

REPUBLIQUE DU SENEGAL
UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR



UFR SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT INFORMATIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Pour l'obtention du diplôme de master

Mention : Informatique

Spécialité : Réseaux et Systèmes

Sujet

Conception et implémentation d'un système de gestion intelligente des déchets urbains basé sur l'IoT

Présenté et soutenu publiquement par : **M. Amadou THIAM**

Le samedi 29 Avril 2023

Sous la direction de :

Pr Ousmane DIALLO	Professeur Assimilé	Encadreur
Dr El Hadji Malick NDOYE	Maître de Conférences Titulaire	Co- Encadreur

Devant le jury composé de :

Pr Ibrahima DIOP	Professeur Assimilé	Président
Dr Mouhamadou GAYE	Maître de Conférences Titulaire	Examineur
Dr Papa Alioune CISSE	Maître de Conférences Titulaire	Rapporteur
Pr Ousmane DIALLO	Professeur Assimilé	Encadreur
Dr El Hadji Malick NDOYE	Maître de Conférences Titulaire	Co-Encadreur

Année universitaire 2021-2022

Résumé

La modernisation a favorisé l'empreinte des activités humaines, ce qui a entraîné une pollution alarmante de l'environnement. Au Sénégal, malgré l'initiative du projet "Zéro déchet" de Son Excellence Monsieur le président de la République, piloté par l'UCG (Unité de Coordination de la Gestion des déchets solides), il est malheureux de constater que les poubelles continuent de déborder dans les villes et que les comportements écocitoyens ne sont toujours pas pris au sérieux. Ce travail souhaite contribuer de manière significative à l'amélioration du système de gestion des déchets au Sénégal. Pour cela, nous avons choisi d'utiliser les techniques de l'Internet des Objets (IoT).

Alors ce mémoire propose un système de gestion intelligente des déchets basé sur la technologie de l'internet des objets (Internet of Things, en anglais) pour le Sénégal intitulé *Sénégal SET*. Le système proposé se base sur un réseau de communication hybride afin de pallier les limites des systèmes de gestion des déchets actuels au Sénégal. L'architecture proposée se compose de deux types de nœuds d'extrémité : *poubelle d'espace public* (PEPs) et les *poubelles de Maison* (PMs) sont utilisées pour suivre le statut des poubelles dans les zones publiques et résidentielles. Les PEPs sont connectées au réseau Lora et les PMs sont connectées au réseau wifi. Elles intègrent des capteurs qui permettent de mesurer leurs niveaux de remplissage, leurs températures et leurs humidités, puis les transmettent avec leurs coordonnées géographiques via Internet à la plateforme IoT. Cette dernière permet de visualiser les données, de les stocker et de les transmettre aux applications. L'application web permet aux autorités de collecter de visualiser et d'évaluer le niveau de remplissage de chaque poubelle. L'application mobile permet à l'habitant de la ville de visualiser l'état de sa *PM* et les *PEP* les plus proches de chez lui.

Cet article détaille les différentes étapes de la mise en place de ce système, ainsi que les résultats obtenus en termes d'efficacité et de rentabilité.

Mot clé : Internet des objets, ville intelligente, gestion des déchets, poubelles, réseau Lora, réseau wifi, Réseau hybride, Sénégal SET.

Abstract

Modernization has favored the imprint of human activities, which has led to an alarming pollution of the environment. In Senegal, despite the initiative of the "Zero waste" project of His Excellency the President of the Republic, led by the UCG (Unit for the Coordination of Solid Waste Management), it is unfortunate to note that garbage cans continue to overflow into cities and that eco-citizen behavior is still not taken seriously. This work aims to contribute significantly to the improvement of the waste management system in Senegal. For this, we have chosen to use the techniques of the Internet of Things (IoT).

So this thesis proposes an intelligent waste management system based on the technology of the Internet of Things (Internet of Things, in English) for Senegal entitled Senegal SE. The proposed system is based on a hybrid communication network to overcome the limitations of current waste management systems in Senegal. The proposed architecture consists of two types of end nodes: Public Space Bins (PEPs) and House Bins (PMs) are used to track the status of trash cans in public and residential areas. The PEPs are connected to the Lora network and the PMs are connected to the wifi network. They integrate sensors that measure their filling levels, their temperatures and their humidity, then transmit them with their geographical coordinates via the Internet to the IoT platform. The latter allows data to be viewed, stored and transmitted to applications. The web application allows collection authorities to visualize and assess how full each bin is. The mobile application allows the resident of the city to view the status of his PM and the PEPs closest to his home.

Key word: Internet of things; smart city; waste management, garbage cans, lora network; wifi network, Hybrid networks Senegal SET

Dédicace

C'est Avec grand plaisir, cœur ouvert et joie inestimable que je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents pour tout l'amour dont vous m'avez entouré, pour tout ce que vous avez fait pour moi. Que ce travail, soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et de vos prières quotidiennes. Que Dieu, le tout puissant, vous préserve et vous procure santé et longue vie afin que je puisse à mon tour vous combler.

À mon gentil homonyme, mon tuteur, mon idole pour l'amour, la considération, la confiance, et tous les efforts qu'il a déployés en secret, déguisé et à tout moment de ma vie, pour que je puisse devenir ce que je suis aujourd'hui, merci du fond du cœur

A ma très chère, ma grand-mère Khadissatou Sylla que le bon Dieu vous accorde une longue vie

A mon cher frère Omar Tamsir et mon oncle Norou Mbow, vous occupez une place particulière dans mon cœur. Je vous dédie ce travail en vous souhaitant un avenir radieux, plein de bonheur et de succès.

A tous mes frères et Sœurs, mes oncles et tantes ma famille et à tous mes proches, je leurs dédie cet effort et ce modeste travail.

A Tous mes aimables amis et camarades qui me donne toujours de bons conseils.

A la mémoire de nos morts, que Dieu les accueille dans son vaste paradis.

Remerciement

Nous commençons tout d'abord par rendre grâce à Dieu, le tout puissant, le créateur des cieux et de la terre. Que la gloire et l'honneur te soient rendus. Que la paix et le salut soient sur le prophète Mouhamad, sur sa famille et ces compagnons.

Nos remerciements les plus chaleureux à Celui, qui par son amour, son encouragement, m'a permis de poursuivre ma route sur le bon chemin « A MON Cher Père » et A Celle qui m'a donnée la vie et qui n'a cessée jusqu'à ce jour de me combler avec sa tendresse « À MA Chère MAMAN ».

Nous remercions particulièrement mes encadrants, Pr Ousmane DIALLO et Dr El hadji Malick NDOYE, pour l'encadrement de qualité dont nous avons bénéficié.

Nous remercions sincèrement, les membres du jury d'avoir bien voulu accepter d'examiner notre travail.

Nous remercions également tous nos enseignants qui ont contribué à notre formation et à notre éducation tout au long de nos années universitaires.

Nous remercions tous ceux qui ont participé directement ou indirectement, de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Nous aimerions également remercier nos collègues qui nous ont encouragé à travailler pendant nos années d'études.

Je termine par dire un grand merci à mes amis ainsi que mes camarades de classe pour les bons moments constructifs que j'ai eu à partager avec eux.

Table des matières

Résumé	I
Abstract	II
Dédicace.....	III
Remerciement	IV
Table des figures.....	VII
Liste des Abréviations	XII
Introduction Générale.....	1
PREMIERE PARTIE	4
ÉTAT DE L'ART ET PRÉSENTATION DE NOTRE CONTRIBUTION.....	4
Chapitre 1 : La gestion des déchets, au Sénégal.	5
Introduction.....	5
I. La gestion des déchets proprement dit	5
I.1. Notions des déchets et leurs causes.....	5
I.1.1. Définitions.....	5
I.1.2. Causes des déchets	6
I.2. Impacts des déchets.....	7
I.3. Système de gestion des déchets	8
II. La gestion des déchets au Sénégal	9
II.1. Historique et présentation des différents services de gestion des déchets au Sénégal	10
II.2. Problèmes de la gestion des déchets au Sénégal	13
II.3. Problématique et intérêt de la gestion intelligente des déchets au Sénégal	14
Conclusion	15
Chapitre 2 : le concept d'internet des objets dans les villes intelligentes	16
Introduction.....	16
I. Internet des objets	16
I.1. Définition de l'internet des objets.....	16
I.2. L'architecture en couche de l'internet des objets	17
I.3. Les technologies de communication de communication dans IoT :	19
I.3.1. Les technologies de communication à courte portée.....	19
I.3.2. Les technologies de communication longue portée	21
I.4. La plateforme IoT	24
II. Domaines d'applications de l'IoT pour les villes intelligentes.....	24
III. Notre domaine d'application de l'internet des objets	25
Chapitre 3 : les travaux connexes et présentation de notre contribution.....	27
Introduction.....	27

I. Les travaux proposés dans la littérature pour la gestion des déchets	27
II. Présentation de notre solution	37
II.1. Architecture et Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET	39
II.1.2. Description de l'architecture	40
A. Poubelle connectée	40
B. Le réseau de communication du système	41
C. La passerelle	41
D. Le cloud	41
E. L'application Web	41
F. L'application mobile	41
II.2. Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET	41
III. Optimisation d'itinéraires de collectes	43
Conclusion	44
DEUXIEME PARTIE	45
CONCEPTION ET REALISATION DE SENEGAL SET	45
Chapitre 1 : Conception de Sénégal SET	46
I. La méthodologie utilisée	46
II. Analyse et spécification des besoins fonctionnels de Sénégal SET	46
II.1. Identification des acteurs	47
II.2. Diagramme de cas d'utilisation	47
II.2. Cas d'utilisation détaillé	48
II.2.1. Diagramme de cas d'utilisation d'Acquisition des données	48
II.2.2. Diagramme de cas d'utilisation de Consultation des données	51
II.2.3. Diagramme de cas d'utilisation d'administration le système	53
II.3. Diagramme de séquence de quelques cas d'utilisations de notre système	54
II.3.1. Diagramme de séquence du cas d'utilisation acquisition de données	55
II.3.2. Diagramme de séquence du cas d'utilisation consultation de données	55
III. Conception générale du système	56
III.1. Diagramme de classe	56
III.2. Réseau de communication de Sénégal SET	56
III.2.1. L'architecture de notre réseau de communication	57
III.2.2. Réseau Lora [13]	57
III.2.3. Réseau Wifi	58
III.2.4. La passerelle LoRaWAN	59
III.3. Conception d'un prototype matériel d'une poubelle intelligente	59
III.3.1. La conception de PEP	59
III.3.2. La conception de PM	60

III.4. Algorithme de routage utilisé.....	60
IV.Choix des technologies	62
IV.1. Les objets connectés.....	62
IV.2. Les outils de développements.....	67
IV.3. La gestion d'alimentation de Sénégal SET	69
Conclusion	70
Chapitre 2 : Implémentation de Sénégal SET	71
Introduction.....	71
I.Implémentation du prototype poubelle	71
I.1. Le montage du matériel.....	71
I.1.1. Système d'envoi/réception du niveau de déchet.....	71
I.1.2. Mesure de la température et de l'humidité	73
I.1.2. Système de Ouverture /fermeture	73
I.1.3. Système de géolocalisation des poubelles.....	75
II.Implémentation des applications Web/Mobile.....	76
II.1. Application web	76
II.2. Application mobile	80
Conclusion	82
Chapitre 3 : Présentation de prototype réel de Sénégal SET	83
Introduction.....	83
I. Présentation de la poubelle intelligente.....	83
II. Présentation du serveur cloud (ThingSpeak).....	84
III. Présentation de l'application Web.....	85
IV. Présentation de l'application mobile	88
Conclusion	89
Bibliographie et webographie	92

Table des figures

Figure 1: Point de regroupement normalisé des déchets par l'UCG	12
Figure 2: quelques problèmes de gestion des déchets au Sénégal	13
Figure 3: Architecture en couche de l'IoT	17
Figure 4: Technologie de communication à courte portée	19
Figure 5: technologies de communication longue portée.....	20
Figure 6: Domain d'application de l'IoT.....	24
Figure 7: internet des objets dans le domaine de la gestion des déchets.....	24
Figure 8: Architecture de la gestion intelligente des déchets basée sur le cloud pour les villes intelligentes	27
Figure 9: Architecture réseau du système IoT-SWM.....	28
Figure 10: la gestion des déchets basée sur IoT avec des citoyens inclus dans le processus...	29
Figure 11: système de collecte et de gestion dynamique des déchets solides basé sur des capteurs, ascenseur et GMS	30
Figure 12: architecture d'un système de surveillance, de collecte, de tri et de recyclage des déchets.....	30
Figure 13: Architecture du Système et design de la poubelle pour la ségrégation automatique	31
Figure 14: Architecture de la gestion des déchets utilisant WSN et IoT	32
Figure 15: architecture de gestion des déchets solides utilisant les technologies des capteurs sans fil	32
Figure 16: Architecture su système de surveillance des ordures basé sur IoT.....	33
Figure 17: la gestion de la collecte des déchets basé sur IoT pour les villes intelligentes.....	34
Figure 18: mécanisme de poubelle intelligente (SBM) pour les villes intelligentes.....	34
Figure 19: Architecture d'un collecteur de déchets intelligent basé sur l'IoT	35
Figure 20: Architecture du système de gestion des déchets.....	36
Figure 21: Architecture matérielle de Sénégal SET.....	38
Figure 22: Architecture logicielle.....	39
Figure 23: Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET.....	41
Figure 24: Schéma d'optimisation de l'itinéraire de collecte.....	42
Figure 25: Cas d'utilisation générale du système.....	47
Figure 26: Diagramme de cas d'utilisation d'Acquisition des données.....	48
Figure 27: Diagramme de cas d'utilisation de Consultation des données.....	49

Figure 28: Diagramme de cas d'utilisation d'administration le système	52
Figure 29: Diagramme de séquence du cas d'utilisation acquisition de données	54
Figure 30: Diagramme de séquence du cas d'utilisation consultation de données	54
Figure 31: Diagramme de classe du système	55
Figure 32: architecture de notre réseau de communication.....	56
Figure 33: exemple d'une zone à 8 poubelles	60
Figure 34: exemple d'une zone appliqué à l'algorithme du pcc.....	61
Figure 35: carte Arduino Uno	62
Figure 36: Module ESP8266	62
Figure 37: Capteur ultrason HC-SR04	63
Figure 38: principe de fonctionnement du capteur à ultrasons HC-SR04.....	63
Figure 39: module GPS NEO 6M	64
Figure 40: le module LoRa RYLR998 de ReYax	64
Figure 41: capteur de température et d'humidité.....	65
Figure 42: servomoteur 9g	65
Figure 43: Vu de l'intérieur d'un servomoteur.....	66
Figure 44: système d'alimentation photovoltaïque.....	69
Figure 45: Connexion du capteur ultrason avec la carte Esp8266	71
Figure 46: mesure du niveau de remplissage	71
Figure 47: Résultat de détection du niveau de remplissage	71
Figure 48: montage du dht11 avec l'ESP8266	72
Figure 49: Montage du HCSR04 sur la carte ESP8266	72
Figure 50: Connexion du servomoteur avec la carte ESP8266.....	73
Figure 51: code pour le contrôle du servomoteur	74
Figure 52: Connexion du module GPS sur le module Esp8266.....	75
Figure 53: Vu intérieur et extérieur du couvercle	75
Figure 54: Création de la table poubelle	76
Figure 55: importation de base de données à notre application	76
Figure 56: Code d'affichage des marqueurs sur une carte.....	77
Figure 57: Code de Sélection des poubelles susceptibles d'être collecter	77
Figure 58: code d'optimisation d'itinéraire de collecte.....	78
Figure 59: l'interface d'accueil de notre application mobile.....	79
Figure 60: l'interface de visualisation des poubelles proches	79

Figure 61: partie de Blocs de notre application mobile	80
Figure 62: Affichage de la carte sur notre application	81
Figure 63: vues de face et de profil du prototype réalisé	82
Figure 64: Ouverture automatique de la poubelle	83
Figure 65: les informations de la poubelle sur la plateforme IOT	83
Figure 66: Page de connexion de notre application web.....	84
Figure 67: Liste des poubelles de la ville et leurs statuts	85
Figure 68: Page de visualisation des poubelles pleines.....	85
Figure 69: Notre application Mobile	86

Liste des tableaux

Tableau 1 : résumé des technologies réseaux utilisées dans IoT :	23
Tableau 2: Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Acquisition des données	49
Tableau 3: Fiche descriptive du cas d'utilisation de Consultation des données	51
Tableau 4: Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Administration du système	53
Tableau 5: Connexion du Capteur DHT11 avec l'Esp8266	72
Tableau 6: Connexion des ports du Capteur à ultrasons 02 HC-SR04 avec l'Esp8266	73
Tableau 7 Connexion des ports du Servomoteur avec l'Esp8266	73
Tableau 8: Connexion du module GPS sur le module Esp8266	74

Liste des Abréviations

Abréviations	Signification
3G	Troisième génération
4G	Quatrième génération
5G	Cinquième génération
AMA	Agence Municipale d'Assainissement
AECID	Agence Espagnol pour la Coopération Internationale au Développement
APROSEN	Agence pour la propreté du Sénégal
AGETIP	Agence d'Exécution des Travaux d'Intérêt Public
Cadak-Car :	Communauté des Agglomérations de Dakar et la Communauté des Communauté des Agglomérations de Rufisque
BLMU	Bin Level Monitoring Unit
CPS	Systèmes cyber-physiques
CAMCUD	Coordination des Associations et de Mouvements de jeunes de la Communauté Urbaine de Dakar
eMBB	enhanced Mobile Broadband
GCA	Garbage Collector Agent
GPRS	General Packet Radio Service.
GPS	Global Positioning System
GMS	Global System for Mobile
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IDE	Integrated Development Environment
IOE	Internet of Everything
IoT	Internet of thing
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Low Range Wide Area Network
LPWAN	Low Power Wide Area Network
mMTC	Massive Machine Type Communications
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
Nb-IoT	Internet des objets à bande étroite
NIST	Institut national des normes et de la technologie
NFC	Near Field Communication
OSM	OpenStreetMap
OSRM	Open-Source Routing Machine
PEP	Poubelle d'espace public
PM	Poubelle de Maison
PCC	Plus court chemin
PROMOGED	Projet de Promotion de la Gestion intégrée et de l'Économie des Déchets

PNGD	Programme National de Gestion de Déchets
PNR	Point de Regroupement Normalisé
PHP	PHP Hypertext Pre-processor
RFID	Radio Fréquence Identification
SIG	Systèmes d'informations géographique
SOADIP	Société Africaine de Développement Industriel et de
SIAS	Société Industrielle d'Aménagement Urbain du Sénégal
TIC	Technologie de l'information et de communication
UIT	Union Internationale des Télécommunications
UML	Unified Modeling Language
URL	Uniform Resource Locator
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
WAPU	wireless acces point unit
Wifi	Wireless Fidelity
WNS	wireless sensor network
XAMP	Xampp Apache MySQL Perl et PHP

Introduction Générale

Le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs [1]. Cependant, un pays insalubre qui n'accorde aucune attention à son environnement et expose sa population aux maladies et aux morts prématurées, compromet son existence et celle de ses générations futures. Il faudra donc poser des actes qui ont un impact positif sur le bien-être des populations d'aujourd'hui et de demain. Mais triste est de constater que dans les pays en voie de développement en général, et le Sénégal en particulier, l'insalubrité qui règne dans les espaces publics a atteint son paroxysme ; sachets par ici, tas d'ordures par-là, déchets un peu partout. En effet, l'inefficacité du service de collecte et de transport des déchets fait que les déchets produits et ramassés dans les ménages restent en grande partie dans les quartiers [3].

Cependant, préoccupé par la réduction de l'impact néfaste de ce problème de salubrité urbaine sur l'environnement et le bien-être des populations, Le gouvernement Sénégalais s'est engagé dans une démarche innovante à travers le projet de promotion de la gestion intégrée et de l'économie des déchets solides au Sénégal (PROMOGED) qui s'inscrit dans la phase 2 du Programme national de gestion de déchets (PNGD) avec l'appui de la Banque mondiale et de l'agence espagnol pour la coopération internationale au développement (AECID). Il vise à améliorer le fonctionnement du système de gestion des déchets solides dans les collectivités locales à travers la mise en place d'équipements de pré-collecte, de collecte, la réalisation d'infrastructures de traitement des déchets solides dans les localités ciblées et le renforcement des capacités des acteurs pour une gestion durable du système de gestion retenu [2].

Le but poursuivi est l'amélioration des conditions de santé publique, du bien-être de la population et la réduction de l'impact néfaste de la prolifération des déchets sur l'environnement. La mise en œuvre de ce projet a été confiée à l'unité de coordination de la gestion des déchets solide (UCG). Cette société a été créée en 2011 par la fusion, entre l'Agence pour la Propreté du Sénégal (APROSEN) et l'Entente Cadak-Car [3]. Parmi ses activités, l'UCG se charge de la gestion du balayage et de la collecte et du transport des déchets ainsi que de la mobilisation sociale. Elle est également chargée de conduire l'élaboration de la stratégie nationale de gestion des déchets et de renforcer les capacités des communes, par la mise en œuvre de projets et programmes.

Malheureusement, cet arsenal technique assez impressionnant mis en place par le gouvernement souffre d'une certaine insuffisance. En effet, la pré-collecte des déchets continue d'être faite de façon abstraite et périodique. Les agents de collecte se rendent dans les quartiers de la ville selon un programme statique pour vérifier manuellement chaque poubelle et assurer le vidage. Ce qui pose soit le problème de débordement des poubelles, soit celui d'une tournée de vidage non optimale. De plus, l'état de remplissage des poubelles n'est connu à l'avance que de manière approximative. Aussi, en évitant parfois l'ouverture des poubelles à la main, soit pour des raisons d'hygiène ou de précaution contre certaines maladies comme le Covid-19, les citoyens n'éprouvent aucune gêne à jeter les déchets dans les rues. Pour résoudre durablement le problème d'insalubrité des villes, il faudra donc non seulement rendre les poubelles intelligentes pour qu'elles soient capables de s'ouvrir de façon autonome afin de résoudre le problème de réticence d'ouverture des poubelles à la main, mais aussi pour qu'elles soient visualisées par les gérants afin de prévenir leurs débordements.

Par ailleurs, pour avoir une solution complète à ce problème, il est important voire indispensable de concevoir un système de gestion intelligente des déchets basée sur l'internet des objets (IoT).

Dans le monde d'aujourd'hui, l'IoT est un facteur indispensable dans notre vie, que ce soit dans les soins de santé, la domotique, l'automatisation industrielle, la ville intelligente ou, dans ce cas, un système de gestion intelligente des déchets, ce concept aurait été inimaginable il y a quelques années, mais il est désormais possible grâce aux avancées technologiques. L'idée d'utiliser l'IoT dans les poubelles n'est pas nouvelle, mais elle a été motivée par des travaux de recherche antérieurs. Les détails sont présentés dans le chapitre 3 de la partie une.

Nous souhaitons utiliser les avancées technologiques dans le domaine de l'internet des objets pour mettre en place une solution intelligente qui utilise différents systèmes de détection pour suivre à distance l'état de la poubelle, déclencher une alerte lorsqu'elle est pleine, proposer un itinéraire approprié pour le véhicule de collecte des déchets et calculer un pourcentage précis des déchets à l'intérieur des poubelles afin de résoudre efficacement et de manière optimale ce problème de taille qui mine notre pays.

Dans la dynamique d'une bonne compréhension de notre travail, ce document est structuré en deux (2) grandes parties.

La première partie est dédiée à l'état de l'art et à la présentation de notre contribution. Elle s'articule sur 3 chapitres. Le premier chapitre présente la gestion Sénégalaise des déchets dans un cadre général puis le second parle des concepts d'Internet des Objets et son importance dans la gestion des déchets. Le dernier chapitre s'accroche sur l'étude de l'existant et sur la présentation de notre solution proposée, nommée *Sénégal SET*.

La deuxième partie traite la conception et réalisation de Sénégal SET et comporte 3 chapitres. Dans cette partie nous allons d'abord parler dans le premier chapitre des méthodes d'analyse et de conception, puis dans le second chapitre l'implémentation de Sénégal SET est présentée et enfin le troisième et dernier chapitre la présentation du prototype réel de Sénégal SET.

PREMIERE PARTIE

ÉTAT DE L'ART ET PRÉSENTATION DE NOTRE CONTRIBUTION

Chapitre 1 : La gestion des déchets, au Sénégal.

Introduction

La gestion des déchets est un processus qui intègre à la fois la production des déchets et leur traitement. La production des déchets dépend des choix des produits à la source, de leur utilisation et de leur valorisation, tandis que le traitement comprend le tri, la collecte, le transport et le stockage des déchets. Une bonne gestion des déchets est essentielle pour le développement durable, car ce problème constitue aujourd'hui l'une des préoccupations majeures de la population et des autorités publiques en raison des risques encourus pour le développement humain et la préservation des écosystèmes.

Dans ce chapitre, nous allons décrire le système de gestion des déchets au Sénégal, en commençant par son histoire, en abordant ses problèmes actuels et en présentant les hypothèses de recherche que nous allons avancer.

