le: 24 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://umlchannel.com/docs/Article%20Mod%C3%A9lisation%20SysML.pdf>
- [11] J.-M. Balet, *Gestion des déchets*. Dunod, 2016.
- [12] D. M. Libwa, J. C. T. Shamba, G. K. Milembu, J. I. Mfutu, J. C. P. Usandili, et N. Katolo, « Problématique de collecte et de gestion des déchets dans la ville de Kananga: Impact sur la sécurité environnementale/KASAI CENTRAL-RDC », *Int. J. Innov. Appl. Stud.*, vol. 21, n° 1, p. 37, 2017.