I. La gestion des déchets proprement dit

I.1. Notions des déchets et leurs causes

I.1.1. Définitions

La notion de déchet n'est pas toujours claire, ni exactement bien définie. Cette notion peut revêtir des significations différentes selon les pays, et selon les individus. Ces difficultés à définir le déchet sont d'ordre culturel, juridique et économique.

Selon le Code de l'Environnement de la France (art. L541-1), relative à l'élimination des déchets et à la récupération des matériaux considère comme déchet « *tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit ou plus généralement tout bien, meuble abandonné ou que son détenteur destine à l'abandon* ». Autrement dit, tout élément qui est abandonné est un déchet. Ce n'est pas pour autant que cet élément est inutilisable, en l'état ou après modification. Seuls ceux qui sont qualifiés de déchets ultimes sont réellement inutilisables et doivent être stockés pour éviter des pollutions de l'environnement [16].

Selon la loi sénégalaise du 15 Janvier 2001 portant code de l'environnement qui appuie peut-être la loi française définit un déchet comme étant : « *Toute substance solide, liquide, gazeuse, ou résidu d'un processus de production, de transformation, ou d'utilisation de toutes autres*

substances éliminées, destinées à être éliminées ou devant être éliminées en vertu des lois et règlements en vigueur » [17].

Un déchet est défini donc comme un objet en fin de vie ou une substance ayant subi une altération physique ou chimique, qui ne présente alors plus d'utilité ou est destiné à l'élimination.

Certains mots comme « résidus » ou « ordures » sont utilisés dans le langage courant, au lieu et place du mot « déchets » et prêtent souvent à confusion.

Même si leurs sens sont proches, ils ont en réalité, des définitions différentes. Selon P. Merlin et F. Choay [18] :

- ✓ Les ordures sont des déchets qui ont un aspect dégoûtant (car en état de décomposition).
- ✓ Les résidus sont les restes d'une matière issue de la fabrication ou de la transformation de quelque chose.
- ✓ Les déchets sont, quant à eux, les restes de matériaux susceptibles d'être récupérés ou non, et qui sont rejetés ou abandonnés à la suite du processus de production ou de consommation.

I.1.2. Causes des déchets

En termes généraux, les activités humaines génèrent des déchets. Le contexte actuel marqué par l'urbanisation et l'industrialisation a largement favorisé cet état de fait. Les déchets d'autrefois étaient souvent jetés dans la nature sans que la société ne prenne véritablement conscience des risques de pollution qu'ils engendraient. Ils étaient rarement collectés ou traités. Dans le passé, les déchets alimentaires étaient donnés aux animaux (cochons, volailles, etc.) et le reste des déchets était mis de côté pour être brûlé. Étant donné le mode de vie relativement modeste de certains foyers, on prenait soin de ses biens matériels, comme les objets, car les remplacer coûtait cher. C'est pourquoi on les entretenait. Aujourd'hui, il n'y a plus d'autoconsommation. Les produits commercialisés sont emballés. Les emballages, conçus pour protéger les produits, servent également de support pour leur promotion. Et une fois payés par les consommateurs, ils deviennent des déchets. Nous sommes entrés dans l'ère de la "civilisation du déchet" dont ils font partie intégrante. Des déchets sont également importés en raison de l'emballage des produits provenant de l'extérieur.

I.2. Impacts des déchets

Les déchets sont des substances qui sont nocives pour l'environnement et pour la santé humaine. [19]

- **Impact sur l'environnement :**

La mauvaise gestion des déchets contribue au changement climatique et à la pollution atmosphérique, elle affecte directement de nombreux écosystèmes et de nombreuses espèces. Les décharges, considérées comme la dernière option dans la hiérarchie des déchets, libèrent également du méthane, un puissant gaz à effet de serre associé au changement climatique. Le méthane est produit par les micro-organismes qui prospèrent sur les déchets biodégradables comme la nourriture, le papier ou les déchets verts présents dans ces décharges. En fonction de leur conception, les décharges peuvent également contaminer le sol et l'eau.

Les déchets, une fois ramassés, sont transportés puis transformés. Le processus de transport libère dans l'atmosphère du dioxyde de carbone le gaz à effet de serre le plus répandu et de nombreux polluants comme des particules de matières.

Une partie de ces déchets peut être incinérée ou recyclée. L'énergie de ces déchets peut être utilisée pour générer de la chaleur ou de l'électricité, elle peut ainsi remplacer l'énergie obtenue à partir du charbon ou du pétrole. La valorisation des déchets peut nous aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Le recyclage des déchets est encore plus efficace pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre et autres polluants. Lorsque des matériaux recyclés remplacent des matériaux neufs, nous avons besoin d'extraire ou de produire une quantité moins importante de matière première.

- **Les déchets affectent les écosystèmes et notre santé :**

Certains écosystèmes, tels que les écosystèmes marins ou côtiers, sont gravement affectés par une mauvaise gestion des déchets ou des décharges sauvages. Les décharges en mer posent des problèmes croissants, pas seulement pour des raisons esthétiques : l'enchevêtrement dans les filets et l'ingestion de déchets marins représentent désormais de graves menaces pour de nombreuses espèces marines.

Les déchets peuvent également avoir une influence indirecte sur l'environnement. Tout déchet qui n'est pas valorisé ou recyclé représente un gaspillage de matières premières et d'intrants

utilisés dans le système, que ce soit au niveau de la production, du transport ou de la consommation du produit. L'impact environnemental de l'ensemble de la chaîne est ainsi beaucoup plus important que la somme de chaque étape de la gestion des déchets.

Directement ou indirectement, les déchets affectent de nombreuses manières notre santé et notre bien-être : le méthane participe au changement climatique, des polluants atmosphériques sont libérés dans l'atmosphère, les sources d'eau douce sont contaminées, les cultures sont plantées dans des sols contaminés et les poissons ingèrent des composés toxiques qui finiront dans notre assiette.

Certaines activités illégales, telles que les décharges non autorisées, l'incinération ou même l'exportation de déchets, jouent également un rôle à cet égard, bien que leur étendue et leur impact soient difficiles à estimer.

- **Perte économique et coûts de gestion :**

Les déchets représentent une perte économique et une charge pour la société. Le travail nécessaire et les autres ressources (terres, énergie, etc.) utilisées pour l'extraction, la production, la distribution et la consommation d'un produit sont perdus lorsque le matériel restant est écarté.

De plus, la gestion des déchets coûte beaucoup d'argent. La création d'une infrastructure de collecte, de tri et de recyclage coûte cher mais, une fois installée, elle peut générer des revenus et créer des emplois.

La dimension globale des déchets n'est pas non plus à négliger car elle est liée à nos exportations et importations. Ce que nous consommons et produisons peut générer des déchets ailleurs sur la planète. Dans certains cas, ces déchets deviennent en réalité une marchandise qui traverse les frontières, que ce soit de manière légale ou illégale.

I.3. Système de gestion des déchets

La gestion des déchets est l'ensemble des opérations et moyens mis en œuvre pour limiter, valoriser ou éliminer les déchets et plus largement, toute activité participante de l'organisation de la prise en charge des déchets depuis leur production jusqu'à leur traitement final, y compris le compostage et la supervision de l'ensemble de ces opérations [20]. Les différentes opérations de gestion sont :

La prévention [21]: Toutes mesures prises avant qu'une substance, une matière ou un produit ne devienne un déchet, lorsque ces mesures concourent à la réduction d'au moins un des items suivants :

- La quantité de déchets générés, y compris par l'intermédiaire du réemploi ou de la prolongation de la durée d'usage des substances, matières ou produits ;
- Les effets nocifs des déchets produits sur l'environnement et la santé humaine ;
- La teneur en substances nocives pour l'environnement et la santé humaine dans les substances, matières ou produits.

Le réemploi [22] : Toute opération par laquelle des substances, matières ou produits qui ne sont pas des déchets sont utilisés de nouveau pour un usage identique à celui pour lequel ils avaient été conçus.

La collecte [23] : La collecte désigne l'ensemble des opérations qui consistent à regrouper les déchets, depuis leurs sources de production puis à les transporter jusqu'aux centres de traitement.

Le transit et le transport des déchets [24] : La station de transit ou centre de transfert reçoit les flux de déchets ménagers et permet leur stockage dans une fosse, des conteneurs ou sur une aire. Les déchets, éventuellement compactés sont ensuite acheminés, par un mode de transport vers une installation de traitement ou de stockage.

Le tri [25] : Opération de séparation des différents flux de déchets par les producteurs. Le tri sélectif consiste à récupérer séparément les déchets selon leur nature. Il est possible de faire le tri à la source de création de déchet ou de collecter les déchets ensemble et d'effectuer le tri ensuite dans un centre de tri.

Le traitement [26] : Toute opération de valorisation ou d'élimination, y compris la préparation qui précède la valorisation ou l'élimination.

II. La gestion des déchets au Sénégal

Le Sénégal a connu une grande croissance de sa population durant les quatre (04) dernières décennies. Cette croissance assez rapide pose aux autorités publiques et aux gouvernements, de grands défis dans la gestion des villes notamment dans le domaine de la gestion des déchets. C'est ainsi que les autorités cherchent toujours des mesures sur l'évolution des déchets.

II.1. Historique et présentation des différents services de gestion des déchets au Sénégal

L'histoire de la gestion des déchets solides au Sénégal comporte plusieurs étapes distinctes [27]. Depuis l'indépendance en 1960, les autorités sénégalaises ont essayé divers programmes de gestion des déchets, mais les efforts ont été minimes.

De 1960 à 1971, le balayage des rues, le dessablage, la collecte et l'élimination des ordures ménagères étaient assurés par les services municipaux. Les contraintes de ce système de gestion comprenaient des équipements de nettoyage insuffisants et inadéquats, une couverture incomplète du territoire communal, un manque de rigueur dans la gestion du personnel et des équipements municipaux, des pressions sociales liées au clientélisme politique qui ont conduit à un recrutement excessif de travailleurs, et un manque de suivi et de mécanismes d'évaluation des activités.

En 1971, la société privée Société Africaine de Développement Industriel et de Promotion (SOADIP) a repris l'ensemble des services jusqu'alors assurés par les services municipaux. Cependant, des difficultés avec la SOADIP ont commencé à apparaître à partir de 1981, notamment le manque d'entretien des équipements, un personnel excessif, le manque de flotte et de renouvellement des équipements, entre autres.

En 1984, avec la cessation des activités de la SOADIP, la gestion communale reprend le contrôle avec l'intervention de la direction des services communaux. L'absence de capacité technique et de ressources de la commune a perduré jusqu'à la création d'une nouvelle société de nettoyage à économie mixte, la Société Industrielle d'Aménagement Urbain du Sénégal (SIAS). La défaillance du service public de l'Etat et l'incapacité de la mairie à le remplacer avaient plongé Dakar dans une saleté répugnante.

La SIAS, créée en 1985 pour remplacer la SOADIP, subira le même sort que cette dernière une décennie plus tard et fermera ses portes en 1995. Depuis la dissolution de la SIAS, une relève est apportée par l'Agence des Travaux Temporaires qui exerce sa mission en concertation avec la Coordination des Associations et des Mouvements de Jeunes de la Communauté Urbaine de Dakar (CAMCUD).

L'approche de l'AGETIP (Agence pour l'Exécution des Travaux d'Intérêt Public) est unique par rapport aux précédentes. Contrairement à la SOADIP et au SIAS (qui ont été créées uniquement pour Dakar), cette structure intervient sur l'ensemble du territoire national, supervisant l'exécution des activités liées à la propreté de la ville en tant que maître d'ouvrage délégué. Par exemple, une convention a été signée avec la Communauté urbaine de Dakar (CUD) pour un coût de 1 milliard en 1996, dont 50% apportés par la CUD et les 50% restants par la Banque mondiale. Cette convention a permis à l'AGETIP de créer le projet "Emploi Jeunes" qui se veut une approche communautaire de la gestion des déchets et de la création d'emplois.

L'agence rémunère et traite directement avec les sociétés concessionnaires et fournit les moyens matériels nécessaires aux travaux de nettoyage et de balayage aux Groupements d'Intérêt Economique (GIE) de quartier. Il offre également une couverture médicale aux travailleurs. La collecte des ordures ménagères est effectuée par des entreprises privées à l'aide de leurs camions de collecte. Ces entreprises sont payées en fonction du poids de la charge, la facturation s'effectuant à la décharge de Mbeubeuss à l'aide d'un pont-bascule qui pèse les camions à l'entrée et à la sortie. Ces procédures triangulaires entre l'AGETIP, les communes et le secteur privé (entreprises et GIE) sont toujours en vigueur. Cependant, ils coexistent avec d'autres formes de gestion des ordures ménagères dans les villes.

Toutefois, elles coexistent avec d'autres formes de gestion des ordures ménagères dans les villes. Le texte évoque différentes formes de gestion des ordures ménagères qui coexistent dans les villes, avec l'exemple du contrat signé entre l'État sénégalais et la société privée Alcyon en 2002 pour la collecte des déchets à Dakar. De 2002 à juillet 2006, la filiale d'Alcyon, l'Agence municipale d'assainissement (AMA Sénégal), était chargée de la collecte des déchets solides dans la capitale, avant d'être cantonnée au Plateau et à la Médina. Le reste du territoire était géré par des concessionnaires.

A partir de 2006, le Ministère de l'Environnement et la convention CADAK-CAR (Communauté d'Agglomérations de Dakar et Communauté d'Agglomérations de Rufisque) ont pris en charge la gestion des déchets dans la région de Dakar et ont travaillé avec VEOLIA et les sociétés concessionnaires. La CADAK-CAR est une émanation des collectivités territoriales de la région de Dakar et est composée de la CADAK, qui regroupe les villes de Dakar, Pikine, et Guédiawaye, et de la CAR, qui regroupe la ville de Rufisque, les communes de Bargny, Diamniadio, et Sébikhotane, et les communautés rurales de Sangalkam et Yenne. Elle a été créée par

une convention signée par leurs deux présidents et assure la maîtrise d'ouvrage du programme de gestion des déchets solides urbains de la région de Dakar suite au décret n° 2006-05 du 9 janvier 2006 portant transfert dudit programme.

Cependant, son statut, son organisation et son mécanisme de financement posent encore des problèmes, ce qui a motivé le lancement d'une étude sur son évolution institutionnelle. De 2011 à aujourd'hui, l'ère de l'UCG (Unité de Coordination de la Gestion des Déchets Solides) a commencé. Elle est rattachée au Ministère de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Hygiène Publique et est chargée d'accompagner les collectivités locales dans la prise en charge de leurs responsabilités en matière de gestion des déchets solides pour l'amélioration du cadre de vie par la mise en place d'infrastructures aux normes, la gestion du ramonage, de la collecte et le transport des déchets et la mobilisation sociale. L'UCG est également chargée d'élaborer la stratégie nationale des déchets et de renforcer les capacités des municipalités à travers la mise en œuvre de projets et de programmes.

Le programme de gestion des déchets « Zéro Déchet » vise à améliorer et promouvoir la santé publique en résolvant durablement le problème de l'assainissement urbain, en améliorant le bien-être des populations, et en réduisant l'impact néfaste de la prolifération des déchets sur l'environnement. UCG réalise régulièrement des opérations d'enlèvement et de nettoyage des déchets sur les différentes voiries très fréquentées, et a également installé des zones de stockage des déchets, les "PNR", visibles sur toutes les artères de la ville et surveillées 24h/24 par des agents, et les déchets sont acheminés aux filières de recyclage.



Figure 1: Point de regroupement normalisé des déchets par l'UCG

Le projet de loi 06/2022 portant création de la Société nationale de gestion intégrée des déchets (SONAGED) c'est-à-dire le lancement de l'UCG en société anonyme. La nouvelle société va

prendre le relais UCG. La SONAGED a pour objectifs, entre autres, de créer une structure qui favorise l'intercommunalité, gestion d'infrastructures modernes de valorisation des déchets dans le cadre du développement de l'économie circulaire etc.

II.2. Problèmes de la gestion des déchets au Sénégal

L'histoire de la gestion des déchets au Sénégal montre que plusieurs sociétés de gestion des déchets (SOADIP, SIAS, etc.) ont été mises en place pour résoudre le problème des déchets. Ces entreprises de nettoyage « disparues » sont toutes tombées à l'eau, malgré les contrats lucratifs qu'elles ont obtenus, avec les inconvénients qui en découlent pour les travailleurs. Ces entreprises manquent parfois de subventions gouvernementales, ce qui signifie qu'elles doivent plusieurs mois d'arriérés de salaire et d'indemnités ou d'avantages aux travailleurs. Au-delà des problèmes liés aux ouvriers, il y a aussi le manque d'entretien des équipements, le non renouvellement des flottes de véhicules et d'engins, les sureffectifs, etc. Ce ne sont là que quelques-unes des causes qui ont pris différentes entreprises de ramassage des ordures au Sénégal.

Ce qui nous intéresse dans ce travail, ce sont les problèmes liés à la gestion des déchets. Plusieurs problèmes sont observés dans la gestion des déchets au Sénégal, parmi lesquels on peut citer :

- Poubelles sans surveillance qui débordent
- Populations non éduquées ou non impliquées qui jettent les ordures par terre lorsque la poubelle est pleine
- Pollution sonore lors des collectes
- Itinéraires de collecte non optimisés
- Gaspillage de carburant et de temps sans besoin de collecte
- Travail désorganisé et sporadique
- Déchets non triés
- Absence de filières formelles de gestion des déchets, etc.

Parmi les problèmes mentionnés ci-dessus voici en image quelque exemple :



Figure 2: quelques problèmes de gestion des déchets au Sénégal

II.3. Problématique et intérêt de la gestion intelligente des déchets au Sénégal

La problématique de ce mémoire porte sur l'intérêt de la gestion intelligente des déchets au Sénégal, en tant que politique et système relativement nouveau dans le pays, qui vise à résoudre les problèmes de collecte inefficace des déchets, de suivi de la localisation et du niveau de remplissage des poubelles, ainsi que de sensibilisation des résidents à l'importance de la gestion des déchets. Cette problématique soulève des questions telles que :

- Quels sont les défis et les enjeux de la gestion des déchets au Sénégal ?
- Comment la gestion intelligente des déchets peut-elle aider à résoudre ces problèmes ?
- Quels sont les avantages et les limites de la gestion intelligente des déchets par rapport aux approches traditionnelles de gestion des déchets ?
- Comment les autorités sénégalaises peuvent-elles encourager et soutenir la mise en œuvre de la gestion intelligente des déchets ?
- Comment mesurer l'impact de la gestion intelligente des déchets sur l'environnement, la santé publique et l'économie ?

L'intérêt de cette problématique réside dans sa pertinence pour les travailleurs et les autorités sénégalaises, qui cherchent des solutions innovantes pour résoudre les problèmes de gestion des déchets, ainsi que pour la recherche scientifique, qui peut apporter des contributions importantes à la compréhension des enjeux liés à la gestion des déchets dans les pays en développement.

Conclusion

La planification urbaine est un domaine très riche et vaste. Il inclut de nombreuses et différentes problématiques telles que La protection de l'environnement. Vu que Les déchets sont des substances nocives pour l'environnement et considérés comme substances ou objets qu'on élimine, qu'on a l'intention d'éliminer ou qu'on est tenu d'éliminer en vertu des dispositions du droit national. Une bonne gestion des déchets apparait une tâche nécessaire à cause de nombreux impacts négatifs que la non élimination appropriée des déchets fait.

Dans le cadre d'une vision intégrée le développement durable dans les nouvelles technologies, il convient d'appliquer les technologies de l'information et de la communication les plus récentes pour la bonne gestion des déchets afin de réduire ces conséquences.

Le chapitre suivant introduit la littérature et la solution proposée pour mieux éradiquer la mauvaise gestion des déchets.

Chapitre 2 : le concept d'internet des objets dans les villes intelligentes

Introduction

Internet est l'une des technologies les plus utilisées actuellement, et c'est un système de communication et un réseau mondial permettant de transférer des données via des technologies filaires ou sans fil. Il offre également une multitude de services tels que la vidéo, l'audio, le shopping en ligne, les messageries instantanées, les réseaux sociaux, les services financiers, etc.

Le développement important et accéléré de la technologie Internet a entraîné l'émergence de l'Internet des objets. Cette technologie a considérablement élargi l'utilisation d'équipements et d'appareils intelligents équipés de divers capteurs et algorithmes interconnectés les uns avec les autres, offrant ainsi divers services aux institutions et à la vie quotidienne des citoyens. Nous Présenterons dans ce chapitre, l'architecture de l'internet des objets, ces composants impliqués et ces domaines d'application dans les villes intelligentes.

I. Internet des objets

Kevin Ashton a introduit le terme "Internet of Things" en 1999 lorsqu'il était directeur exécutif de l'Auto-ID Center au MIT. Il a proposé l'utilisation de l'identification par radiofréquence (RFID) pour connecter les objets du monde physique à Internet. Depuis lors, l'IoT a connu une croissance exponentielle et englobe désormais une vaste gamme d'appareils connectés, allant des objets de la vie quotidienne tels que les smartphones et les montres intelligentes aux capteurs industriels et aux équipements de santé connectés. L'IoT est considéré comme l'un des moteurs clés de la transformation numérique, offrant de nouvelles opportunités pour les entreprises et les consommateurs dans de nombreux domaines différents.

I.1. Définition de l'internet des objets

L'Internet des objets, qui est un ensemble d'objet connecté à internet sans intervention humaine, via un protocole qui assure l'échange d'informations et la communication des appareils entre eux. Donc pour définir l'internet des objets, il est important de définir ce qu'est un objet connecté.

L'objet connecté est comme un périphérique dont sa vocation première n'est pas d'être des périphériques informatiques ni des interfaces d'accès au web, mais auxquels l'ajout d'une connexion Internet a permis d'apporter une valeur supplémentaire en termes de fonctionnalité,

d'information, d'interaction avec l'environnement ou d'usage [4] par exemple un objet tel qu'une montre-bracelet, une poubelle ou un véhicule automobile sans intégration de systèmes informatiques ou de communication.

Il existe de nombreuses définitions de l'internet des objets proposés par des organisations de renommé mondial [5], parmi lesquelles on peut citer :

IEEE qui décrit l'internet des objets comme un réseau d'éléments embarqués avec des capteurs se connectant à Internet.

L'Union Internationale des Télécommunications (UIT) définit l'IoT comme une infrastructure globale qui offre des services avancés en interconnectant des objets avec les technologies de communications actuelles.

ITU a également mis à jour la définition du système de télécommunication pour l'IoT en ajoutant « Everything », IoE. Cette définition signifie tous types de communication entre les humains, les ordinateurs et les objets (appareils intelligents).

L'Institut national des normes et de la technologie (NIST) définit l'IoT comme une technologie de systèmes cyber-physiques (CPS) afin de connecter des appareils intelligents dans divers secteurs tels que les transports, les soins de santé et l'énergie.

Enfin, Cisco dans le secteur commercial définit l'Internet des Objets « IoT » dans le cadre de l'« IoE » comme la technologie pour connecter les personnes, les processus, les données et les choses à échanger l'information aux expériences, aux capacités et aux avantages économiques.

On peut en déduire que l'Internet des objets est une technologie moderne qui connecte divers périphériques (filaire et sans fil), des capteurs à Internet, à travers des systèmes, des applications et des algorithmes simples qui ont la capacité de récupérer, transférer, stocker, de traiter les données et de connecter les mondes physique et virtuel.

I.2. L'architecture en couche de l'internet des objets

L'architecture de l'IoT est l'un des sujets les plus mentionnés dans les articles de recherche dans ce domaine. L'Internet des objets (IoT) comprend un grand nombre d'appareils intelligents connectés à un vaste réseau Internet à l'aide de diverses technologies de mise en réseau, la plupart étant sans fil. Cela rend la structure plus complexe et difficile à gérer, d'où la nécessité d'une architecture. Une architecture est une structure pour spécifier les composants physiques du ré-

seau, leur organisation et leur configuration fonctionnelle, ainsi que leurs principes et procédures opérationnels, ainsi que les formats de données utilisés dans leur fonctionnement. Le développement de l'IoT dépend des technologies utilisées, des domaines d'application et des aspects commerciaux. Différentes architectures IoT sont disponibles pour les appareils IoT, mais le format le plus basique et le plus largement accepté est une architecture à quatre couches, qui comprend [6] :

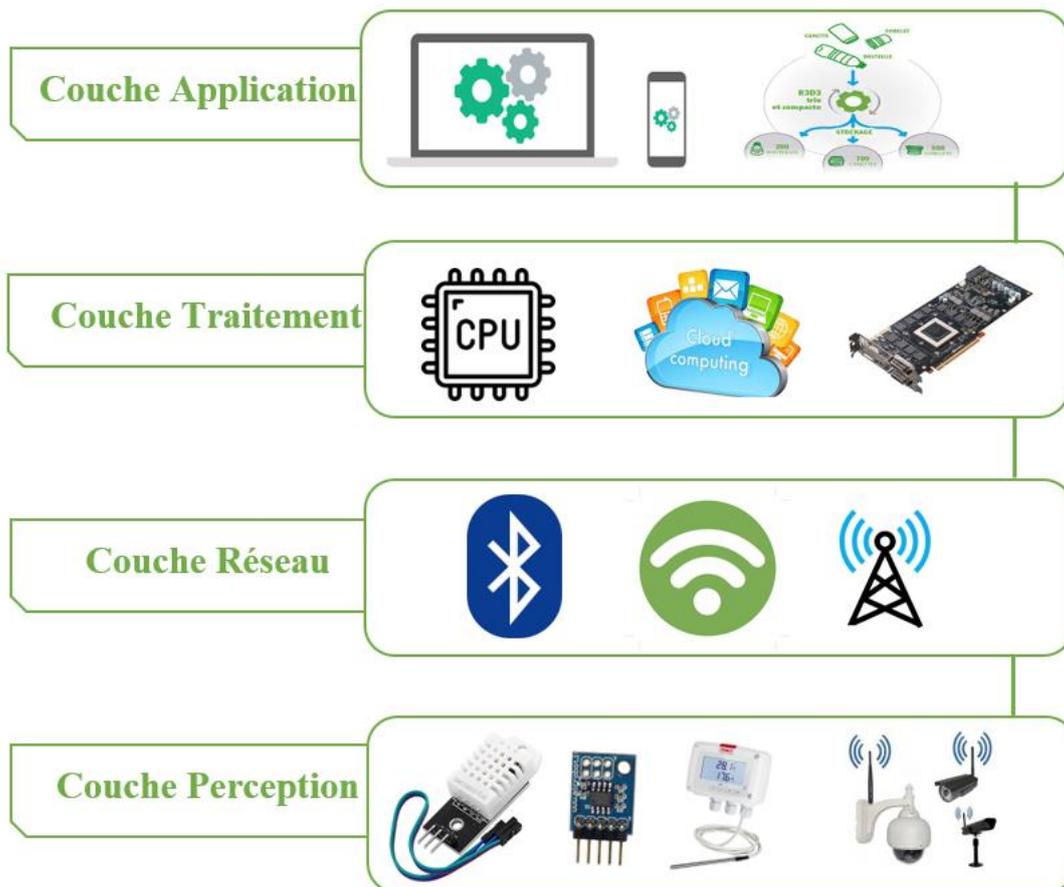


Figure 3: Architecture en couche de l'IoT

La couche de perception, également appelée couche d'objet, est la première couche de l'IoT. Elle représente les objets physiques de l'IoT qui ont pour but de collecter et de traiter les informations de base, et de fournir différentes fonctionnalités telles que la position physique, la température, le poids, le mouvement, etc. Cette couche collecte et numérise les données d'un environnement donné et les envoie à la couche supérieure via des canaux sécurisés.

La couche réseau, également appelée couche de communication, est responsable du transport des données vers le centre de traitement de l'information. Les moyens de transmission peuvent

être filaires ou sans fil, et les principales technologies utilisées dans cette couche sont la 3G, le Wifi, le ZigBee, le LoRa, etc. Cette couche est également responsable de la gestion des protocoles de communication tels que 6LoWPAN, qui sont nécessaires pour l'adressage et le routage des données de millions d'objets connectés.

La couche de traitement (également appelée couche Middleware) est responsable de la gestion des services offerts par chaque objet IoT. Elle lie également les informations collectées à des bases de données et applique des traitements et des calculs pour permettre des prises de décisions automatiques. Cette couche permet également aux développeurs d'applications IoT de faire appel à des services sans se soucier de l'interopérabilité des objets ou d'une plateforme matérielle spécifique.

La couche application est la dernière couche de l'architecture IoT. Elle permet aux utilisateurs finaux de bénéficier des services fournis par les couches inférieures. Les applications de l'IoT offrent un large éventail de services, allant de la simple collecte de données à la prise de décisions complexes basées sur l'analyse de données en temps réel. Cette couche est responsable de l'interface utilisateur, de l'expérience utilisateur, de la sécurité et de la gestion des données. Les applications IoT peuvent être développées pour divers domaines, tels que la santé, l'agriculture, les villes intelligentes, la surveillance de l'environnement, etc.

NB : Couche de sécurité Cette couche est transverse à toutes les couches précédentes[6].

I.3. Les technologies de communication de communication dans IoT :

On distingue plusieurs réseaux dans le marché capable de connecter les objets connectés. On note les réseaux à courte portée, les réseaux à longue portée bas débit et les réseaux cellulaires à longue portée à haut débit.

I.3.1. Les technologies de communication à courte portée

Ces réseaux permettent le transfert de données sur de faibles distances. Ils sont beaucoup utilisés dans la domotique, dans le « wearable » (les objets connectés portables). La figure montre un certain nombre de réseaux à portée courte.



Figure 4: Technologie de communication à courte portée

Nous allons voir en détails quelques réseaux courte portée les plus connus.

- **RFID et NFC**

La RFID utilise des ondes radio pour identifier et collecter des informations sur des objets, tels que des étiquettes ou des badges. Elle peut être utilisée de manière passive ou active, et offre une distance de lecture allant de quelques centimètres à plusieurs mètres[7]. La NFC est une technologie de communication sans fil de courte portée qui permet aux appareils de communiquer entre eux lorsqu'ils sont à quelques centimètres l'un de l'autre. Elle est souvent utilisée pour les paiements sans contact, le partage de fichiers et le contrôle d'accès. La NFC est également une technologie de RFID, mais avec une portée plus courte et une fréquence plus élevée[8].

- **Bluetooth**

Le Bluetooth est en effet une technologie de communication sans fil qui permet de connecter des appareils sur des distances relativement courtes (jusqu'à environ 100 mètres) en utilisant une faible consommation d'énergie [9]. Elle a été conçue pour permettre aux utilisateurs de connecter sans fil leurs appareils électroniques tels que des téléphones portables, des casques, des enceintes, des montres connectées, des claviers, des souris, etc. Il est donc une technologie importante dans l'IoT, car elle permet une connectivité facile et rapide entre des appareils électroniques, et permet également de créer des réseaux d'appareils pour un fonctionnement collaboratif

- **Wifi**

La technologie WIFI connecte différents objets sans fil entre eux pour permettre la transmission de données. Elle est utilisée notamment pour les équipements de la maison et pour tous les accès à Internet avec un très haut débit. La Wi-Fi Technologie utilisant un spectre sans licence dans les bandes de 2,4 GHz et 5 GHz pour fournir une connectivité entre les appareils portables et un point d'accès Internet local [10].

- **ZigBee**

ZigBee est un protocole de communication sans fil à courte portée basé sur IEEE 802.15.4. Il est utilisé pour créer des PAN avec de petites radios numériques à faible puissance qui sont moins chères que les autres réseaux personnels sans fil. (Wpan) comme Bluetooth ou Wi-Fi et peut être utilisé pour la domotique et la collecte de données sur les dispositifs médicaux[11].

- **Z-Wave**

Z - Wave est un réseau sans fil conçu par Zensys qui peut être utilisé pour contrôler l'éclairage, le chauffage et la climatisation, ainsi que pour la sécurité des appareils ménagers et de la maison et d'autres fonctions. ZigBee est utilisé pour des communications à faible taux de transfert de données (plus faible que le Bluetooth et le Wifi) [12].

I.3.2. Les technologies de communication longue portée

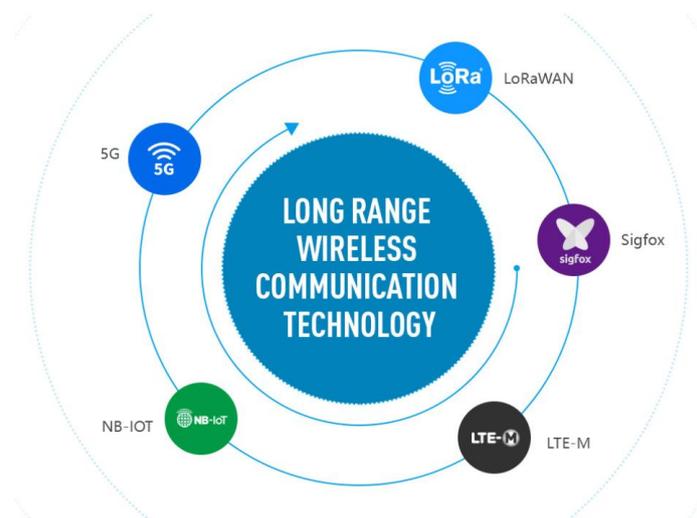


Figure 5 : technologies de communication longue portée

- **LPWAN**

Le LPWAN « Low Power Wide Area Network » signifie réseau étendu à faible consommation d'énergie. Faible puissance, la technologie sans fil (LPWAN) est la réponse à la nécessité d'avoir un système qui connecte à internet des objets à faible consommation d'énergies, pour la

saisie de données à faible débit. Les objets connectés n'envoient souvent pas de données en continu et sont en phase quasi dormante lorsqu'une action n'est pas nécessaire et sont alimentés souvent par batterie. Ces technologies utilisent les ondes radio très efficaces dans les zones rurales. Cependant, les zones urbaines avec des immeubles de grandes hauteurs, des arbres et des maisons sont plus difficiles à parcourir par les ondes radio. En ce qui concerne les aspects réseau, les réseaux LPWAN sont généralement répartis en topologie en étoile.

- **LoRa**

LoRa (Long Range) est une technologie sans fil brevetée développée par Cycleo de Grenoble et acquise par Semtech en 2012. Cette technologie se caractérise notamment par sa grande portée et sa faible consommation d'énergie, ce qui la rend particulièrement adaptée aux objets connectés qui doivent être autonomes en énergie pendant plusieurs années.

Le réseau LoRa permet des transmissions à longue portée (jusqu'à plus de 15 km en zones rurales) avec une faible consommation d'énergie, ce qui en fait une solution idéale pour les applications IoT (Internet des objets) qui nécessitent une connectivité longue portée et une faible consommation d'énergie [13].

- **Sigfox**

Sigfox est une entreprise française fondée en 2010 qui propose une technologie de communication sans fil pour l'Internet des objets (IoT). Cette technologie permet des transmissions à longue portée avec une faible consommation d'énergie, ce qui en fait une solution idéale pour les applications IoT [14].

Le réseau Sigfox est actuellement déployé dans 36 pays à travers le monde et permet des transmissions à longue portée (plus de 30 km en zones rurales) avec une faible consommation d'énergie. Cependant, il convient de noter que le volume des données transmises via ce réseau reste très faible et que le transfert des données est unidirectionnel, c'est-à-dire que les objets connectés ne peuvent pas recevoir de commandes ou d'instructions via le réseau Sigfox

- **LTE-M**

3GPP a créé la communication de type machine LTE (LTE-M) la norme. Lte-m transmet dans la bande subghz sous licence, avec des fréquences allant de 700 à 900 MHz. Les débits de données en liaison montante et descendante sont d'environ 1 Mbps. Cette approche à faible consommation d'énergie peut aider à prolonger la durée de vie des terminaux alimentés par batterie jusqu'à 10 à 20 années. Lte-m utilise également l'infrastructure sans fil cellulaire

existante pour la rendre plus robuste et sécurisée pour les services avec des exigences de qualité élevées [11].

- **Internet des objets à bande étroite (NB-IoT)**

Internet des objets à bande étroite (NB-iot), également connu sous le nom de LTE Cat NB1, est un autre dérivé de la norme LTE. Il est basé sur une communication à bande étroite et utilise une bande passante de 180khz. Par conséquent, les débits de données sont considérablement réduits (à propos 250 KBPS pour la liaison descendante et 20 KBPS pour la liaison montante), ce qui rend les mises à jour Fota difficiles à mettre en œuvre avec NB-iot. Nb-iot peut utiliser 3 différents modes : bande de garde LTE, autonome et intra bande. Le mode intra bande utilise la bande de fréquence LTE, la bande de fréquence protégée utilise la partie inutilisée de la bande de fréquence LTE, et la bande de fréquence indépendante utilise la bande de fréquence dédiée (comme la bande de fréquence GSM). Nb-iot ne prend pas en charge le transfert et ne vaut pas la peine d'être envisagé pour les applications IoT mobiles [11].

- **La 5G**

5G La cinquième génération de technologie mobile, caractérisée par la vitesse de transmission des données et une réduction de la latence de bout en bout. La 3GPP a proposé trois catégories de technologies principales [11] :

eMBB - enhanced Mobile Broadband, Haut débit mobile amélioré qui permet une livraison plus dynamique et adaptative de la capacité en temps réel et prend en charge sans effort de nouveaux services tels que la réalité virtuelle et la réalité augmentée. Des débits de données extérieurs allant jusqu'à 2 Gbps et à l'intérieur jusqu'à 20 Gbps sont envisagés.

mMTC - massive Machine Type Communications, Communications de type machine massive. L'objectif de cette catégorie est de fournir une très grande densité de connectivité offrant une connectivité globale pour plus d'un million de périphériques par kilomètre carré au niveau du réseau. Cette catégorie propose de nombreuses applications telles que les villes intelligentes, les réseaux électriques intelligents etc.

uRLLC - Ultra Reliable Low Latency Communications, Communications ultra-fiables et à faible temps de latence. Cette technologie ouvre une nouvelle dimension à l'application de réseaux sans fil tels que les interventions d'urgence, la robotique collaborative, la cyber santé, les drones etc.

Voici en résumé le tableau des technologies réseaux utilisée dans IoT

Réseaux courtes portées	Réseaux longues portées
RFID et NFC	LPWAN
Wifi	Lora
Zig bee	Sigfox
Z-wave	LTE-M
Bluetooth	NB-IoT
	4G, 5G

Tableau 1 : résumé des technologies réseaux utilisées dans IoT :

I.4. La plateforme IoT

Une plateforme d'IoT est un ensemble de services permettant de collecter, stocker, corrélérer, analyser et exploiter les données.

Celle-ci a pour fonction de faciliter la communication entre les objets, les machines, assurer la gestion des différents périphériques et protocoles de communication, remonter les flux de données, et permettre de créer de nouvelles applications à valeur ajoutée pour les entreprises [15]. Elle fait le lien en somme entre l'objet, la passerelle de communication, les données stockées et les applications logiciels. Elle doit permettre de gérer sur une seule et même interface à la fois les capteurs et objets connectés disséminés un peu partout, la remontée d'information, et la redirection de ces données captées vers des interfaces de data management et autres applications tierces.

II. Domaines d'applications de l'IoT pour les villes intelligentes

Dans les villes, plusieurs secteurs pourraient profiter de cette avancée technologique, on peut citer les suivants : Le secteur du transport, de l'énergie, de l'environnement, de l'eau, des infrastructures dans la ville, la sécurité, la santé, la mobilité, le mobilier urbain etc. Cette liste est non exhaustive vu que les capteurs IoT ont la capacité d'être utilisés à tous les niveaux dans n'importe quel secteur. On parle ainsi d'internet de tous les objets, « Internet of Everything ». Nous avons résumé les différents cas d'applications potentiels de l'IoT dans les villes à travers le schéma suivant.

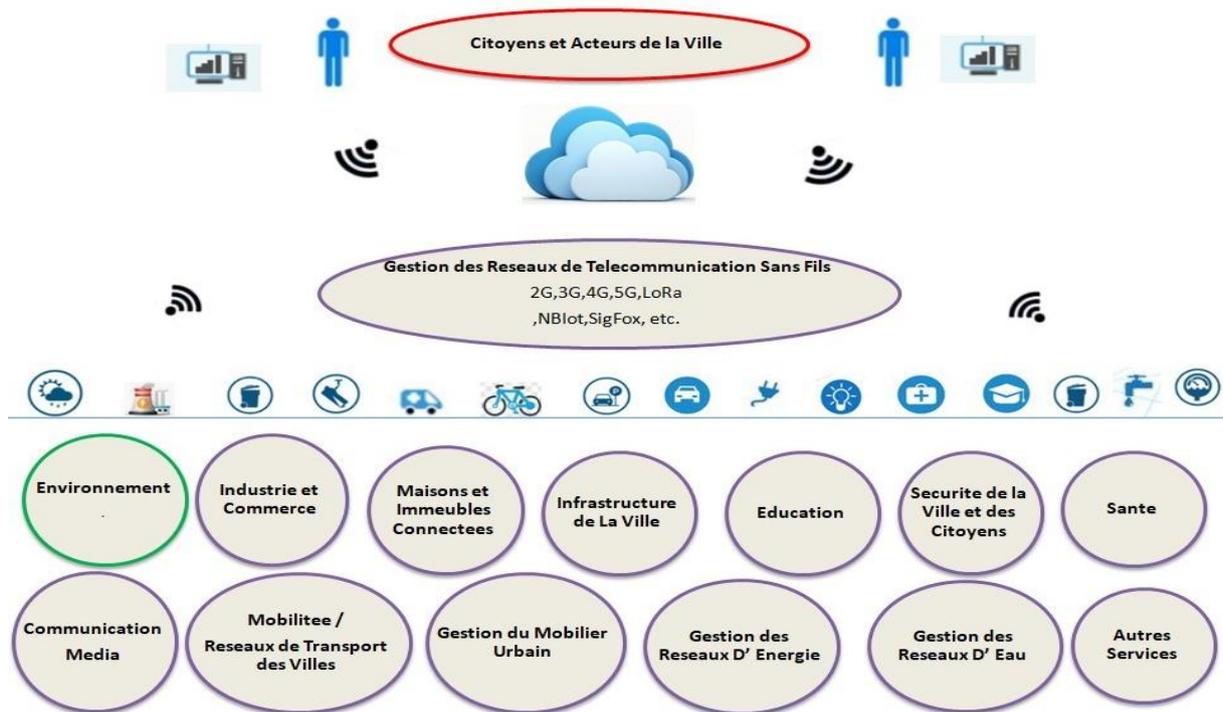


Figure 6: Domain d'application de l'IoT

III. Notre domaine d'application de l'internet des objets

Au cours de notre quatrième semestre de ma formation en master réseaux et systèmes, je me suis intéressé à l'étude d'une proposition d'un système de gestion intelligente des déchets c'est-à-dire utiliser internet des objets dans la gestion des déchets.



Figure 7 : internet des objets dans le domaine de la gestion des déchets

En ce moment, ce projet est toujours dans une phase d'étude, avec expérimentation réalisée dans le cadre de tenir compte des avantages qu'il pourrait apporter pour les villes sénégalaises.

Étant donné que les cas d'utilisation de l'IoT sont multiples, comme expliqué dans la partie intitulée « domaine d'application » de ce document, j'ai choisi de détailler le cas d'utilisation

d'une solution IoT qui pourrait répondre aux besoins des villes en contribuant à réduire le débordement des poubelles et la pollution de l'air.

Cet exemple me semble intéressant car les municipalités se sont engagées à planifier des services urbains intégrés afin de fournir des services efficaces aux citoyens dans l'espoir d'améliorer la qualité de vie. Les décideurs politiques et les dirigeants publics recherchent de plus en plus des solutions TIC pour fournir des services publics de manière productive et efficace dans les domaines des services publics, des transports, de l'éducation, des soins de santé, de la sécurité et du développement durable (notamment la gestion des déchets). De nombreuses autorités locales et administrations municipales voient désormais les avantages de l'intégration des systèmes et d'une réflexion plus concertée.

La gestion intelligente des déchets nécessite une communication et un partage d'informations en temps réel, qui sont des exigences importantes que la mise en œuvre d'applications et de services de ville intelligente offre à l'homme. Le partage d'informations décrit l'échange de données entre diverses organisations, personnes et technologies. Les nouvelles TIC jouent un rôle crucial à cet égard. La ville intelligente a beaucoup contribué à la bonne gestion des déchets car la collecte, le traitement, le stockage et le partage d'informations liés à l'échange de données, aux protocoles de communication et aux infrastructures technologiques peuvent être très utiles pour une bonne gestion des déchets.

C'est dans cette perspective que les chercheurs continuent d'apporter leur contribution dans l'objectif commun de minimiser les lourdes dépenses engendrées par la gestion des déchets. Dans la suite de ce document, nous allons montrer pourquoi ce cas d'utilisation est important.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé trois parties principales : la première partie traitant le Concepts de l'Internet des objets sa définition son architecture, ainsi que son rôle important dans la facilitation du travail quotidien de l'homme. La deuxième partie était consacrée à l'IoT dans les villes intelligentes et ses cas d'application. Enfin, nous avons défini notre cas d'usage. Le chapitre suivant présente une étude de différents cas dans les domaines de recherche qui ont été abordés par certaines équipes scientifiques en gestion des déchets.

Chapitre 3 : les travaux connexes et présentation de notre contribution

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les cas les plus récents des travaux relatifs aux problèmes de gestion des déchets étudiés dans ce mémoire. De nombreux chercheurs ont proposé des solutions pour résoudre ces problèmes, en se concentrant principalement sur la collecte manuelle des déchets, leur tri et le recyclage. Ces dernières années, l'utilisation de la technologie pour contrôler et collecter efficacement les déchets commence à être de plus en plus courante.

Parmi les différentes propositions avancées, certaines ont déjà été déployées avec succès. Ce chapitre présente l'ensemble des enquêtes menées auprès de différentes structures proposant des méthodes de gestion intelligente des déchets dans les villes utilisant l'IoT, afin de présenter notre contribution.

I. Les travaux proposés dans la littérature pour la gestion des déchets

Le groupe Mohammad Aazam et all [27] déclare qu'avec l'augmentation constante de la population, l'urbanisation, les problèmes de migrations et le changement de mode de vie, les niveaux de production de déchets solides municipaux augmentent de manière significative. Par conséquent, la gestion des déchets devient un défi auquel sont confrontés non seulement les pays en développement, mais aussi les pays développés et avancés. C'est dans ce sens qu'ils proposent en 2016 une gestion intelligente des déchets basée sur le cloud pour les villes intelligentes ou la gestion des déchets implique trois principaux types d'entités :

- ✓ Les utilisateurs qui génèrent les déchets,
- ✓ Les collecteurs de déchets/administration de la ville,
- ✓ Les parties prenantes.

Ce système proposé affecte directement le mode de vie, les soins de santé, l'environnement, le recyclage et l'élimination, et plusieurs autres industries. Ces auteurs trouvent que les tendances actuelles en matière de gestion des déchets ne sont pas suffisamment sophistiquées pour parvenir à un mécanisme de gestion des déchets robuste et efficace. Il est très important d'avoir une manière intelligente de gérer les déchets, de sorte que non seulement le statut des déchets

soit notifié à temps quand ils doivent être collectés, mais aussi que toutes les parties prenantes soient informées en temps opportun. Cela aiderait non seulement à attirer et à identifier les parties prenantes, mais contribuerait également à créer des moyens plus efficaces de recyclage et de réduction des déchets, ce qui rendra également la gestion globale des déchets plus efficace et gardant tout cela à l'esprit. Aazam et all proposent un mécanisme de gestion intelligente des déchets basé sur le cloud dans lequel les poubelles sont équipées de capteurs, capables de notifier l'état de leur niveau de déchets et de télécharger l'état sur le cloud. Les parties prenantes peuvent accéder aux données souhaitées depuis le cloud. De plus, pour l'administration municipale et la gestion des déchets, il sera possible d'optimiser les itinéraires et de sélectionner le chemin de collecte des déchets en fonction des statuts des poubelles dans une métropole, ce qui contribuerait à l'efficacité énergétique et temporelle.



Figure 8: Architecture de la gestion intelligente des déchets basée sur le cloud pour les villes intelligentes

Alexei Medvedev, Petr Fedchenkov, Arkady Zaslavsky, Theodoros Anagnostopoulos et Sergey Khoruzhnikov, 2015 [28] proposent un système avancé d'aide à la décision pour une collecte efficace des déchets dans les villes intelligentes. Le système intègre un modèle de partage de données entre les chauffeurs routiers en temps réel afin d'effectuer la collecte des déchets et l'optimisation dynamique des itinéraires. Le système gère le cas d'une collecte inefficace des déchets dans les zones inaccessibles de la Smart City. Des caméras de surveillance sont incorporées pour capturer les zones problématiques et fournir des preuves aux autorités. Le système de collecte des déchets vise à fournir un service de haute qualité aux citoyens d'une Smart City.

[29] présente le développement et la validation d'une solution IoT auto-alimentée et simple pour surveiller le niveau non rempli de poubelles à partir d'une station de surveillance centrale.

Les nœuds de capteurs finaux du système IoT développé sont appelés Bin Level Monitoring Unit (BLMU) qui sont installés dans chaque poubelle où le niveau non rempli doit être surveillé. Chaque BLMU mesure le niveau non rempli des poubelles et le transmet à une unité de point d'accès sans fil (WAPU). Chaque WAPU reçoit les données de niveau non remplies de plusieurs BLMU et les télécharge sur le serveur central pour stockage et analyse. L'autorité de collecte des déchets peut visualiser et analyser le niveau non rempli de chaque bac à l'aide d'une interface utilisateur graphique intelligente.

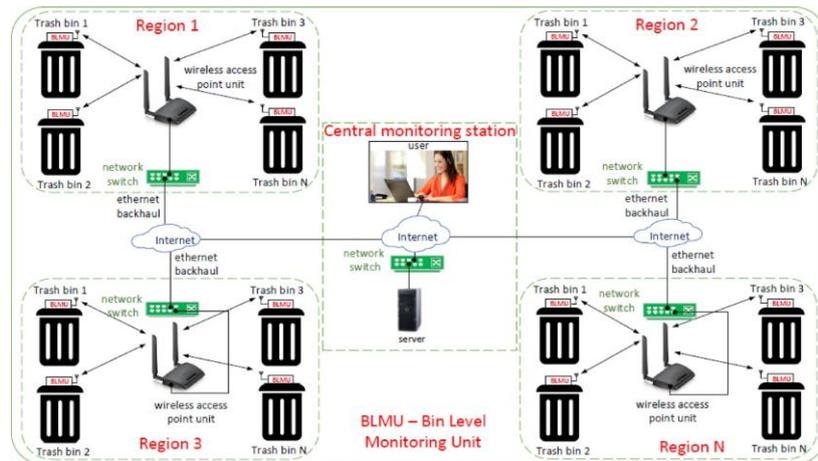


Figure 9: Architecture réseau du système IoT-SWM

Dans [30] un objectif de ramassage d'ordure basé sur l'internet des objets a été proposé par (Pardini, Joel, Rodrigues, Diallo, Kumar Das, Hugo, Albuquerque et Kozlov, 2020). Ces derniers proposent une solution qui vise à optimiser la gestion des déchets en incluant les citoyens dans le processus. Ce système est basé sur une approche dont les déchets jetés dans les poubelles intelligentes sont surveillés par des capteurs ultrasons et de charge (mesure le poids des déchets dans la poubelle) pour informer en temps réel le niveau de remplissage de chaque corbeille. Le module de charge est couplé par l'amplificateur HX711 qui permet l'amplification d'un signal envoyé par une cellule d'effort et assure aussi l'interconnexion avec le microcontrôleur. Dans ce système Les données réceptionnées par ces capteurs sont stockées et traitées dans un middleware (intergiciel) IoT qui agit comme une passerelle entre les autres applications, outils et bases de données pour offrir aux utilisateurs des services. La communication entre les poubelles intelligentes et l'intergiciel est assurée par un module GPRS, afin de fournir des informations pour la collecte avec des itinéraires optimisés. Dans le but de pouvoir donner des informations sur l'environnement (humidité et température) le capteur DHT11 est utilisé dans ce travail. Afin que le système puisse gérer le suivi et la localisation des

poubelles intelligentes ces auteurs ont utilisé des modules GPS pour imprimer les coordonnées géographiques de chaque poubelle.

Une application web ou Android est aussi proposée dans ce système offrir aux utilisateurs d'identifier les poubelles de proximités, leur niveau de remplissage et les informations concernant le jour de nettoyage des bacs.

Voici en image l'architecture et le prototype que ces auteurs ont proposés.

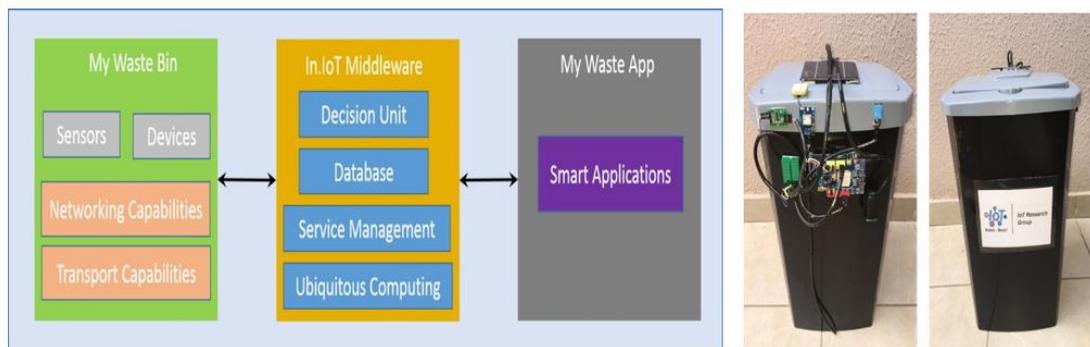


Figure 10 : la gestion des déchets basée sur IoT avec des citoyens inclus dans le processus

Dans [31] des auteurs comme (Vasagarde, Tamboli, Chinde, 2017) proposent un système de collecte et de gestion dynamique des déchets solides basé sur des capteurs, ascenseur et GMS. Dans ce document Vasagarde et al se concentrent non seulement sur la surveillance des déchets à l'intérieur de la poubelle mais aussi à l'extérieur (alentour) des bacs à l'aide d'un capteur infrarouge. Ce dernier est utilisé pour mesurer l'état de remplissage de la poubelle, pour la détection des déchets présent à l'extérieur de la corbeille et permettra à l'assemblage mécanique de nettoyer ces déchets et de les remettre correctement au bac. Lorsque ce capteur détecte le niveau de déchets jusqu'au seuil, le système utilisera un module GSM pour envoyer un message à l'autorité respective de la municipalité. Dans cette étude de recherche une application logiciel est aussi développée pour indiquer aux utilisateurs l'emplacement de la poubelle dans la zone la plus proche. Un autre aspect obtenu par ce système est l'alphabétisation et la sensibilisation des gens à l'utilisation appropriée des poubelles communes par un système d'alarme. Une fois que le citoyen a jeté les déchets de façon inappropriée un système d'alarme se déclenche afin d'inciter la personne pour qu'elle jette les déchets correctement dans la poubelle. Pour le cas d'accumulation de déchet autour des bacs, le système dispose d'un ascenseur mécanique composé d'une crémaillère d'un arbre de transmission, d'un moteur électrique d'un pignon et d'une poulie à chaîne qui sont entraînés par un contrôleur principal et collecte les déchets accumulés autour de la poubelle.

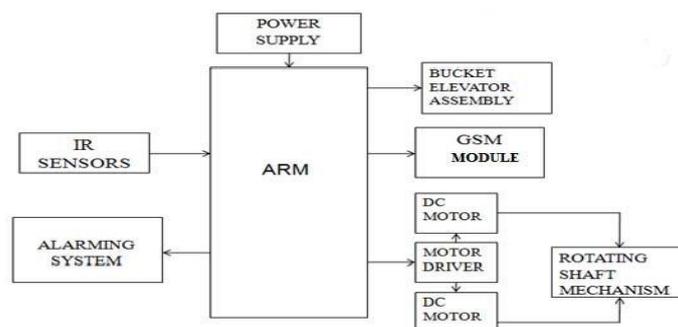


Figure 11 : système de collecte et de gestion dynamique des déchets solides basé sur des capteurs, ascenseur et GMS

Les auteurs (Praven Kumar Gupta, Vidhya Shree, Lingayya Hirremath et Sindhu Rajendran) ont développé un système de surveillance, de collecte, de tri et de recyclage des déchets. Cette gestion est basée sur l'intelligence artificielle avec l'intégration de l'IoT, des réseaux d'accès, de la théorie d'optimisation et des systèmes d'informations géographique SIG. Le système proposé sera en mesure de surveiller le processus de collecte des déchets et de gérer le processus global de collecte. Il fournit à temps solide la collecte des déchets, le suivi de la position des véhicules grâce à la base de données SIG et également il surmonte les inconvénients tels que l'utilisation d'un itinéraire minimum, un faible coût de carburant, un environnement propre et disponible.

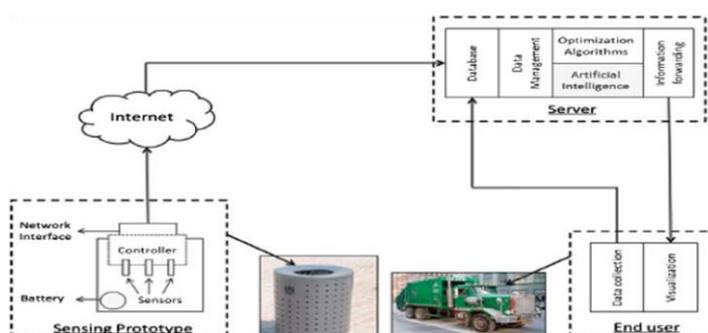


Figure 12: architecture d'un système de surveillance, de collecte, de tri et de recyclage des déchets

Afin de relever le mode infrastructure, les auteurs (Saiful Azad, Arafatur Rahman, A. Taufiq Asyhari, Al-Sakib Khan Pathan, 2017) [32] ont proposé un réseau efficace sans infrastructure appelé réseau associé à la foule qui utilise un ensemble de foules pour combler les lacunes de communication entre les composants. Ils ont appelé leur foule agent volontaire tout en relayant les données d'un composant à d'autre composants jusqu'à ce qu'il atteigne sa destination. Les auteurs s'accrochent ici sur la réduction du cout de déploiement et de maintenance de l'infrastructure. L'algorithme génétique dans cet article pour trouver un compromis réalisable entre la distance et le cout. Cependant les Azad, Rahman et all* n'ont pas en compte

l'authenticité des données. Comme les données ne sont pas vérifiées, un agent volontaire peut envoyer des fausses données dans le réseau ce qui peut amener aux éboueurs de parcourir une grande distance pour de fausses poubelles signalées.

Les auteurs (Rambhia, Valera et Punjabi, 2019) [33] ont proposé un système de collecte des déchets, soutenu par des services d'Internet des objets avec une planification et un routage dynamiques des collecteurs de déchets ainsi une détection de l'humidité des poubelles intelligentes dans les villes intelligentes.

La détection d'humidité permet aux auteurs de proposer également un moyen de séparer automatiquement les déchets secs et humides. La ségrégation des déchets permet d'identifier la valeur économique des déchets et de les gérer efficacement.

L'état de chaque poubelle est envoyé au nuage(cloud) en temps réel.

Le système proposé comprend un système de surveillance embarqué qui rend le processus de signalement des problèmes et de collecte de preuves plus utilisable, une application mobile pour assister les collecteurs d'ordures en utilisant des itinéraires dynamiques optimaux. L'ensemble du processus est surveillé ou contrôlé par les sociétés municipales à partir du système proposé.

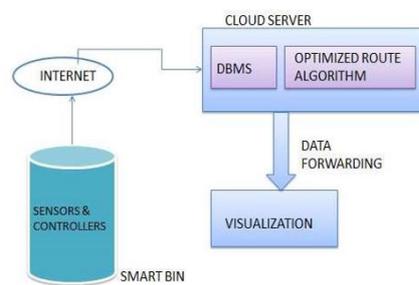


Fig. 1: System Architecture

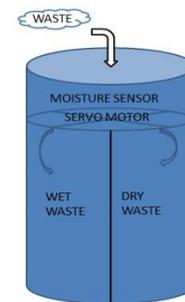


Fig. 2: Bin Design for automatic segregation

Figure 13 : Architecture du Système et design de la poubelle pour la ségrégation automatique

Le groupe Mahajan*, Jain* et al [34] propose en 2018 un schéma de gestion intelligente des déchets utilisant les réseaux de capteurs sans fil (WSN) et l'IoT (Internet des objets). Les poubelles sont déployées avec des capteurs et sont mises en réseau à l'aide de WSN. Les capteurs déployés dans les poubelles collectent les données pour chaque intervalle déterminé. Une fois le seuil atteint, il lève une requête au GCA (Garbage Collector Agent). Cet agent collecte les demandes de tous les véhicules remplis et communique à l'aide du Framework IoT. Un prototype matériel est développé pour le Framework proposé. L'analyse du schéma proposé donne de meilleurs résultats en matière de gestion des déchets.



Figure 14 : Architecture de la gestion des déchets utilisant WSN et IoT

Une architecture de gestion des déchets solides utilisant les technologies des capteurs sans fil par le groupe Sauro Longhi et al dans le but d'améliorer l'optimisation et la manutention et de transfert sur site dans le domaine de gestion des déchets. Ce document se concentre sur le processus de manipulation de stockage sur site, et sur le processus de transfert, avec pour objectif principale de développer un système intelligent de gestion des déchets solides capable de garantir la santé publique tout en réduisant les couts et en améliorant la qualité. Ces auteurs proposent une approche basée sur des nœuds de capteurs et utilise des nœuds de transfert de données afin de fournir à un serveur les mesures des données récupérées lors du remplissage des poubelles. Une solution de surveillance à distance a été mise en place, offrant à l'utilisateur d'interagir avec le système en utilisant un navigateur web. Ces auteurs proposent une architecture à 3 niveaux dont les poubelles se situent au premier niveau, suivi des réseaux DTN puis le système de supervision.

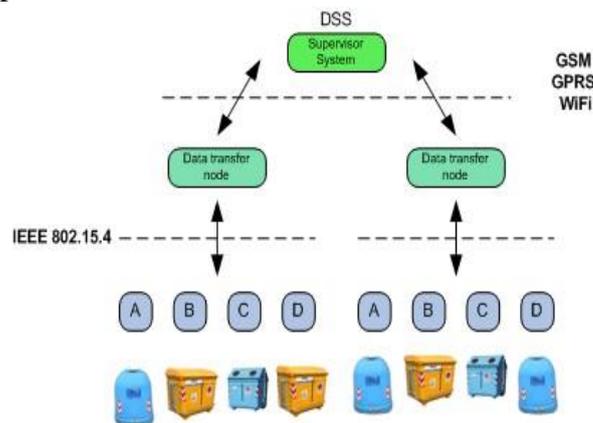


Figure 15 : architecture de gestion des déchets solides utilisant les technologies des capteurs sans fil

En 2018, un système de surveillance des ordures basé sur l'internet des objets est proposé par le groupe Naman Sharma et all [35] dont l'objectif est de mettre en place un système de surveillance des déchets basés sur des technologies de l'informations. Dans ce travail ces

auteurs nous décrivent une poubelle intelligente à l'aide d'un Arduino nano qui est interfacé avec un capteur ultrason utilisé pour identifier le niveau de déchet, un LoLin NodeMCU (module Wifi ESP8866) et un capteur de flamme pour des raisons de sécurité. Ces derniers sont interfacés avec une application mobile par le biais d'un serveur Web. Ce système contrôle les poubelles et informe sur le niveau de déchet rassemblé dans les corbeilles. Ce système proposé contrôle également la zone des poubelles afin de localiser le chemin idéal en utilisant l'API de Google qui utilise qui fournis au véhicule spécialisé dans les déchets le chemin optimal.

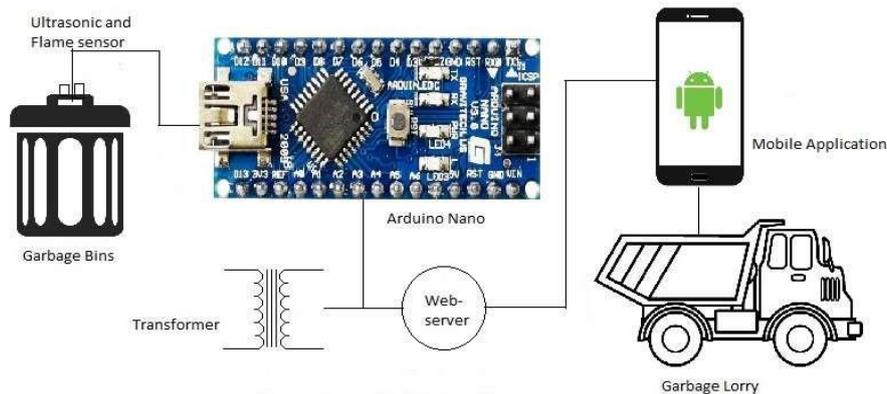


Figure 16 : Architecture du système de surveillance des ordures basé sur l'IoT

Pour la gestion de la collecte des déchets basée sur l'internet des objets pour les villes intelligentes, les auteurs comme (Chaudhary, Patil et Raut, 2019)[36] ont proposé une poubelle intelligente construite sur une plateforme à microcontrôleur Raspberry pi qui est interfacée avec un modem GSM pour la communication mobile et un capteur à ultrason placé au sommet de la poubelle pour lire son état, ainsi qu'un capteur de charge placé au bas de la poubelle est utilisé pour calculer le poids des bacs. Le raspberry est programmé de telle sorte que lorsque la corbeille est remplie la hauteur restante à la hauteur limite est affichée. Ce système garantit le nettoyage dès que les déchets atteignent le seuil, le capteur ultrason déclenche le modem GSM qui avertit en permanence l'expert requis jusqu'à ce que les déchets de la poubelle soient écrasés. Si la poubelle n'est pas nettoyée dans un délai donné le rapport est envoyé à l'autorité supérieure qui peut prendre des mesures appropriées contre le collecteur concerné.

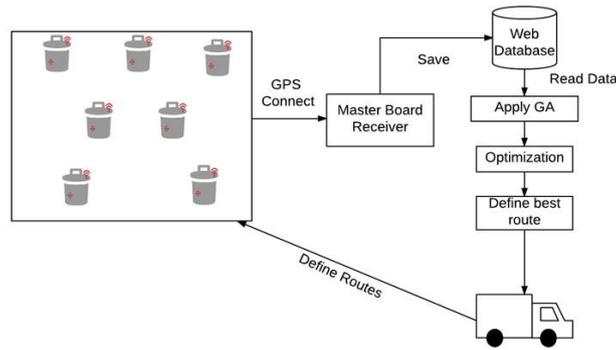


Figure 17 : la gestion de la collecte des déchets basé sur IoT pour les villes intelligentes

Selon Aniqqa Bano, Ikram Ud Din et Asma A. Al-Huqaïl [37] des inondations de déchets solides dans les poubelles sont constatées en 2020. Déchets solides la gestion est un aspect central des systèmes traditionnels et elle devient dangereuse dans les zones les plus peuplées. Travaux pénibles et des coûts sont nécessaires pour gérer et surveiller les poubelles en temps réel. Pour maintenir la propreté d'une ville et une surveillance en temps réel des poubelles, un mécanisme de poubelle intelligente (SBM) pour les villes intelligentes est proposé par ces auteurs dans cet article, qui est basé sur Internet des objets.

Le SBM travaille sur le concept des 3R, c'est-à-dire Réduire, Recycler et Réutiliser. Le SBM a l'accès pour obtenir des informations en temps réel sur chaque bac et éviter la surcharge de ces bacs. Le cadre proposé réduit le coût du travail et gain de temps et d'énergie du système. Il réduit également le taux d'infections par des maladies en gardant les villes propres. La logique floue est utilisée pour prise de décision dans le choix des emplacements appropriés dans les villes pour installer des poubelles. Le Framework est implémenté dans l'environnement de modélisation multi-agents, c'est-à-dire Net Logo.

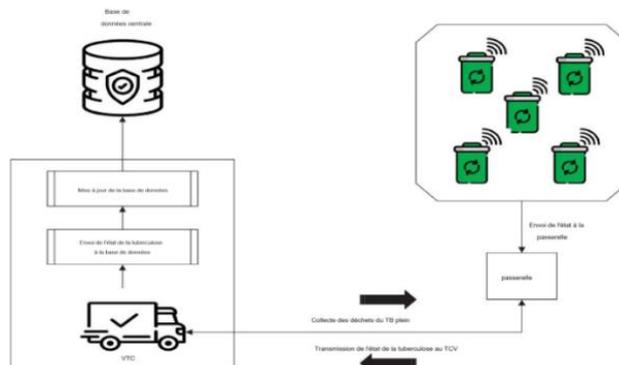


Figure 18: mécanisme de poubelle intelligente (SBM) pour les villes intelligentes

Un « collecteur de déchets intelligent basé sur l'IoT » est proposé par MN Rajaprabha, P Jayalakshmi, R Vijay Anand et N Asha en 2018 [38] pour éviter la pollution de l'air et d'eau.

Dans cet article, l'auteur propose un collecteur de déchets qui utilise des technologies telles que l'IoT et le stockage en nuage pour une gestion efficace des déchets solides dans les villes intelligentes. Le modèle de travail proposé par Rajaprabha et al fonctionne ainsi Les déchets déposés dans la poubelle sont classés en déchets secs et humides à l'aide du capteur d'humidité DHT11. Après avoir identifié le type de déchets, le servomoteur MG995 sont démarrés dans le sens horaire / antihoraire pour déposer les déchets dans le sous-bac approprié. Le mouvement angulaire précis requis par le servomoteur est de 100° dans le sens des aiguilles d'une montre pour incliner les déchets dans la poubelle humide et 100° dans le sens inverse des aiguilles d'une montre pour la poubelle sèche. Une fois le bac Une fois rempli de déchets, le capteur IR détecte le niveau et active le module GPS. Le module GPS à son tour communique automatiquement avec Cloud Server via le module WiFi ESP8266 pour notifier son emplacement actuel pour la collecte des déchets.

Les données envoyées par la poubelle intelligente sont stockées dans le cloud et sont accessibles depuis n'importe où via Internet. Les données détectées en continu à partir des poubelles sont stockées dans le serveur cloud et peut être utilisé à la fois par les autorités de gestion des déchets telles que les municipalités, les entreprises, etc., ainsi que par les chauffeurs de camion de collecte des ordures.



Figure 19 : Architecture d'un collecteur de déchets intelligent basé sur l'IoT

Le groupe Abdullah et al trouve en 2018 que les services intelligents peuvent jouer le rôle de première ligne pour obtenir des informations sur tous les aspects des activités humaines. Un exemple typique de service fourni par les villes intelligentes est la gestion des déchets prise en charge par l'IoT. La gestion des déchets implique différentes responsabilités, telles que la collecte, l'élimination et la valorisation des déchets dans les installations concernées. Un examen des modèles courants de gestion des déchets est présenté dans cet article. Ensuite, une

gestion renforcée des déchets conception est proposée. Cette conception tient compte et traite de la population et de l'urbanisme croissance en utilisant différentes tailles de camions en fonction du type de déchets et des appareils IoT qui facilitent la communication entre les entités du système, telles que les poubelles intelligentes, les déchets les zones sources, les camions de collecte des déchets et les centres de gestion des déchets. L'architecture du système proposé consiste en des ressources de déchets pour résoudre et gérer divers problèmes de déchets. Les poubelles intelligentes sont utilisées pour améliorer la collecte des déchets et fournir des informations pour l'analyse statistique, les camions de collecte des déchets sont utilisés pour améliorer le transport des déchets collectés et les centres de gestion des déchets sont utilisés pour l'analyse des données et la prise de décision.

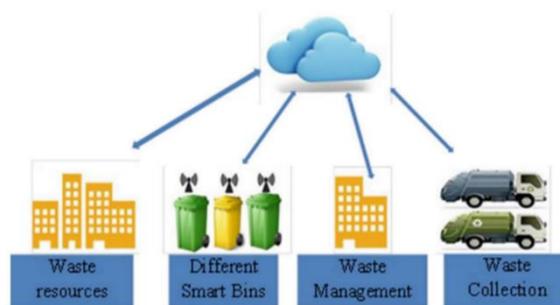


Figure 20 : Architecture du système de gestion des déchets

D'après la littérature étudiée aucune des méthodes actuelles de gestion intelligente des déchets ne discute de la nécessité d'utilisation de deux technologies de réseau de communication pour gérer efficacement les déchets pour contribuer dans une ville. Par conséquent, ce travail propose une solution novatrice adéquat avec l'environnement et la société sénégalaise. Nous avons noté que la réalisation d'une poubelle intelligente n'est pas la seule clé pour une bonne gestion des déchets.

II. Présentation de notre solution

La pollution de notre environnement augmente de plus en plus, en grande partie à cause de la mauvaise gestion des déchets au Sénégal. Jusqu'à présent, cette gestion s'est faite de manière traditionnelle, avec des camions de collecte des déchets qui passent à des horaires prédéterminés pour recueillir les ordures et les transporter vers des centres de recyclage. Toutefois, ces sociétés de collecte ont du mal à suivre le rythme de remplissage des poubelles et à déterminer quand les nettoyer ou si elles sont pleines ou non. Les problèmes les plus importants de notre époque sont la prévention, le suivi et le traitement de ces déchets.

La méthode conventionnelle d'inspection manuelle des déchets au Sénégal est une procédure chronophage qui nécessite une intervention humaine, du temps et de l'argent, ce qui pourrait être optimisé avec la technologie de l'internet des objets. Au-delà des études liées à la gestion des déchets au Sénégal, les travaux relatifs et nos recherches dans ce domaine ont montré que plusieurs systèmes de surveillance à distance basés sur les nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) ont été développés et déployés pour répondre aux éliminations susmentionnées des systèmes de gestion des déchets conventionnels. Pour suivre le niveau de remplissage des poubelles, certains des systèmes de surveillance utilisent les réseaux sans fil à courte portée, tandis que d'autres proposent des systèmes intelligents de surveillance des corbeilles qui utilisent des réseaux à longue portée.

Ces constatations amènent à se poser la question suivante : comment déployer un système de surveillance des poubelles qui puisse utiliser les réseaux de communication disponibles pour les Sénégalais ?

Étant donné que la plupart des maisons des villes disposent d'une connexion Wi-Fi, il semble judicieux d'adopter une solution basée sur le réseau de communication Wi-Fi pour surveiller les poubelles des maisons. Cela minimisera les coûts d'infrastructure supplémentaires liés à l'adaptation ou au déploiement d'une nouvelle infrastructure. Toutefois, étant donné que le Wi-Fi est un réseau de courte portée et à haute consommation d'énergie, il n'est pas conseillé de l'utiliser pour connecter les poubelles des lieux publics.

Notre projet s'applique à l'échelle d'une ville, ce qui signifie que nous avons accordé une grande importance à la portée de notre solution. Bien que Sigfox soit un choix populaire en termes de portée, nous avons choisi le réseau Lora pour sa latence réduite, une portée acceptable. Ainsi, pour les poubelles publiques, il est préférable d'utiliser les réseaux à longue portée et à faible consommation d'énergie (LoRa).

Pour répondre à la question précédente, il est donc nécessaire de proposer une solution intelligente de collecte de déchets basée sur les technologies de l'Internet des objets. Cette solution nécessite deux types de liens dans le réseau : une liaison longue portée LoRa entre les poubelles publiques et la passerelle (gateway), et une liaison courte portée (Wi-Fi) pour les poubelles des maisons et la passerelle.

Une telle solution permettra de minimiser les coûts de déploiement du système, mettre fin le débordement des poubelles, le désordre ou la mauvaise gestion de la collecte des ordures, etc. De plus, cette solution permettra d'optimiser l'itinéraire de collecte des déchets, évitant ainsi à l'éboueur de suivre un itinéraire fixe dans les rues tous les jours selon un programme prédéfini, sans savoir si la poubelle est pleine ou non.

II.1. Architecture et Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET

L'architecture et l'algorithme déterminent comment *Sénégal SET* fonctionne et comment il est conçu pour atteindre ses objectifs.

II.1.1. Architecture de Sénégal SET

Nous proposons un système de gestion intelligente des déchets basée sur IoT pour les villes intelligentes, afin d'organiser la collecte des ordures.

Il s'agit ici d'établir un système de communication matérielle et logicielle entre les différentes parties prenantes. Cette communication peut s'identifier en plusieurs étapes.

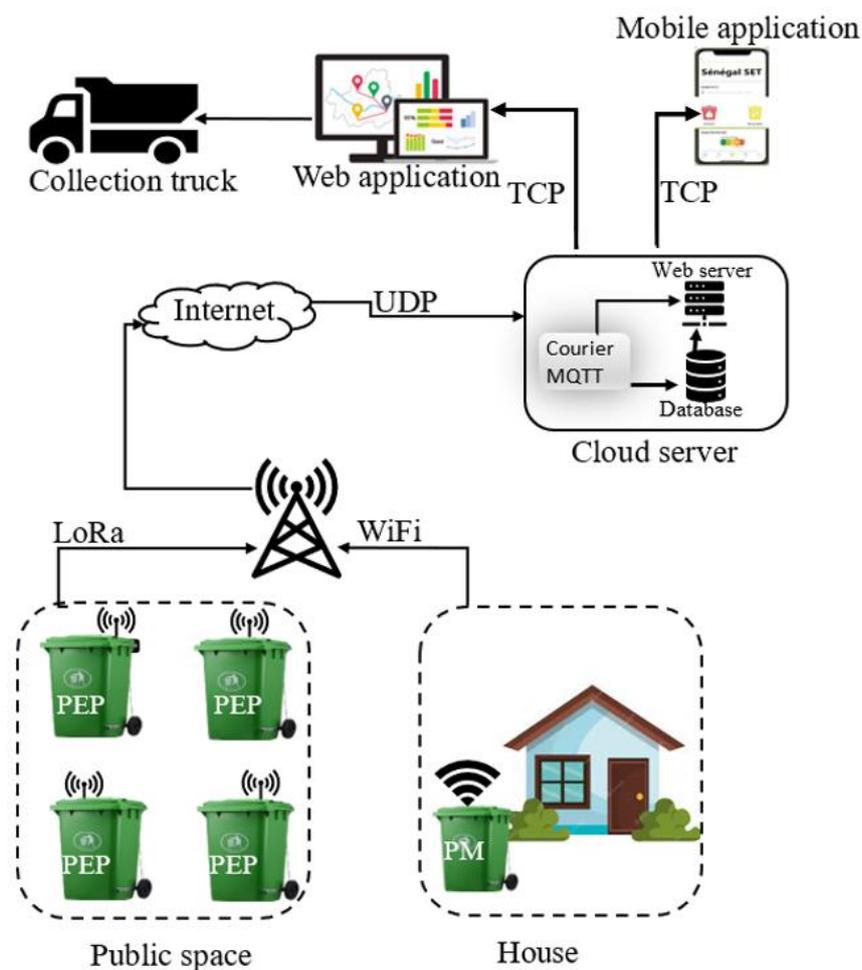


Figure 21 : Architecture matérielle de Sénégal SET

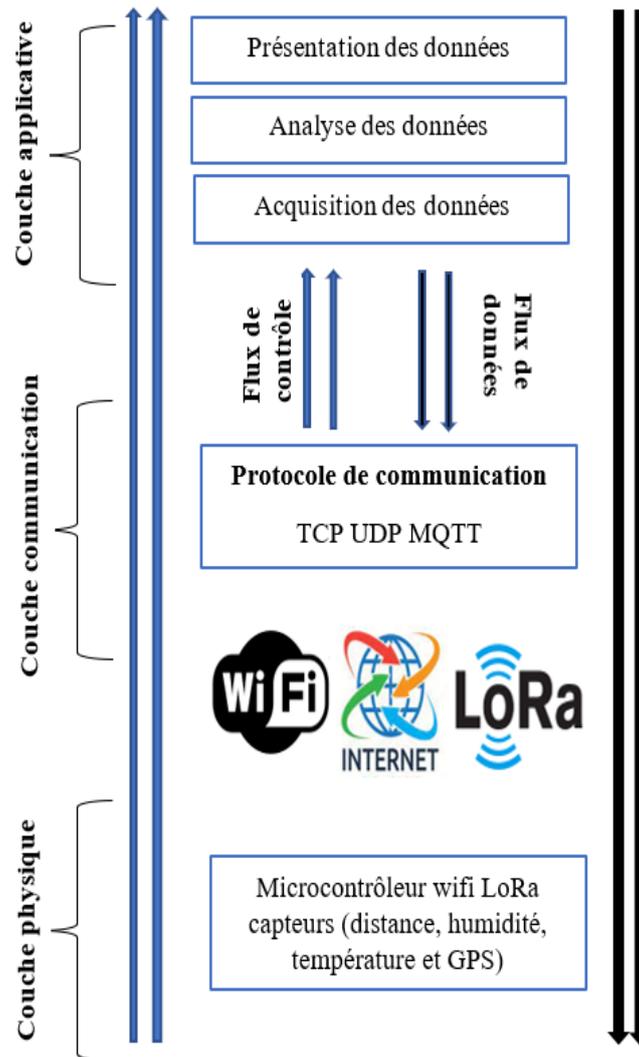


Figure 22 : Architecture logicielle

II.1.2. Description de l'architecture

La façon dont les différents composants de notre système sont organisés et interagissent les uns avec les autres est décrite ci-dessous.

A. Poubelle connectée

La couche physique est constituée des poubelles connectées avec ses coordonnées GPS équipées de capteurs pour mesurer les informations telle que le niveau de remplissage, la température, l'humidité et de dispositifs de communication (Wi-Fi ou Lora) pour transmettre les données.

B. Le réseau de communication du système

La couche de communication est utilisée ici pour que les dispositifs poubelles puissent communiquer avec la couche supérieure. Dans notre système nous allons utiliser un réseau de communication hybride (Lora et Wifi) [39].

C. La passerelle

Un dispositif de passerelle peut être considérée comme un agrégateur de données pour relayer les données des poubelles connectées vers le serveur [40].

D. Le cloud

Le serveur cloud utilisé comme serveur web et de base de données dans le but de collecter, traiter, stocker et analyser les données de remplissage d'humidité de température et les informations sur l'emplacement transmises par les poubelles connectées. La couche de nuage permet une centralisation des données pour une analyse plus efficace, un stockage et une meilleure prise de décision sur le chemin de collecte [41]. Dans cette couche nous allons adopter de mesures de sécurité appropriées pour garantir la sécurité des données et de protéger les systèmes et les données sensibles contre les menaces de sécurité.

E. L'application Web

L'application Web inclut l'interface de visualisation pour les responsables de la gestion des déchets, qui permet de visualiser le statut des poubelles et de planifier des tournées d'évacuation en conséquence.

F. L'application mobile

L'application mobile est utilisée par les résidents de la ville pour les résidents, qui peuvent accéder à l'emplacement des poubelles publiques les plus proches lorsque leur poubelle de maison est pleine. Le résident sera notifié du jour et de l'itinéraire de collecte par son application.

II.2. Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET

La figure 23, décrit les étapes précises que Sénégal SET suit pour accomplir une tâche particulière. Le système de gestion des déchets que nous proposons fonctionne ainsi

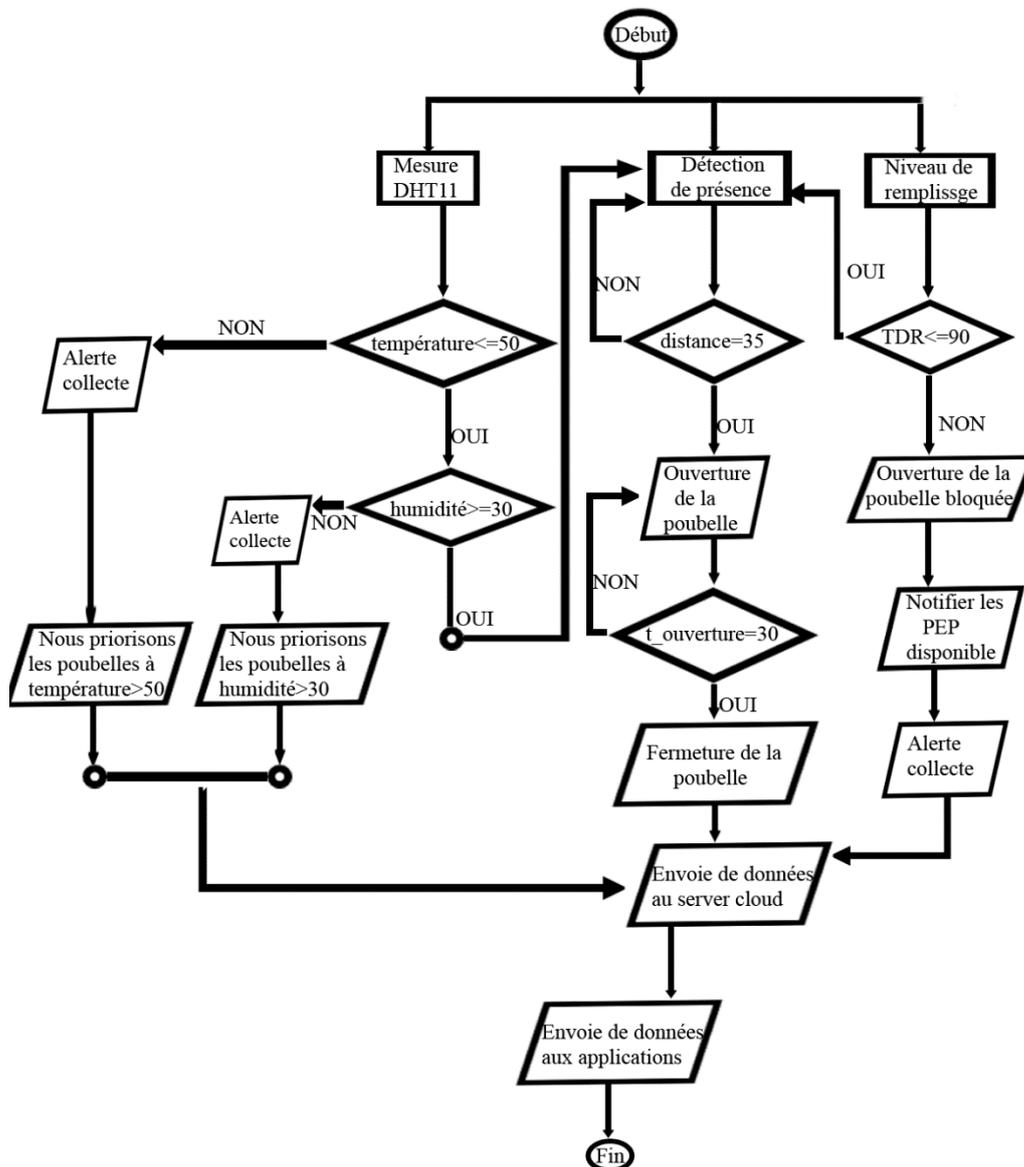


Figure 23 : Algorithme de fonctionnement de Sénégal SET

L'algorithme ci-dessus peut être utilisé pour le fonctionnement de notre système de gestion intelligente des déchets :

Les poubelles sont en mode veille jusqu'à ce qu'un utilisateur s'approche à moins de 35 cm, ce qui déclenche l'ouverture automatique du couvercle. Celui-ci reste ouvert pendant 30 secondes avant de se refermer automatiquement. Les données relatives au niveau de remplissage, à la température et à l'humidité sont alors envoyées au serveur cloud.

Avant de procéder à une nouvelle ouverture de la poubelle, nous vérifions d'abord le niveau de remplissage. Si celui-ci est inférieur au seuil défini, nous vérifions ensuite la température. Si

cette dernière est normale, nous vérifions enfin l'humidité. Si tous les critères sont satisfaits, l'ouverture est autorisée.

Après fermeture le statut de la poubelle (taux de remplissage, température et humidité) est transmis au serveur cloud avant d'être visualisé par les applications.

Si toutefois une poubelle à domicile l'une de ces conditions n'est pas réunie, l'ouverture de cette dernière est bloquée. S'il s'agit d'une PM le système informe le résident par le biais d'une notification sur son application mobile les poubelles publiques les plus proches de chez lui. En fin le système planifie la collecte avec une génération du plus court chemin.

III. Optimisation d'itinéraires de collectes

Dans cette solution des itinéraires plus efficaces et économes en temps et en carburant ont été planifiés en fonction de l'état des poubelles dans une zone lors de la préparation de collecte. De cette façon les visites inutiles sont évitées et les ressources ne sont pas gaspillées. Un scénario illustratif est présenté dans la figure 24 ci-dessous, qui montre l'optimisation de l'itinéraire du véhicule de collecte des déchets basée sur la surveillance en temps réel du niveau des ordures dans chaque site de collecte des déchets de la ville.

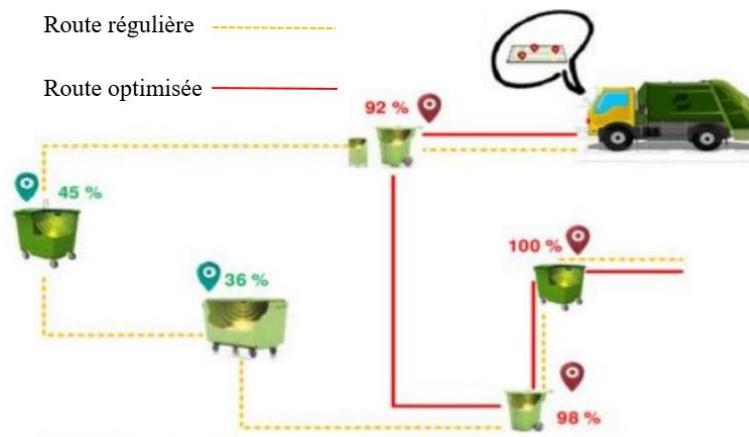


Figure 24 : Schéma d'optimisation de l'itinéraire de collecte

Si le véhicule devait suivre la feuille de route conventionnelle, alors certaines poubelles partiellement remplies seraient nettoyées en premier tandis que les poubelles entièrement remplies pourraient être nettoyées plus tard.

Ce retard de nettoyage de poubelle rempli créera un problème de débordement des poubelles et entraînera donc une condition insalubre dans les maisons et de manière générale dans les villes. Au lieu de cela, le chauffeur du camion peut être guidé via une application, qui montre la priorité d'une poubelle sur l'autre à l'aide des données stockées dans le cloud.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les travaux connexes d'un système de gestion intelligente des déchets, une architecture complète qui inclut les couches de dispositifs, de communication interne, de nuage, de communication externe et d'application utilisateur. Cette architecture est conçue pour faciliter et optimiser la collecte et le traitement en temps réel des données de remplissage des poubelles, ainsi que pour informer les utilisateurs sur le statut des poubelles et leur permettre de planifier les itinéraires pour les vider.

Nous avons également proposé d'un algorithme de fonctionnement simple mais efficace pour ce système de gestion des déchets. Cet algorithme inclut les étapes de collecte de données, de transmission, de mise à jour en temps réel et de planification des itinéraires pour les camions de ramassage des déchets.

Enfin, nous avons souligné l'optimisation d'itinéraire de collecte pour ce système afin d'éviter les visites inutiles et le gaspillage de ressources.

En Définitif, ce chapitre nous a permis de faire le poids entre ce que la littérature scientifique a proposé par rapport aux besoins réels de la population sénégalaise, ce qui justifie une telle solution.

Des études de conception et de réalisation sont faites à la suite de cette contribution.

DEUXIEME PARTIE

CONCEPTION ET REALISATION DE SENEGAL SET

Chapitre 1 : Conception de Sénégal SET

La conception de ce projet est la phase précoce au cours de laquelle sont planifiés les principales caractéristiques, la structure, les critères de réussite et les principaux produits livrables du projet. L'objectif est de développer une conception qui peut être utilisée pour atteindre les objectifs souhaités du projet.

Le présent chapitre indique la manière dont la recherche est effectuée c'est-à-dire la stratégie qui a permis d'élaborer, de planifier, de recueillir, de traiter et d'analyser les informations théoriques et empiriques sur la gestion des déchets au Sénégal.

I. La méthodologie utilisée

Toute recherche ou étude qui se veut scientifique s'effectue selon une méthodologie bien définie. Ainsi, les chercheurs en informatique utilisent des méthodes et des techniques spécifiques pour mener des recherches, élaborer des théories et valider des études empiriques ou les invalider. Toutefois, les méthodes et les techniques diffèrent selon la discipline, la spécialité, l'environnement, les objectifs de l'étude et les résultats attendus. La méthodologie est une étude systématique, par observation de la pratique scientifique, des principes qui la fondent et des méthodes de recherche utilisées.

Le projet implique la surveillance et la collecte des déchets solides des poubelles placées à différents endroits dans une zone géographique particulière. La mise en œuvre de ce projet se fera à travers les activités suivantes au-delà des revus de la bibliographie :

- ✓ Le déploiement d'un réseau de communication
- ✓ La conception d'un prototype matériel d'une poubelle intelligente pour indiquer le niveau de déchet dans les poubelles et d'autre informations utiles à l'étude.
- ✓ Le développement d'applications web/ mobile
- ✓ La génération et affichage du chemin dynamique le plus court
- ✓ La collecte des déchets

II. Analyse et spécification des besoins fonctionnels de Sénégal SET

Les besoins fonctionnels définissent les tâches que les utilisateurs s'attendent à voir fournir Sénégal Set. Pour mieux concevoir notre système nous avons besoin d'utiliser un diagramme

des cas d'utilisations qui permet de spécifier les fonctionnalités de notre système et leur interaction avec les utilisateurs.

II.1. Identification des acteurs

Nous avons fait ressortir les types d'acteurs qui vont agir sur notre système et le rôle de chacun d'eux vis-à-vis de Sénégal SET.

Administrateur : L'administrateur est l'acteur responsable de tous les privilèges d'accès. Il contrôle le système en modifiant, configurant, consultant, maintenant, vérifiant et prenant des décisions liées au système et au travail. L'administrateur autorise les utilisateurs à effectuer leurs tâches, ainsi qu'à traiter et mettre à jour la base de données pour effectuer plusieurs tâches, telles que la gestion des profils et le suivi de leur travail à travers les statistiques, entre autres.

Citoyens : Ce sont les producteurs de déchets, la tâche et le travail de cet acteur pour ce projet, une intervention immédiate dans le cas de recevoir les mises à jour contenant des informations relatives à l'état de la poubelle et les itinéraires de collecte à travers une application Smartphone.

La société de collecte : C'est la mairie ou l'organisation ou l'agence qui assure la collecte et le transport des déchets. La tâche et le travail de cet acteur pour ce projet, sont l'intervention immédiate dans le cas de recevoir une alerte de collecte provenant de l'administrateur à travers une application web.

Objet connecté : En programmant cet acteur pour se connecter à une application depuis un ordinateur ou un smartphone, nous pouvons le contrôler et communiquer avec lui via Internet, ainsi qu'identifier et traiter différentes données.

II.2. Diagramme de cas d'utilisation

Un diagramme de cas d'utilisation est un outil de modélisation graphique utilisé dans l'analyse et la conception de logiciels et de systèmes informatiques. Il permet de représenter les interactions entre les acteurs (utilisateurs) et le système, en décrivant les différentes fonctionnalités et les scénarios d'utilisation.

Nous allons représenter la fonction du système à travers un diagramme de cas d'utilisation (figure 25).

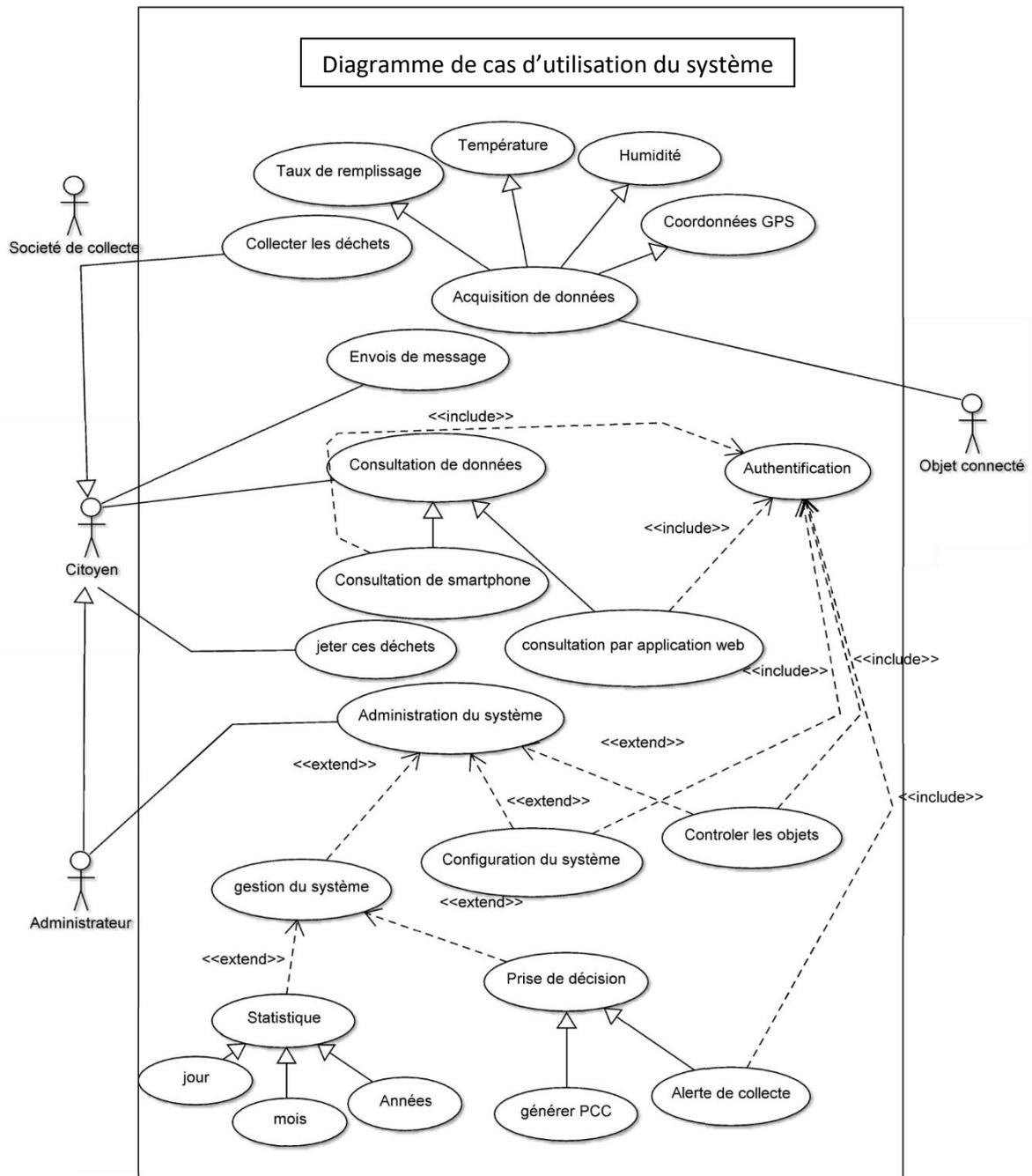


Figure 25 : Cas d'utilisation générale du système

II.2. Cas d'utilisation détaillé

Nous allons détailler le système, à travers les diagrammes et les tableaux contenant une fiche descriptive du cas d'utilisation

II.2.1. Diagramme de cas d'utilisation d'Acquisition des données

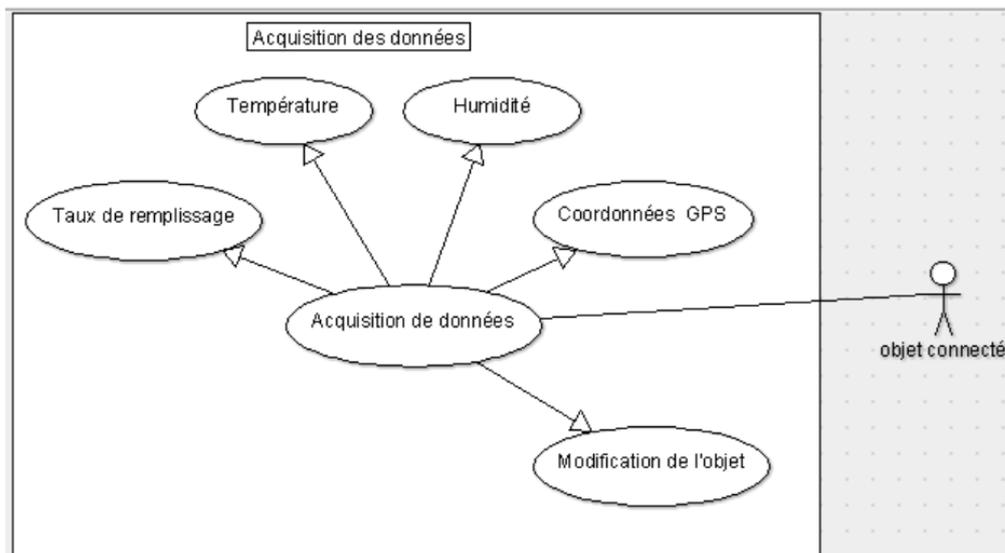


Figure 26 : Diagramme de cas d'utilisation d'Acquisition des données

- Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Acquisition des données

Cas d'utilisation	Acquisition des données
Acteur primaire	Objet connecté
Objectifs	Permettre aux capteurs d'acquérir les données relatives à l'état des poubelles et de les envoyer au système de gestion.
Précondition	Les capteurs doivent être installés dans les poubelles et connectés au système de gestion.
Postcondition	Les données collectées par les capteurs sont stockées dans le système de gestion et peuvent être consultées par l'utilisateur. Exceptions : Si les capteurs ne parviennent pas à collecter les données en raison d'un dysfonctionnement, le système de gestion peut envoyer une notification pour alerter la société de collecte.

Scénario nominale	<p>Les capteurs installés dans les poubelles collectent des données sur l'état de la poubelle, y compris la température, l'humidité et le niveau de remplissage et ces coordonnées GPS.</p> <p>Les capteurs envoient les données collectées au système de gestion via une connexion sans fil.</p> <p>Les données sont stockées dans une base de données pour permettre une consultation ultérieure.</p> <p>Le système de gestion analyse les données pour détecter des anomalies ou des seuils critiques atteints.</p> <p>Si un seuil critique est atteint, le système de gestion envoie une notification à la société de collecte pour lui permettre de prendre des mesures nécessaires.</p>
--------------------------	---

Tableau 2 : Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Acquisition des données

II.2.2. Diagramme de cas d'utilisation de Consultation des données

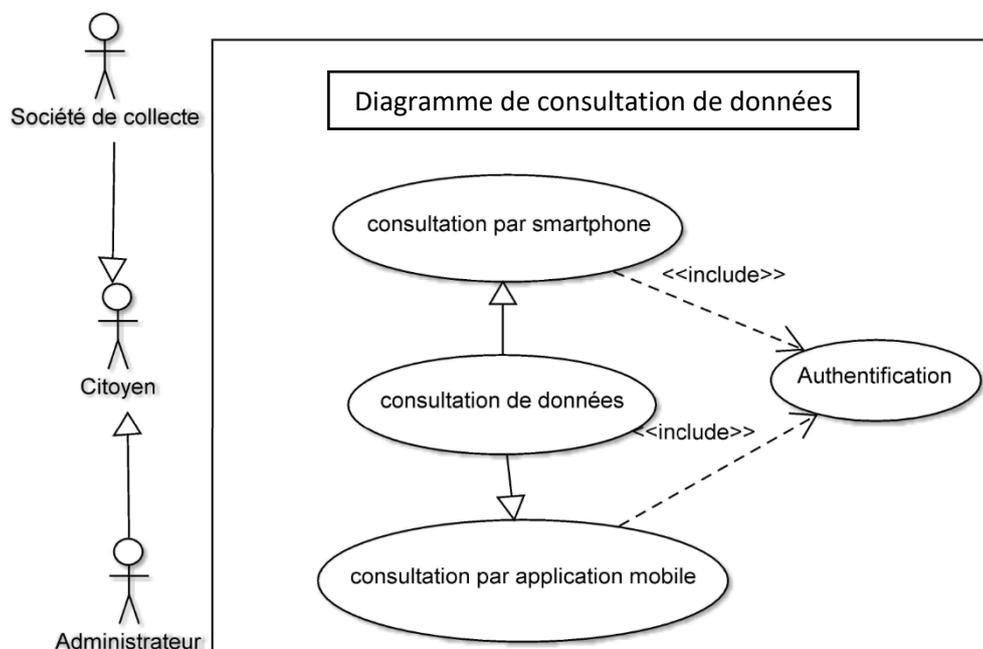


Figure 27 : Diagramme de cas d'utilisation de Consultation des données

- Fiche descriptive du cas d'utilisation de Consultation des données

Cas d'utilisation	Consultation des données
Acteurs	Administrateur, Citoyen, Société de collecte et objet
Objectifs	Permettre à l'utilisateur du système de consulter les données collectées par les capteurs pour suivre le statut des poubelles
Précondition	L'utilisateur doit être authentifié et avoir les droits de consultation des données
Postcondition	<p>L'utilisateur a consulté les données collectées par les capteurs et a une vue précise de l'état des poubelles dans le système.</p> <p>Exceptions :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si l'utilisateur ne parvient pas à se connecter à l'interface de consultation des données, un message d'erreur s'affiche et l'utilisateur doit vérifier ses identifiants et mots de passe. • Si le système rencontre des problèmes techniques, l'utilisateur peut contacter l'assistance technique pour résoudre les problèmes.
Scénario nominale	<p>L'utilisateur se connecte à l'interface de consultation des données du système à l'aide de ses identifiants et mots de passe.</p> <p>L'utilisateur accède à la page d'accueil de l'interface de consultation des données et voit les différentes options disponibles pour consulter les données.</p> <p>L'utilisateur peut voir les poubelles enregistrées dans le système et peut sélectionner une poubelle pour voir les données collectées par les capteurs.</p>

	<p>L'utilisateur peut voir l'état actuel de la poubelle, y compris la température, l'humidité et le niveau de remplissage.</p> <p>L'utilisateur peut consulter l'historique des données collectées pour suivre l'évolution de l'état de la poubelle.</p> <p>L'utilisateur peut configurer des notifications pour être informé lorsque la poubelle atteint un certain seuil de température, d'humidité ou de niveau de remplissage.</p> <p>L'utilisateur peut exporter les données collectées pour une poubelle spécifique ou pour l'ensemble du système sous forme de rapport.</p>
--	--

Tableau 3: Fiche descriptive du cas d'utilisation de Consultation des données

II.2.3. Diagramme de cas d'utilisation d'administration le système

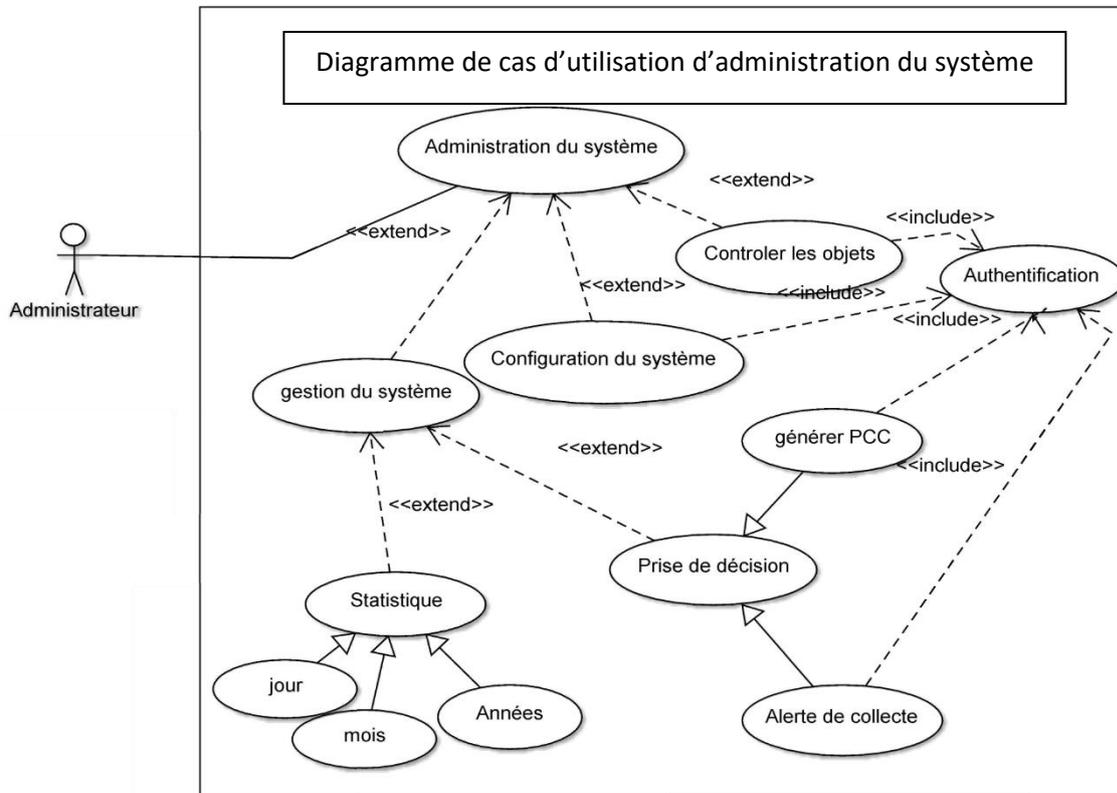


Figure 28 : Diagramme de cas d'utilisation d'administration le système

✓ Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Administration du système

Cas d'utilisation	Administration du système
Acteur primaire	Administrateur
Objectifs	Permettre à l'utilisateur du système de gérer et de configurer le système
Préconditions	L'administrateur doit être authentifié et avoir les droits d'administration du système
Postcondition	Les configurations effectuées par l'administrateur sont enregistrées et prennent effet immédiatement
Scénario nominale	<p>L'administrateur se connecte à l'interface d'administration du système à l'aide de ses identifiants et mots de passe.</p> <p>L'administrateur accède à la page d'accueil de l'interface d'administration et voit les différentes options disponibles pour gérer le système.</p> <p>L'administrateur peut ajouter, modifier ou supprimer des poubelles, des camions de collecte de déchets, des drones ou tout autre système utilisé pour la collecte des déchets.</p> <p>L'administrateur peut configurer les seuils de température, d'humidité et de niveau de remplissage des poubelles pour déclencher les notifications de collecte.</p> <p>L'administrateur peut configurer les horaires de collecte de déchets et les routes de collecte pour optimiser l'efficacité de la collecte.</p> <p>L'administrateur peut accéder aux données collectées par les capteurs et les analyser pour améliorer les opérations de collecte de déchets.</p>

	<p>L'administrateur peut générer des rapports de performance pour surveiller l'efficacité du système de gestion des déchets.</p> <p>L'administrateur peut effectuer des mises à jour logicielles et des maintenances pour assurer le bon fonctionnement du système.</p>
--	---

Tableau 4: Fiche descriptive du cas d'utilisation d'Administration du système

II.3. Diagramme de séquence de quelques cas d'utilisations de notre système

Un diagramme de séquence est un type de diagramme de modélisation UML (Unified Modeling Language) utilisé pour représenter les interactions entre les objets ou les éléments d'un système dans le temps. Il décrit les séquences d'actions qui se produisent entre différents acteurs et composants du système.

II.3.1. Diagramme de séquence du cas d'utilisation acquisition de données

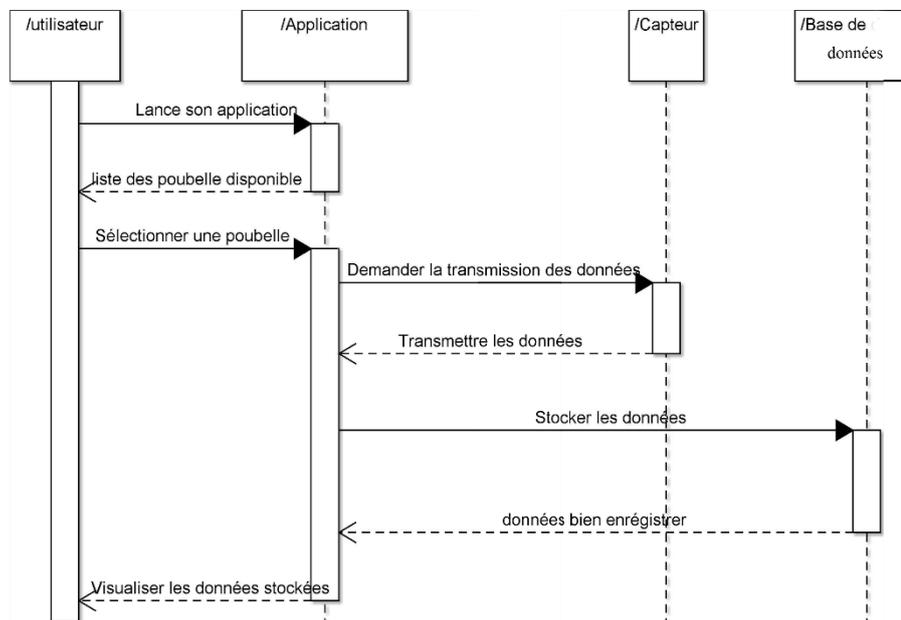


Figure 29: Diagramme de séquence du cas d'utilisation acquisition de données

Ce diagramme de séquence illustre le scénario principal du cas d'utilisation « Acquisition de données », où l'utilisateur (citoyen ou la municipalité) lance l'application, sélectionne une

poubelle, et récupère les données transmises par le capteur. Les données sont ensuite stockées dans une base de données, et l'utilisateur peut les visualiser à tout moment.

II.3.2. Diagramme de séquence du cas d'utilisation consultation de données

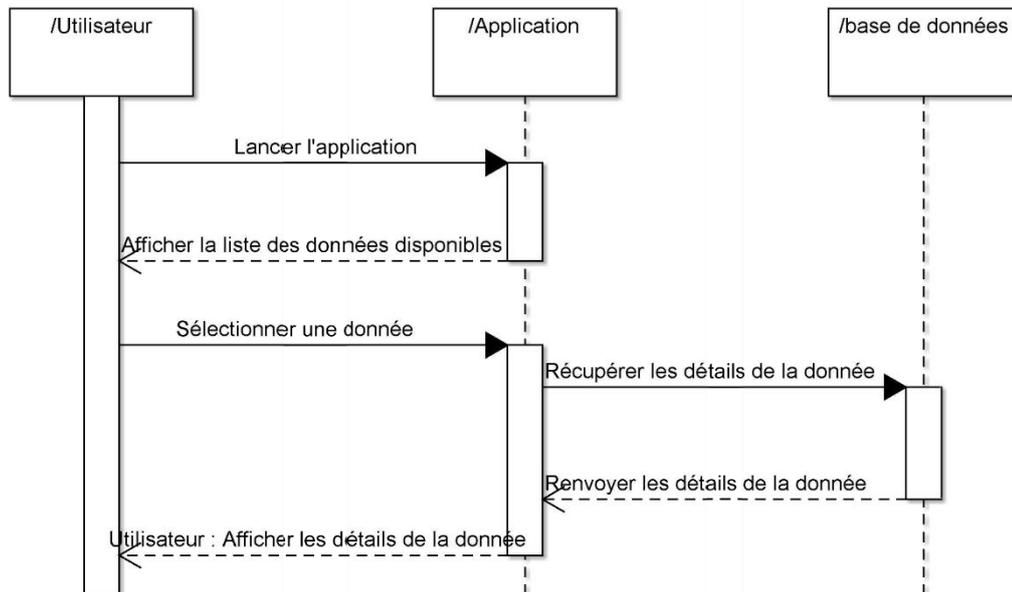


Figure 30: Diagramme de séquence du cas d'utilisation consultation de données

Ce diagramme de séquence illustre le scénario principal du cas d'utilisation "Consultation de données", où l'utilisateur lance l'application, sélectionne une donnée à partir de la liste et peut ensuite visualiser et utiliser les détails de cette donnée. Les détails de la donnée sont récupérés à partir d'une base de données et affichés à l'utilisateur.

III. Conception générale du système

La conception générale d'un système de gestion intelligente des déchets basé sur l'IoT comprend des matériels et des logiciels. Ces composants sont tous interconnectés pour permettre une surveillance et une gestion efficaces des opérations de collecte de déchets.

III.1. Diagramme de classe

Un diagramme de classe est un type de diagramme UML qui décrit la structure d'un système en utilisant des classes, des attributs, des méthodes et des relations entre ces éléments. Les classes représentent des concepts ou des objets du système, et les attributs et les méthodes possèdent les propriétés et les comportements de ces classes.

III.2.1. L'architecture de notre réseau de communication

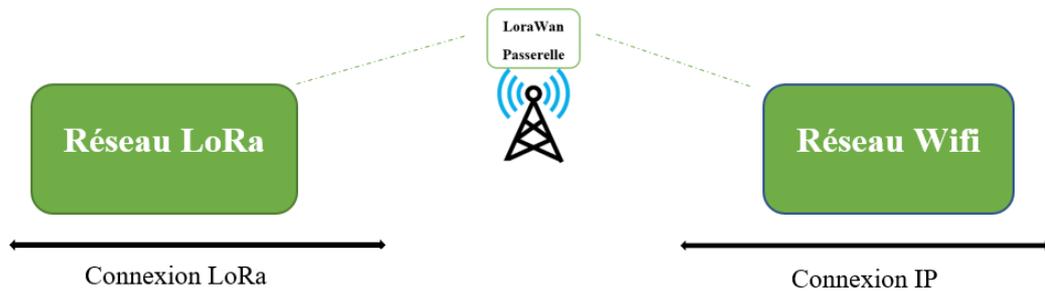


Figure 32: architecture de notre réseau de communication

Le réseau LoRa utilise le protocole LoRaWAN pour envoyer et recevoir des données des capteurs LoRa [42], Le réseau wifi quant à lui est réglementé par la norme spécifique : l'IEEE 802.11 qui s'applique au niveau international [43]. L'architecture que nous utilisons ici est une architecture de réseau centralisée : Cette architecture consiste en un Gateway Lora central qui est connecté à un serveur de gestion de réseau. Ce Gateway Lora peut être connecté à des routeurs Wi-Fi pour offrir une couverture supplémentaire et une bande passante accrue. Les appareils connectés (tels que les capteurs Lora) communiquent avec le Gateway Lora central via des communications Lora, tandis que les appareils connectés Wi-Fi communiquent avec le routeur Wi-Fi local. Les données collectées sont envoyées au serveur pour la gestion et le traitement. En utilisant une passerelle LoRaWAN pour relayer les données du réseau wifi et lora, la société de collecte peut bénéficier d'une connectivité à longue portée et économiser de l'énergie tout en améliorant l'efficacité de la collecte de données.

III.2.2. Réseau Lora [13]

Le réseau Lora utilise le protocole Lora WAN (Long Range Wide Area Network) pour envoyer les données. Il s'agit d'un protocole de réseau dédié aux communications à longue portée, basé sur la norme IEEE 802.15.4g. Ce protocole est conçu pour permettre une communication à longue distance (jusqu'à 15 km en campagne et 2 à 3 km en ville) avec une faible consommation d'énergie. Il offre des débits de données relativement faibles (quelques centaines de bits par seconde à quelques kilobits par seconde) mais suffisamment pour des applications IoT de types capteurs, compteurs ou autres.

Il est important de noter que LoRaWAN est un protocole propriétaire et que pour utiliser un réseau LoRa, il est nécessaire de s'inscrire auprès d'un fournisseur de réseau Lora qui assurera la gestion et la maintenance du réseau.

III.2.3. Réseau Wifi

Les réseaux Wifi utilisent principalement le protocole IEEE 802.11 pour envoyer les données. Il s'agit d'un ensemble de normes qui définissent les protocoles pour les réseaux locaux sans fil (WLAN) basés sur les technologies radio. Il existe plusieurs versions de ce protocole, chacune avec des caractéristiques différentes en termes de débits de données, de bande passante, de sécurité, etc. Les versions les plus couramment utilisées sont [44] :

IEEE 802.11b : permet des débits de données allant jusqu'à 11 Mbps sur la bande de fréquence 2,4GHz.

IEEE 802.11g : permet des débits de données allant jusqu'à 54 Mbps sur la bande de fréquence 2,4 GHz.

IEEE 802.11n : permet des débits de données allant jusqu'à 600 Mbps sur les bandes de fréquence 2,4 et 5 GHz, avec une meilleure couverture et une meilleure résistance aux interférences.

IEEE 802.11ac : permet des débits de données allant jusqu'à 1 Gbps sur la bande de fréquence 5 GHz, avec une meilleure couverture et une meilleure résistance aux interférences.

IEEE 802.11ax : est la dernière version de ce protocole qui permet des débits de données allant jusqu'à 10Gbps sur les bandes de fréquence 2,4 et 5 GHz, avec une meilleure gestion de la bande passante pour les environnements à forte densité d'utilisateurs.

III.2.4. La passerelle LoRaWAN

Elle est un composant clé dans les systèmes de communication LoRa. Elle joue le rôle de relais entre les nœuds Lora (tels que les capteurs, les équipements industriels, etc.) et le réseau wifi en transmettant les données collectées par les nœuds Lora au réseau wifi pour une analyse et une utilisation ultérieure.

Le Gateway loraWAN sert, typiquement, de relais entre le nœud Lora et le serveur du réseau Lora sans aucune interprétation des charges utiles. Elle transmet tous les paquets radio en liaison montante au serveur après avoir ajouté des métadonnées (rapport signal-bruit, indicateur de force du signal reçu, etc.). Inversement, sur la liaison descendante, la passerelle LoRa exécute les demandes de transmission provenant du serveur [45].

III.3. Conception d'un prototype matériel d'une poubelle intelligente

Deux types de poubelles sont nécessaires pour la conception de Sénégal SET :

III.3.1. La conception de PEP

La PEP est conçue pour collecter le niveau de remplissage, la température, l'humidité et les géolocalisations des poubelles situées dans les lieux publics. Elle comprend deux modules HC-SR04. Un capteur à ultrasons est fixé au-dessus du couvercle de la poubelle. L'émetteur de ce capteur émet un son ultrasonique qui est au-delà de la plage d'écoute de l'oreille humaine, et le récepteur reçoit les ondes sonores réfléchies par le solide objet. Par conséquent, si un usager est détecté dans une certaine plage, le couvercle s'ouvrira automatiquement à l'aide d'un servomoteur installé dans la partie supérieure de la poubelle. Une portée de 35 cm a été mise en place pour le système d'identification proposé. Une fois le couvercle ouvert, on peut mettre les ordures à l'intérieur de la poubelle, et le couvercle restera ouvert jusqu'à un certain temps. Le deuxième capteur à ultrasons est fixé au niveau du couvercle dans sa partie intérieure. Il émet des ondes ultrasoniques qui seront réfléchies par les déchets à l'intérieur de la poubelle dans un intervalle de temps. À l'aide de cet intervalle de temps, le pourcentage du niveau de déchet dans la poubelle est calculé pour mesurer le niveau de remplissage et un module GPS pour la géolocalisation des bennes. La PEP est équipée d'un capteur dht11 pour mesurer l'humidité et la température de la poubelle et d'un module Lora pour établir une connexion avec le réseau LoRa. En outre, une unité de gestion d'alimentation est intégrée pour fournir les tensions d'alimentation requise à tous les composants de la PEP. De plus un panneau est attaché à l'unité de gestion de l'alimentation pour la récupération d'énergie et d'auto-alimentation des PEP puisqu'elles sont alimentées par des batteries.

III.3.2. La conception de PM

La PM est conçue pour collecter le niveau de remplissage, la température, l'humidité et de la géolocalisation des poubelles installées dans les habitations. Elle comprend tous les composants que contient une PEP sauf que le module LoRa est remplacé ici par un module wifi pour établir une connectivité sans fil avec le routeur qui agit comme point d'accès pour envoyer les données à la passerelle.

III.4. Algorithme de routage utilisé

Pour générer le chemin optimal pour la collecte des déchets dans nos applications web/Mobile, nous pouvons utiliser des algorithmes de calcul d'itinéraire. Un algorithme de

routage est une méthode de calcul qui permet de déterminer le meilleur chemin entre un chemin de départ et un destinataire lors de l'échange d'informations sur un réseau [46].

Dans ce projet un algorithme de routage est donc défini comme une façon de calcul qui permet de déterminer le meilleur chemin entre deux poubelles lors d'une collecte. Il existe plusieurs algorithmes couramment utilisés pour résoudre ce type de problème, notamment l'algorithme de recherche de Dijkstra, l'algorithme de Bellman-Ford et l'algorithme de recherche de chemin A*. Comme nous disposons des données de la carte en utilisant des services de géolocalisation tels que OpenStreetMap, telles que les distances entre les poubelles, les coordonnées GPS des poubelles, les temps de trajet, les types de routes, les obstacles, etc.

Pour Sénégal SET nous avons utilisé l'algorithme de Dijkstra pour trouver le chemin optimal pour la collecte des déchets en utilisant les éléments d'écrits suivant :

- ✓ Le graphe peut représenter la zone de couverture
- ✓ Chaque nœud (ou sommet) représente une poubelle de la zone.
- ✓ Les arcs (ou liens) entre les nœuds représentent les chemins possibles pour se rendre d'une poubelle à une autre

Voici un exemple d'une zone à 8 poubelles nommés d'a à h et existant 10 chemins. On suppose que les poubelles susceptibles d'être pleines sont b, c, d, g et h. la question que l'on pose ici est de savoir, quel est le chemin à prendre pour collecter ces poubelles ?

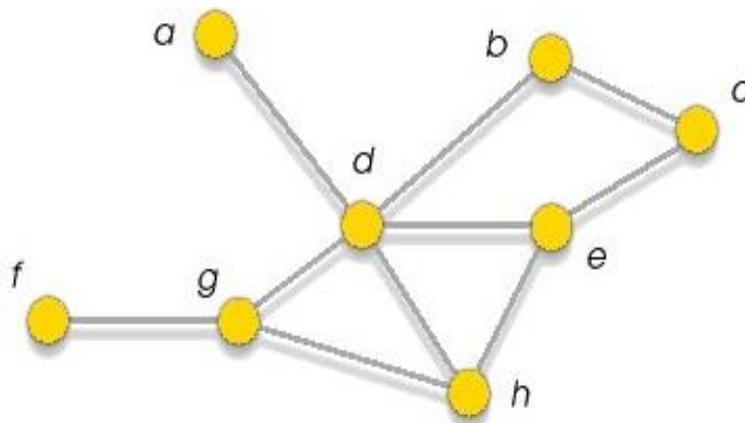


Figure 33: exemple d'une zone à 8 poubelles

✓ Algorithme utilisé

ENTREES $G = (V, E)$ un graphe avec une valuation positive c des arêtes, s un sommet de V

Initialiser tous les sommets à non marqué ; Initialiser tous les labels L à ∞

$L(s) := 0$

Tant Qu'il existe un sommet non marqué

//Sélection du plus proche sommet non marqué Choisir le sommet y non marqué de plus petit label L Marquer y

// Mise à jour des labels de ses voisins non marqués

Pour chaque sommet z non marqué voisin de y

$L(z) := \min \{L(z), L(y) + c(y, z)\}$

Fin Pour

Fin Tant Que

✓ Description de l'algorithme utilisé

L'algorithme de recherche de chemin en graphe utilisé pour trouver le chemin le plus court entre deux nœuds dans ce graphe pondéré. Il utilise une approche de "plus proche sommet non marqué" pour explorer les nœuds accessibles à partir d'un nœud de départ.

Il fonctionne en initialisant tous les sommets à non marqué et tous les labels à l'infini, sauf pour le sommet de départ qui est initialisé à 0. Ensuite, tant qu'il existe des sommets non marqués, l'algorithme sélectionne le plus proche sommet non marqué et le marque. Il met ensuite à jour les labels des sommets voisins non marqués en utilisant la formule :

$$L(z) := \min \{L(z), L(y) + c(y, z)\}.$$

La complexité de cet algorithme est $O(V^2)$ où V est le nombre de sommets, et il est utilisé pour trouver les plus courts chemins entre tous les sommets d'un graphe. Il est particulièrement utile pour des graphes non négatifs, c'est-à-dire pour lesquels tous les poids des arêtes sont positifs.

✓ Résultat de l'algorithme

Après avoir l'utiliser l'algorithme de routage, on trouve que le PCC est c, b, d, g et h .

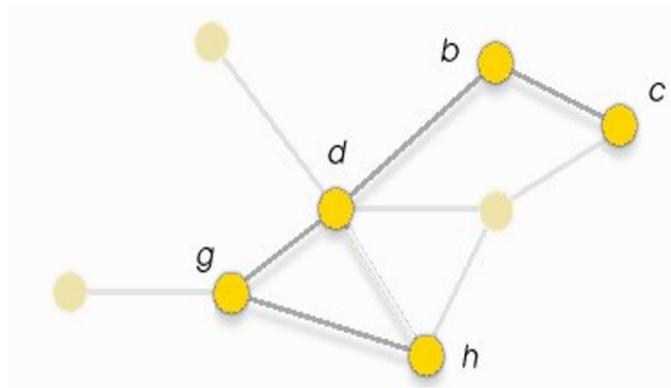


Figure 34: exemple d'une zone appliqué à algorithme du pcc

IV. Choix des technologies

La réalisation de ce projet nécessitera certain composants et certains logiciels parmi lesquels nous allons les présenter dans la suite de cette partie. Le choix des technologies se fait à partir de la capacité de réaliser les tâches qu'on peut lui confier, son cout et sa disponibilité sur le marché sénégalais.

IV.1. Les objets connectés

Les capteurs ont été choisi d'une manière judicieuse pour un bon fonctionnement avec les moyens que nous avons à notre portée pour réaliser le prototype.

- **Une carte arduino**

Dans le cadre de la réalisation de la PEP, nous avons utilisé une carte Arduino, plus spécifiquement la carte Arduino UNO. Reconnue pour son aspect open source et sa facilité d'utilisation, cette carte s'est avérée idéale pour l'atteinte de manière efficiente et à moindre coût des différents objectifs de notre projet [47].

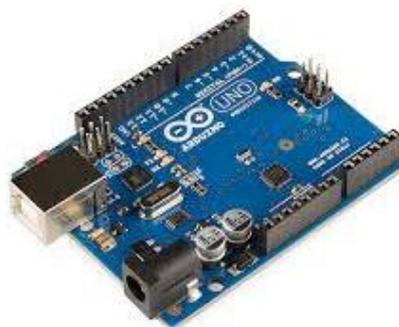


Figure 35: carte Arduino Uno

Il est important de remarquer que la carte Arduino UNO est basée sur le microcontrôleur ATmega328. Arduino Uno est une carte largement répandue et utilisée parmi toutes celles de la famille Arduino.

- **Le module Wifi ESP8266**

Dans le cadre de la réalisation de la PM, nous avons utilisé Le module Wifi ESP8266 pour connecter les capteurs de niveau de remplissage et de géolocalisation des poubelles à un réseau WiFi. Il permet la transmission en temps réel des données des poubelles vers un serveur pour une visualisation en temps réel. En termes simples, ESP8266 ajoute la capacité de connectivité WiFi à nos projets et fournit une puce à faible coût avec une pile TCP / IP complète et un microcontrôleur [48].

Ces fonctionnalités supplémentaires détaillées dans la fiche technique sont :

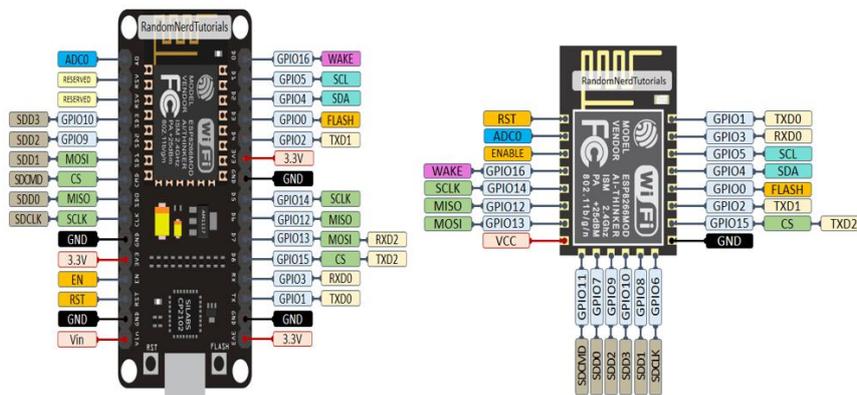


Figure 36: Module ESP8266

- **Capteur de distance à Ultrason**

Le capteur à ultrasons HC-SR04 utilise un sonar pour déterminer la distance à un objet. Ce capteur lit de 2 cm à 400 cm (0,8 pouce à 157 pouces) avec une précision de 0,3 cm (0,1 pouce), ce qui convient à la plupart des projets amateurs. De plus, ce module particulier est livré avec des modules émetteurs et récepteurs à ultrasons [49].



Figure 37: Capteur ultrason HC-SR04

Broches de connections

- ✓ VCC= Alimentation +5 V
- ✓ GND= masse de l'alimentation
- ✓ Trig= Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input)
- ✓ Echo= Sortie de mesure données en écho (Echo output)

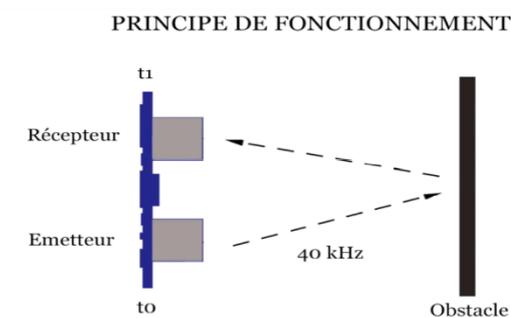


Figure 38: principe de fonctionnement du capteur à ultrasons HC-SR04

Le capteur à ultrasons peut être utilisé dans les poubelles intelligentes pour mesurer la distance entre le couvercle de la poubelle et la surface des déchets à l'intérieur. Cela peut aider à améliorer la gestion des déchets et à optimiser la collecte des déchets.

- **Module GPS**

Un module GPS (Global Positioning System) est utilisé dans Sénégal SET pour obtenir des informations de géolocalisation sur les poubelles. Cela permet de visualiser la localisation des poubelles sur une carte et de planifier les itinéraires de ramassage en fonction de la distance et de la proximité des poubelles.

Le GPS s'utilise en association avec une carte pour se repérer et se positionner. Le principe de fonctionnement du GPS repose sur la mesure de la distance d'un récepteur par

rapport à plusieurs satellites (les satellites sont répartis de telle manière que 4 à 8 d'entre eux soient toujours visibles)[50]. Chaque satellite émet un signal, capté sur Terre par le récepteur, permettant ainsi de mesurer très précisément la distance séparant l'émetteur du récepteur grâce au temps de parcours [51].



Figure 39: module GPS NEO 6M

- **Module Lora**

LoRa signifie Long Range, LoRa est un protocole de transmission sans fil, et consomme très peu d'énergie et a une très longue portée de distance de transmission, nous pouvons transmettre des données à environ 10 km [52], contrairement au WIFI et au Bluetooth qui n'ont qu'une portée de quelques mètres. Dans notre projet chaque PEP est intégré un module émetteur-récepteur pour envoyer des données sur une longue distance tout en utilisant une puissance minimale.

Les modules LoRa sont de très petite taille et disponibles à un prix très bon marché, nous pouvons donc utiliser ces modules LoRa à la place des modules WIFI de la PM. Les modules LoRa sont très utiles dans les endroits éloignés où la connexion Internet n'est pas disponible. Dans ce mémoire, nous avons choisi d'utiliser le module LoRa RYLR998 de Reyax, qui peut être facilement contrôlé par les commandes AT.



Figure 40: le module LoRa RYLR998 de Reyax

- **Le capteur DHT11**

Le capteur DHT11 mesure la température et l'humidité. Il a 4 broches, mais il est souvent vendu sur une carte support qui possède 3 broches. Il communique avec la carte très simplement au travers d'une de ses entrées numériques. Les 2 autres broches sont pour son alimentation 5 V et la masse (GND)[53].



Figure 41: capteur de température et d'humidité

Le capteur DHT11 peut être utilisé pour surveiller la température et l'humidité à l'intérieur des poubelles intelligentes, ce qui peut aider à améliorer la gestion des déchets et à réduire les odeurs. Surveillance de l'humidité, détection de la température, prévention de la croissance bactérienne, réduction des odeurs font partie des raisons pour lesquelles ce capteur peut être utile pour ce projet

- **Le servomoteur**

Les servomoteurs, souvent abrégés en « servo » tout court par leurs utilisateurs, sont des moteurs d'un type particulier, très appréciés pour faire tourner quelque chose jusqu'à une position bien précise et capable de maintenir cette position jusqu'à l'arrivée d'une nouvelle instruction [54]. Ils sont très utilisés dans le modélisme (direction des voitures télécommandées, ouverture automatique d'un couvercle etc.), mais ont aussi leur place dans la robotique et l'industrie par exemple dans des vannes pour réguler des flux de liquides.



Figure 42: servomoteur 9g

Il se présente sous la forme d'un petit rectangle, avec deux petits rebords sur les côtés pour le fixer solidement et un axe décentré sur lequel on peut fixer des bras interchangeables pour assurer la liaison mécanique avec la pièce qui doit bouger. Même s'il existe de servomoteurs à rotation continue, l'immense majorité des modèles sont capables de bouger leur bras sur 180° seulement.

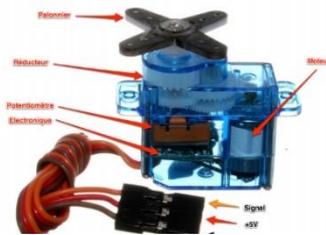


Figure 43: Vu de l'intérieur d'un servomoteur

Un petit moteur à courant continu est relié à un potentiomètre (résistance variable) par l'intermédiaire d'un circuit électronique ce qui permet de contrôler finement le moteur en fonction de la position du potentiomètre. Sur l'axe de sortie du moteur, une série d'engrenages permet d'augmenter son couple (sa force utile) en réduisant sa vitesse de rotation. Quand le moteur tourne, les engrenages s'animent, le bras bouge et entraîne dans son mouvement le potentiomètre. Si le mouvement s'arrête, le circuit électronique ajuste en continu la vitesse du moteur pour que le potentiomètre et donc par extension le bras du moteur reste toujours au même endroit. C'est ce qui permet par exemple à un bras d'un robot de ne pas retomber sous l'effet de son propre poids lorsque le mouvement s'arrête !

IV.2. Les outils de développements

Les outils de développement utilisés pour Sénégal SET sont :

- **Plateforme de programmation arduino**

Une telle carte d'acquisition qui se base sur sa construction sur un microcontrôleur doit être dotée d'une interface de programmation comme est le cas de notre carte.

Comme n'importe quel langage de programmation, IDE (Integrated Development Environment) est un programme spécial exécutable sur ordinateur qui nous permet d'écrire des esquisses pour la carte Arduino dans un langage simple sur le modèle du langage de traitement. La magie se produit lorsque vous appuyez sur le bouton qui télécharge l'esquisse à la carte : le code que nous avons écrit est traduit dans la langue de C (qui est généralement assez difficile pour un débutant d'utiliser), et est passé au compilateur avr-gcc, une pièce importante du logiciel open source qui fait la traduction finale dans la langue comprise par le microcontrôleur [55].

- **Plateforme IoT**

Il existe plusieurs plateforme IoT, parmi lesquelles nous avons choisi la plateforme qui nous conviendra le mieux pour notre projet.

Le choix d'une plateforme nécessite de comprendre son fonctionnement de base, d'autant que beaucoup de ses fonctionnalités se situent en dessous de la couche applicative réellement visible par l'utilisateur.

Pour ce travail nous avons porté notre choix sur ThingSpeak pour le serveur Cloud. ThingSpeak est un service de plateforme d'analyse IoT qui vous permet d'agréger, de visualiser et Analysez les flux de données en direct dans le cloud. Vous pouvez envoyer des données à ThingSpeak à partir de vos appareils, créer des visualisations instantanées de données en direct et envoyer des alertes en utilisant des services Web. Avec les analyses MATLAB dans ThingSpeak, vous pouvez écrire et exécuter du code MATLAB pour effectuer des prétraitements, des visualisations et des analyses. ThingSpeak permet aux ingénieurs et aux scientifiques de prototyper et de construire des systèmes IoT sans la mise en place de serveurs ou le développement de logiciels Web [56].

- **Xampp Server**

Dans le développement de notre application Web Xampp est le système de test local choisi, le nom XAMPP est un acronyme venant des initiales de tous les composants de cette suite. Ce dernier réunit donc le serveur Web Apache, la base de données relationnelle et système d'exploitation MySQL ou MariaDB ainsi que les langages scripts Perl et PHP. L'initiale X représente tous les systèmes d'exploitation possibles, à savoir Linux, Windows et Mac OS X [57].

- **PHP**

PHP est Utilisé ici pour récupérer les informations sur les poubelles à partir de la base de données et les envoyer à l'interface utilisateur pour les afficher sur la carte. Comme que on le définit comme étant un langage de script côté serveur. Il est utilisé pour développer des sites web statiques ou dynamiques ou des applications web. PHP signifie Hypertext Pre-processor, qui signifiait auparavant Personal Home Pages [58].

- **JavaScript**

Définit comme étant un langage de programmation qui permet de créer du contenu mis à jour de façon dynamique, de contrôler le contenu multimédia, d'animer des images, et tout ce à quoi on peut penser [59].

JavaScript est utilisé pour ajouter des fonctionnalités interactives à notre application web, pour créer une interface utilisateur pour afficher les données en temps réel sur les niveaux de remplissage des poubelles, afficher des cartes interactives pour visualiser les poubelles.

- **OpenStreeMap**

Défini comme étant un projet qui a pour but de créer des cartes libres du monde, en utilisant le système GPS ou d'autres données libres. Il a été fondé en juillet 2004 par Steve Coast au University College de Londres[60]

OpenStreetMap (OSM) peut être utilisé pour afficher des cartes interactives dans notre application web/mobile. Il s'agit d'une carte libre et modifiable.

Il est utilisé pour afficher les emplacements des poubelles et leur niveau de remplissage, avec des marqueurs pour indiquer le niveau de remplissage. Il est également utilisé pour afficher des itinéraires pour les camions de ramassage des déchets, pour aider les conducteurs à planifier leur parcours le plus efficacement possible.

- **MIT APP INVENTOR**

APP INVENTOR 2 est un outil de développement online pour les Smartphones et les tablettes sous Android, c'est un système d'exploitation créé par GOOGLE, et concurrent de l'IOS d'APPLE. La plateforme de développement est accessible à tous les utilisateurs, qu'ils soient étudiants, ingénieurs ou programmeurs. La programmation se réalise en ligne, à l'aide de son navigateur, et sous l'environnement logiciel de son choix (Mac, Linux ou Windows). Seules conditions, avoir un compte Gmail pour pouvoir y accéder, et un accès à internet évidemment [61]. Les informations sont stockées sur des serveurs distants.

IV.3. La gestion d'alimentation de Sénégal SET

Il est effectivement judicieux d'utiliser un système de gestion d'alimentation pour l'alimentation de notre projet de poubelle intelligente. Cependant, il est important de bien dimensionner le système pour répondre aux besoins électriques estimés.

Pour cela, il nous faut évaluer la consommation électrique des différents composants du système, tels que les capteurs, les microcontrôleurs, les communications sans fil, la localisation géographique de votre projet, ainsi que les conditions météorologiques locales pour déterminer la quantité d'énergie disponible etc. C'est dans ces sens que nous avons choisi d'utiliser un

système photovoltaïque, qui comprend un panneau solaire et une batterie, pour alimenter notre projet. Un système photovoltaïque est capable de convertir l'énergie solaire en électricité. Le panneau solaire utilise des cellules photovoltaïques pour convertir la lumière du soleil en électricité [62]. La batterie stocke l'énergie produite par les panneaux solaires pour une utilisation ultérieure, par exemple la nuit ou par temps nuageux, lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible.

Les besoins électriques pour notre projet comprennent l'alimentation d'une poubelle intelligente, ainsi que la fourniture d'énergie aux appareils électroniques nécessitant une tension comprise entre 3V et 5V.

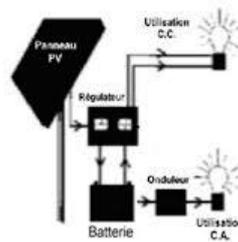


Figure 44: système d'alimentation photovoltaïque

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé le schéma général de Sénégal SET, en détaillant à la fois le programme et le matériel utilisé, l'algorithme de routage employé pour optimiser l'itinéraire de collecte, ainsi que les outils logiciels et matériels mobilisés pour la réalisation de ce projet. Dans la dernière partie, nous présenterons notre prototype réel, après avoir implémenté notre système sur une étude de cas concrète en réalisant une poubelle intelligente et en mettant en place les plateformes logicielles nécessaires.

Chapitre 2 : Implémentation de Sénégal SET

Introduction

L'implémentation est la réalisation, l'exécution ou la mise en pratique d'un plan, d'une méthode, d'un concept, d'une idée, d'un modèle, d'une spécification, d'une norme ou d'une règle dans un

but précis [63]. Dans ce chapitre, nous allons montrer la mise en œuvre de notre système en implantant tout d'abord une plateforme matérielle (composants électroniques), puis en configurant notre serveur cloud, avant de finir par l'implémentation des applications qui simulent Sénégal SET.

I. Implémentation du prototype poubelle

L'implémentation d'un outil de description et de simulation de Sénégal Set est une étape clé dans la poursuite de mes travaux de recherche.

I.1. Le montage du matériel

Après avoir choisi les composants, les actionneurs électriques et le logiciel de programmation arduino, cette étape consiste à concevoir et construire une structure ou un cadre qui les maintient tous ensemble. Le microcontrôleur ESP8266 considérée comme le cerveau de ce projet pour les PM et Arduino Méga pour les PEP, de sorte que chacun des autres composants se connecte à ces cartes qui sont responsable du traitement de l'information et du rapprochement de ces composants. Pour cela, nous allons montrer comment sont connecter chaque composant.

Ci-dessous les étapes de la conception d'une PM.

I.1.1. Système d'envoi/réception du niveau de déchet

La carte Esp8266 reçoit les informations du capteur ultrason 01 puis les envoie à la plateforme IoT et aux applications Web/Mobile.

- **Connexion du capteur ultrason avec la carte Esp8266**

Nous avons connecté les ports Capteur ultrasons 01 HC-SR04 avec les ports de l'esp comme suit :

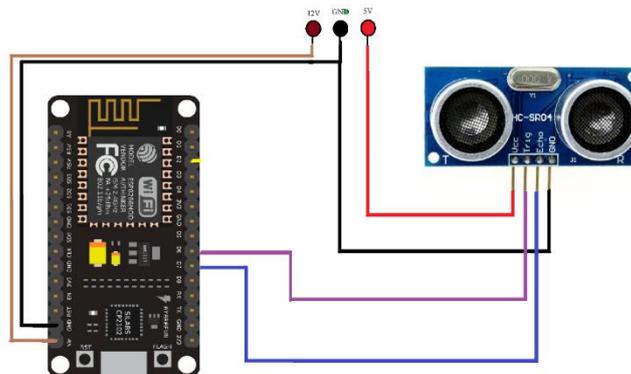
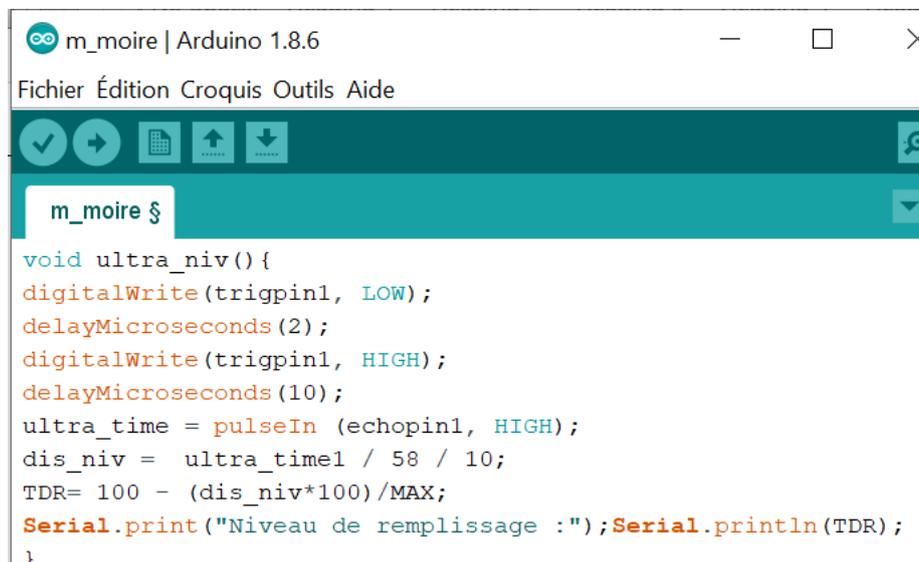


Figure 45: Connexion du capteur ultrason avec la carte Esp8266

- **Le code source :**



```
m_moire | Arduino 1.8.6
Fichier Édition Croquis Outils Aide
m_moire $
void ultra_niv() {
  digitalWrite(trigpin1, LOW);
  delayMicroseconds(2);
  digitalWrite(trigpin1, HIGH);
  delayMicroseconds(10);
  ultra_time = pulseIn (echopin1, HIGH);
  dis_niv = ultra_time1 / 58 / 10;
  TDR= 100 - (dis_niv*100)/MAX;
  Serial.print("Niveau de remplissage :");Serial.println(TDR);
}
```

Figure 46: mesure du niveau de remplissage

- **Résultat obtenu**



```
COM3
connexion
pourcentage de remplissage =45 %
connexion
pourcentage de remplissage =46 %
connexion
pourcentage de remplissage =46 %
connexion
```

Figure 47: Résultat de détection du niveau de remplissage

I.1.2. Mesure de la température et de l'humidité

Le capteur DHT11 est utilisé dans une poubelle intelligente pour surveiller la température et l'humidité à l'intérieur des poubelles.

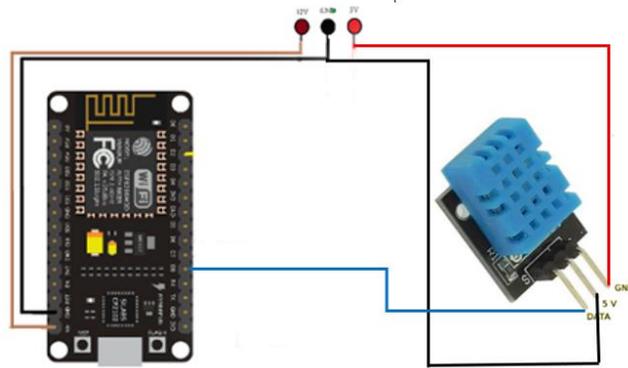


Figure 48: montage du dht11 avec l'ESP8266

HC-SR04	ESP8266
DATA	D8
VCC	VIN
GND	GND

Tableau 5: Connexion du Capteur DHT11 avec l'Esp8266

I.1.2. Système de Ouverture /fermeture

Le capteur à ultrasons détecte le mouvement, donc la porte s'ouvre après 3 secondes, et la porte reste ouverte pendant un temps donné avant de se fermer.

- Connexion du deuxième capteur à ultrasons avec la carte Esp8266

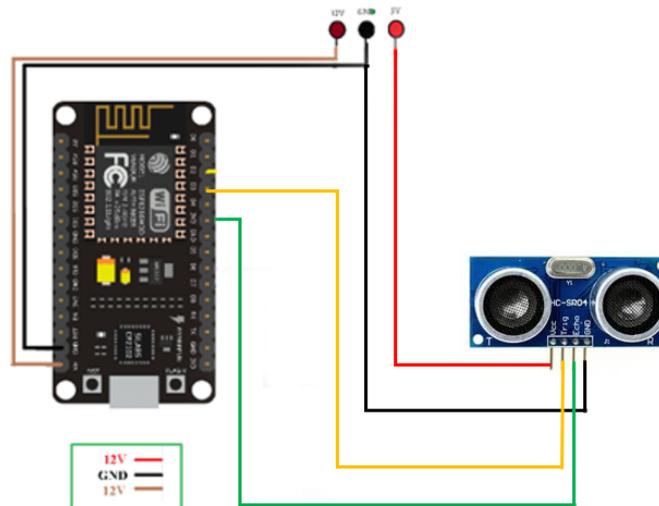


Figure 49: Montage du HCSR04 sur la carte ESP8266

Nous avons connecté les ports Capteur ultrasons 02 HC-SR04 ESP8266 Comme suit :

HC-SR04	ESP8266
---------	---------

VCC	VIN
TRIG	D3
ECHO	D5
GND	GND

Tableau 6: Connexion des ports du Capteur à ultrasons 02 HC-SR04 avec l'Esp8266

- **Connexion du servomoteur avec la carte ESP8266**

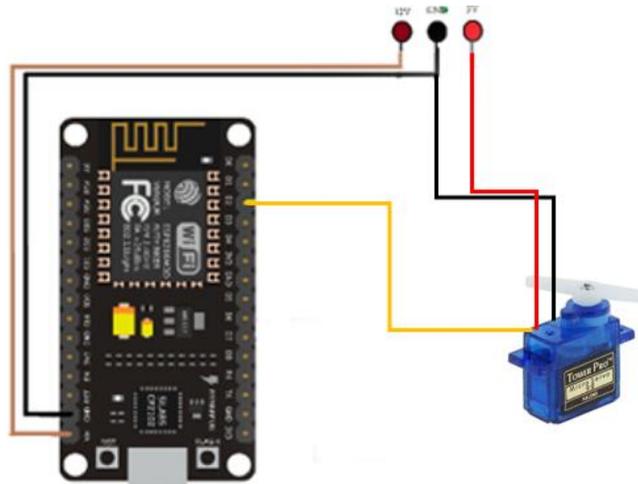


Figure 50: Connexion du servomoteur avec la carte ESP8266

Nous avons connecté les ports Servomoteur avec les ports de l'Esp8266 comme suit :

Servomoteur	ESP8266
VCC	VCC
GND	GND
SIGNAL	D5

Tableau 7 Connexion des ports du Servomoteur avec l'Esp8266

- **Le code source :**

Nous utilisons le code source pour contrôler le servomoteur avec le capteur ultrason 02 HC-SR04.

```

m_moire $
void loop(){
//*****
ultra_read();
//*****
ultra_niv();
Serial.print("Niveau de remplissage :");Serial.println(TDR);
Serial.print("Dis :");Serial.println(dis_cm);
if(dis_cm<set_cm && dis_cm!=0){
myservo.write(150);
delay(10000);
myservo.write(0);
delay(10000);
if (isnan(temperature) || isnan(humidity)) {
Serial.println("Erreur de lecture du capteur DHT11 !");
return;
}
Sending_To_thingspeak();
}
if(dis_cm<set_cm && TDR>90){myservo.write(0);}
delay(3000);
if (dis_cm>set_cm) {myservo.write(0);}
delay(3000);
}

```

Figure 51: code pour le contrôle du servomoteur

I.1.3. Système de géolocalisation des poubelles

- Connexion du module GPS sur le module Esp8266

HC-SR04	ESP8266
VCC	VIN
RX	D0
TX	D8
GND	GND

Tableau 8: Connexion du module GPS sur le module Esp8266

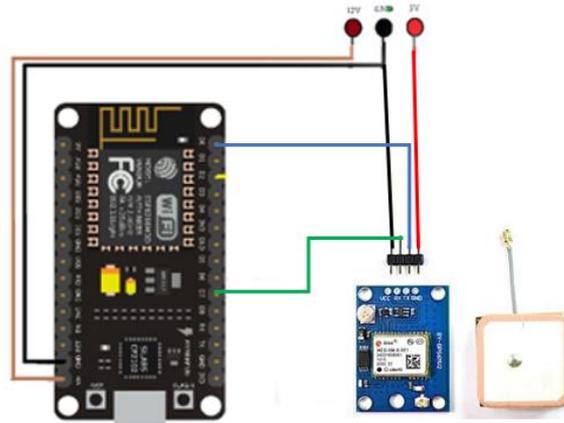


Figure 52: Connexion du module GPS sur le module Esp8266

Après avoir montré comment sont liés chaque outil à l'Esp8266, voici maintenant l'assemblage général des composants.

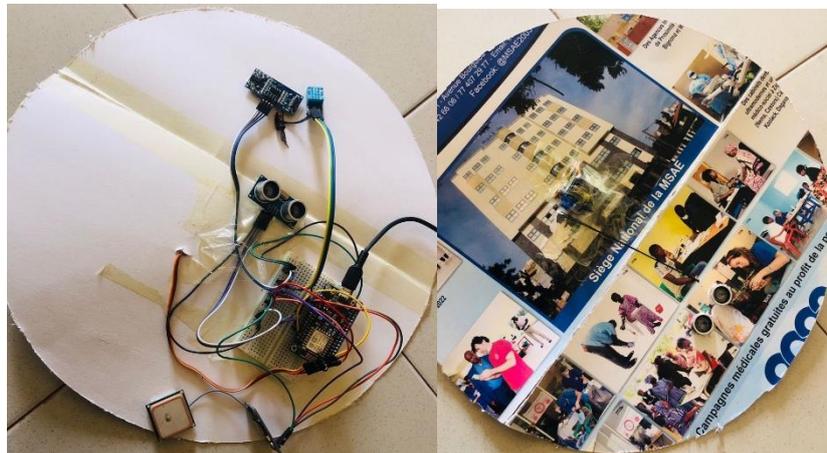


Figure 53: Vu intérieur et extérieur du couvercle

II. Implémentation des applications Web/Mobile

Dans cette partie, nous allons montrer un peu les configurations faites pour pouvoir réaliser l'implémentation des applications de notre proposition Sénégal SET.

II.1. Application web

Le développement d'une application web nécessite :

- **La création de la base de données**

Nous allons créer une base de données pour stocker les données des poubelles et les agents de la société de collecte. Et pour ce faire nous allons suivre les étapes suivantes :

Définir les champs nécessaires : Déterminez les informations que nous souhaitons stocker dans votre base de données, par exemple, l'identifiant de la poubelle, la latitude et la longitude, le niveau de remplissage, la date et l'heure de la mesure, etc.

Créer la structure de la table : nous utilisons MySQL comme outil de gestion de base de données pour créer la table qui stockera les données. Assurons-nous de définir les types de données appropriés pour chaque champ.

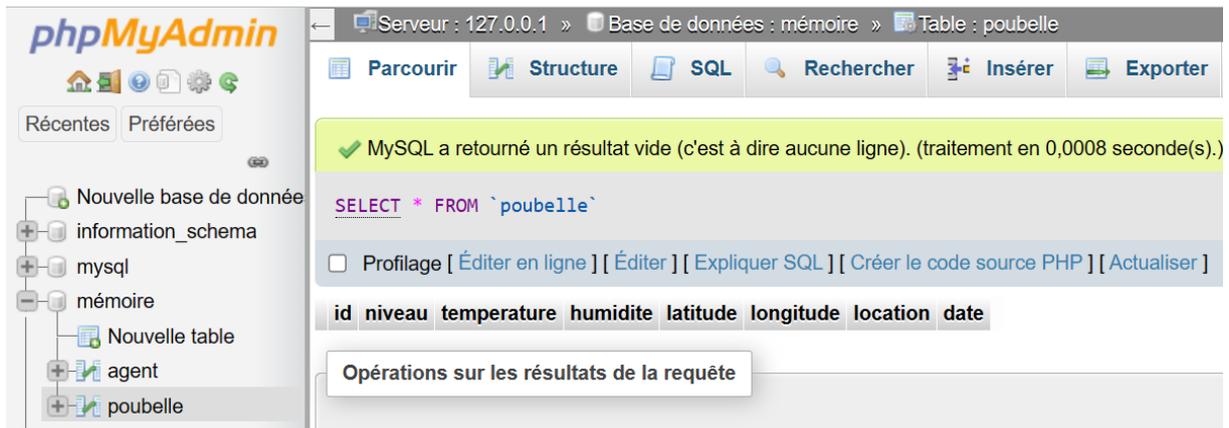


Figure 54: Création de la table poubelle

Configurer la sécurité : Configurez les paramètres de sécurité pour protéger notre base de données contre les accès non autorisés.

- **Connexion de la base de données à notre application**

```
1
2 <?php
3 session_start();
4 //check if user is logged in
5 if (!isset($_SESSION['logged_in']) || $_SESSION['logged_in'] !== true) {
6     header('Location: compost.php');
7     exit;
8 }
9
10 // Connect to the database
11 $db = new PDO('mysql:host=localhost;dbname=mémoire', 'thiam', '123');
12
13 // Get the trash bins from the database
14 $stmt = $db->prepare('SELECT * FROM poubelle');
15 $stmt->execute();
16 $poubelle = $stmt->fetchAll();
17
18 ?>
```

Figure 55: importation de base de données à notre application

- **Affichage des marqueurs sur une carte**

```

<script>
    Let mapOptions = {
        center:[12.543018129969234, -16.284413370065521],
        zoom:15
    }

    Let map = new L.map('map' , mapOptions);

    Let layer = new L.TileLayer('http://{s}.tile.openstreetmap.org/{z}/{x}/{y}.png');
    map.addLayer(layer);

    <?php foreach ($poubelle as $bin) { ?>

        Let marker = new L.Marker([<?php echo $bin['longitude']; ?>, <?php echo $bin['latitude']; ?>]);

        marker.addTo(map);
        marker.bindPopup("<b>Location:</b> <?php echo $bin['location']; ?><br><b>Remplissage:</b> <?php echo $bin['niveau']; ?>% <br><b>Température:</b> <?php echo $bin['temperature']; ?>°C <br><b>Humidité:</b> <?php echo $bin['humidite']; ?>%");
    <?php } ?>
</script>

```

Figure 56 : Code d'affichage des marqueurs sur une carte

Ce script crée une carte interactive en utilisant la bibliothèque Leaflet pour afficher des marqueurs de localisation (poubelles) sur la carte. Les coordonnées de la carte sont définies dans l'objet mapOptions, qui contient les coordonnées de longitude et de latitude du centre de la carte et le niveau de zoom initial.

Ensuite, une couche de tuiles de carte OpenStreetMap est ajoutée à la carte. Ensuite, le script utilise une boucle foreach en PHP pour itérer à travers un tableau de données de poubelles et créer un marqueur de carte pour chaque poubelle. Les informations sur chaque poubelle sont incluses dans une fenêtre contextuelle associée au marqueur de carte en utilisant la méthode bindPopup de la bibliothèque Leaflet.

- **Sélection des poubelles susceptibles d'être collecter**

```

// Get the trash bins from the database
$stmt = $db->prepare('SELECT * FROM poubelle WHERE niveau >=90');
$stmt = $db->prepare('SELECT * FROM poubelle WHERE temperature >=50');
$stmt = $db->prepare('SELECT * FROM poubelle WHERE humidite >=30');
$stmt->execute();
$poubelle = $stmt->fetchAll();

```

Figure 57 : Code de Sélection des poubelles susceptibles d'être collecter

Cette partie du code prépare trois requêtes SELECT différentes qui récupèrent toutes les colonnes de la table « poubelle » où le niveau de remplissage est supérieur ou égal à 90, où la température est supérieure ou égale à 50 degrés Celsius et où l'humidité est supérieure ou égale à 30 %. Chacune de ces requêtes est stockée dans l'objet PDOStatement appelé \$stmt.

- **Optimisation d'itinéraire**

```
<script>
function calculateRoute() {
// Tableau qui va contenir les coordonnées des poubelles
let waypoints = [];

// Récupérer les coordonnées des poubelles depuis PHP et les ajouter au tableau
<?php foreach ($poubelle as $bin) { ?>
waypoints.push(L.latLng(<?php echo $bin['latitude']; ?>, <?php echo $bin['longitude']; ?>));
<?php } ?>

// Créer un objet 'route' avec les options de calcul d'itinéraire
let route = L.Routing.control({
waypoints: waypoints, // Les points de départ et d'arrivée de l'itinéraire
router: L.Routing.osrmv1({
serviceUrl: 'http://router.project-osrm.org/route/v1', // URL du service de calcul d'itinéraire OSRM
}),
lineOptions: {
styles: [{ color: '#3388ff', weight: 5 }] // Style de la ligne de l'itinéraire
},
addWaypoints: false, // Désactiver l'ajout de points de passage supplémentaires
draggableWaypoints: false, // Désactiver la possibilité de déplacer les points de passage
fitSelectedRoutes: 'smart', // Ajuster le zoom de la carte pour afficher l'itinéraire
showAlternatives: false, // Ne pas afficher les itinéraires alternatifs
show: false // Ne pas afficher l'itinéraire tout de suite, on va le faire manuellement plus tard
}).addTo(map);

// Récupérer l'itinéraire calculé et le dessiner sur la carte
route.on('routesfound', function(event) {
let route = event.routes[0];
let line = L.polyline(route.coordinates, { color: '#3388ff', weight: 5 }).addTo(map);
});
}
```

Figure 58 : code d'optimisation d'itinéraire de collecte

Ce bout de code crée une fonction **calculateRoute()** qui calcule un itinéraire pour passer par un certain nombre de points donnés.

La fonction commence par initialiser un tableau vide **waypoints** qui contiendra les coordonnées des poubelles. Les coordonnées sont récupérées depuis et sont ajoutées au tableau **waypoints**. Ensuite, un objet route est créé avec des options de calcul d'itinéraire. Le tableau **waypoints** est utilisé pour définir les points de départ et d'arrivée de l'itinéraire. Le service de calcul d'itinéraire utilisé est Open Source Routing Machine (OSRM), dont l'URL est spécifiée dans la propriété **serviceUrl**.

Le style de la ligne de l'itinéraire est défini avec la propriété **lineOptions**, en utilisant un tableau de styles avec une seule entrée qui spécifie la couleur et le poids de la ligne. Les propriétés **addWaypoints** et **draggableWaypoints** sont définies sur false pour désactiver la possibilité d'ajouter des points de passage supplémentaires ou de les déplacer.

Finalement, la fonction utilise la méthode **on()** pour ajouter un événement **routesfound** à l'objet route. Lorsque cet événement se produit (c'est-à-dire lorsque l'itinéraire a été calculé), la fonction d'événement récupère l'itinéraire calculé et dessine une ligne sur la carte en utilisant la

classe L.polyline() de Leaflet. La propriété **coordinates** de l'objet route est utilisée pour définir les coordonnées de la ligne.

II.2. Application mobile

Le développement de notre application mobile pour une fonctionnalité de visualisation du niveau de remplissage de la poubelle d'un habitant et de recherche de poubelles proches de chez lui dans une carte de géolocalisation se fait ainsi :

Afficher sur interface le niveau de remplissage de la poubelle, sa température et son humidité.

Ajouter un bouton appelé « Trouver les poubelles proches » pour déclencher l'exécution de la fonction de recherche de poubelles proches lorsque l'utilisateur clique sur le bouton.

Et enfin pour ajouter la fonctionnalité de visualisation de l'itinéraire de collecte dans notre application mobile, nous avons ajouté un autre bouton appelé « Voir l'itinéraire de collecte ».



Figure 59 : l'interface d'accueil de notre application mobile

Si le résident souhaite voir les poubelles les plus proches de chez lui (au cas où sa poubelle atteint son seuil et il veut jeter ces déchets). Il va cliquer sur trouver les poubelles proches pour avoir :

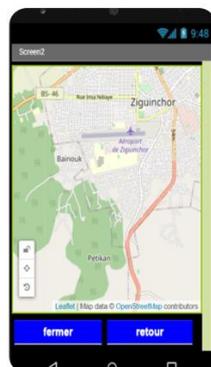


Figure 60 : l'interface de visualisation des poubelles proches

Si une notification de collecte est reçue au niveau de l'application. Le résidant peut visualiser l'itinéraire en cliquant sur le bouton « voir l'itinéraire de collecte ».

Comme nous avons utilisé MIT Inventor, nous avons une partie design et une partie bloc. Dans la partie bloc, nous avons initialisé les variables "niveau de remplissage", "température" et "humidité" à zéro (0) et la variable "lien" pour recevoir les données depuis la plateforme IoT ThingSpeak.

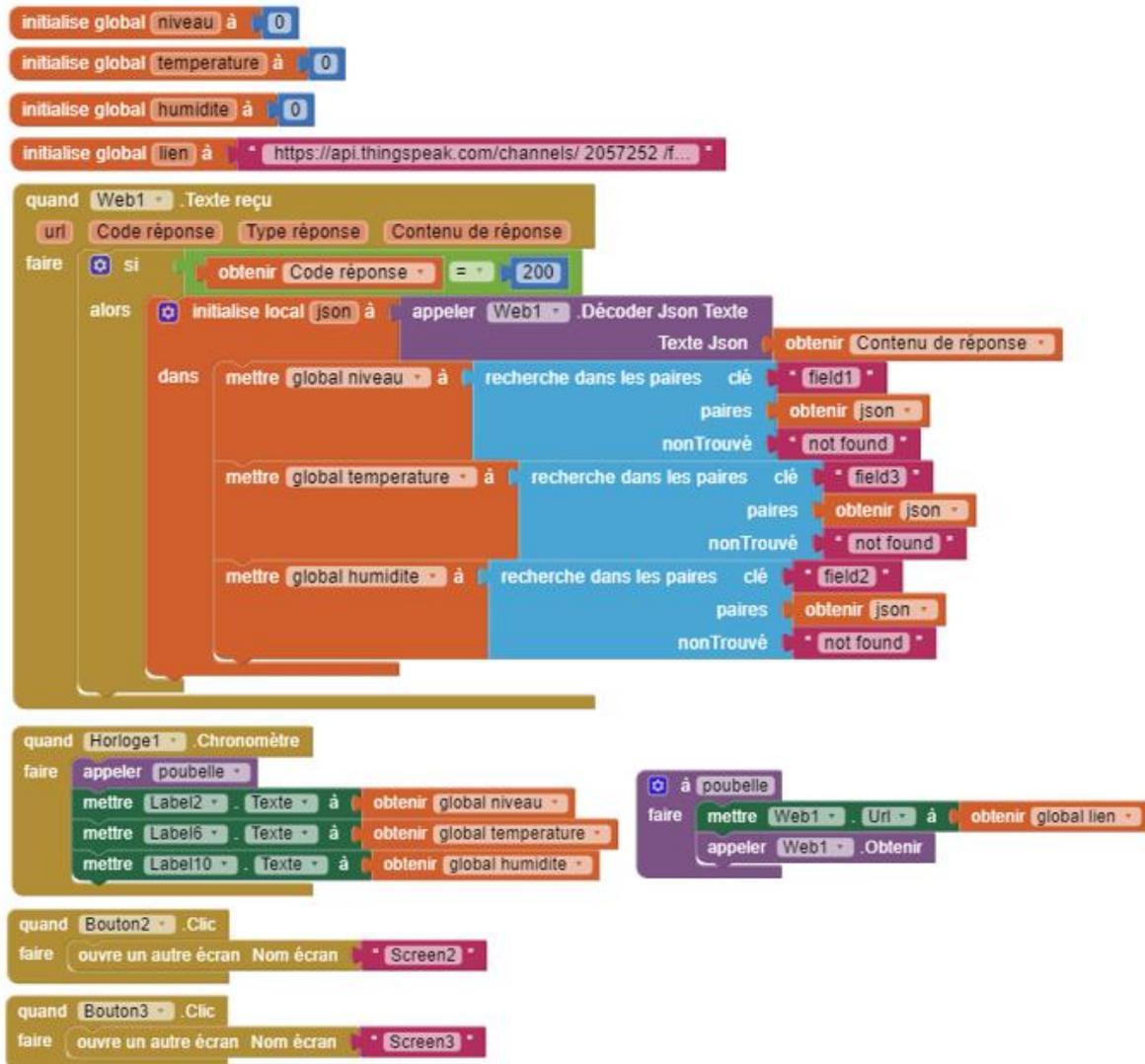


Figure 61: partie de Blocs de notre application mobile

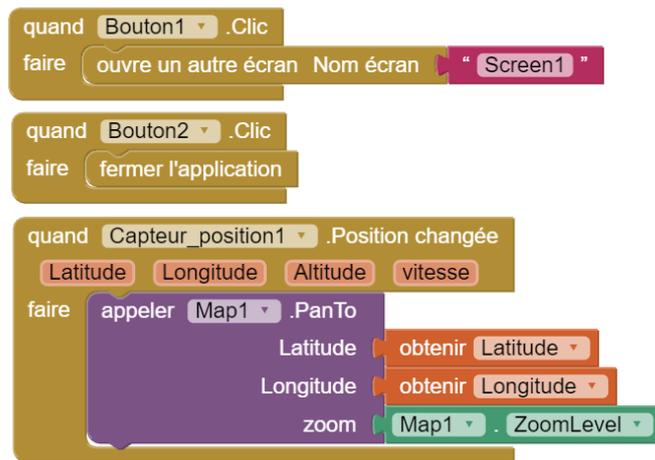


Figure 62 : Affichage de la carte sur notre application

Conclusion

Dans le chapitre d'implémentation de notre système de gestion intelligente des déchets, nous avons montré la mise en œuvre du prototype matériel et d'implantation des applications, ainsi que pour informer les utilisateurs sur le niveau de remplissage des poubelles proches et leur permettre de planifier les itinéraires pour les vider.

En conclusion, l'implémentation de notre système de gestion intelligente des déchets est un processus clé pour améliorer la gestion des déchets dans les communautés, en veillant à ce que les poubelles soient vidées de manière efficace et en temps opportun, et en fournissant aux utilisateurs une application facile à utiliser pour planifier leurs itinéraires de vidange des déchets.

Chapitre 3 : Présentation de prototype réel de Sénégal SET

Introduction

Nous arrivons à la partie ultime de ce rapport après un long processus. En effet nous allons passer à la présentation de notre solution Sénégal SET avec ces différentes fonctionnalités. Il sera question donc dans ce chapitre de faire un guide d'utilisation de la solution. Nous allons tout d'abord présenter la poubelle intelligente puis l'interface de la société de collecte avant de présenter l'interface mobile du citoyen.

I. Présentation de la poubelle intelligente

Conformément aux objectifs initiaux de ce mémoire, nous avons pu présenter l'internet des objets afin de nous approprier ces concepts clés de notre sujet. Nous avons analysé le système de gestion des ordures par l'UCG et fait l'état de l'art sur les poubelles intelligentes existantes pour enfin proposer un prototype pour la filière de gestion des déchets et la salubrité dans notre pays. Par la suite, les phases de conception et réalisation ont permis d'obtenir le prototype qui répond bien aux différents modes de fonctionnement décrits dans les objectifs de ce projet. La Figure 57 présente les vues de face et de profil du prototype réalisé.

On y voit l'ensemble des éléments rendant la poubelle intelligente.



Figure 63: vues de face et de profil du prototype réalisé

À l'approche d'un objet le couvercle se soulève facilement et réagit bien de manière à ce que la poubelle s'ouvre comme souhaité. C'est ce qui est montré à la Figure 42.



Figure 64 : Ouverture automatique de la poubelle

II. Présentation du serveur cloud (ThingSpeak)

Nous avons utilisé le serveur cloud Thingspeak pour stocker les données envoyées par la PM et la PEP reçues par les applications web et Android.

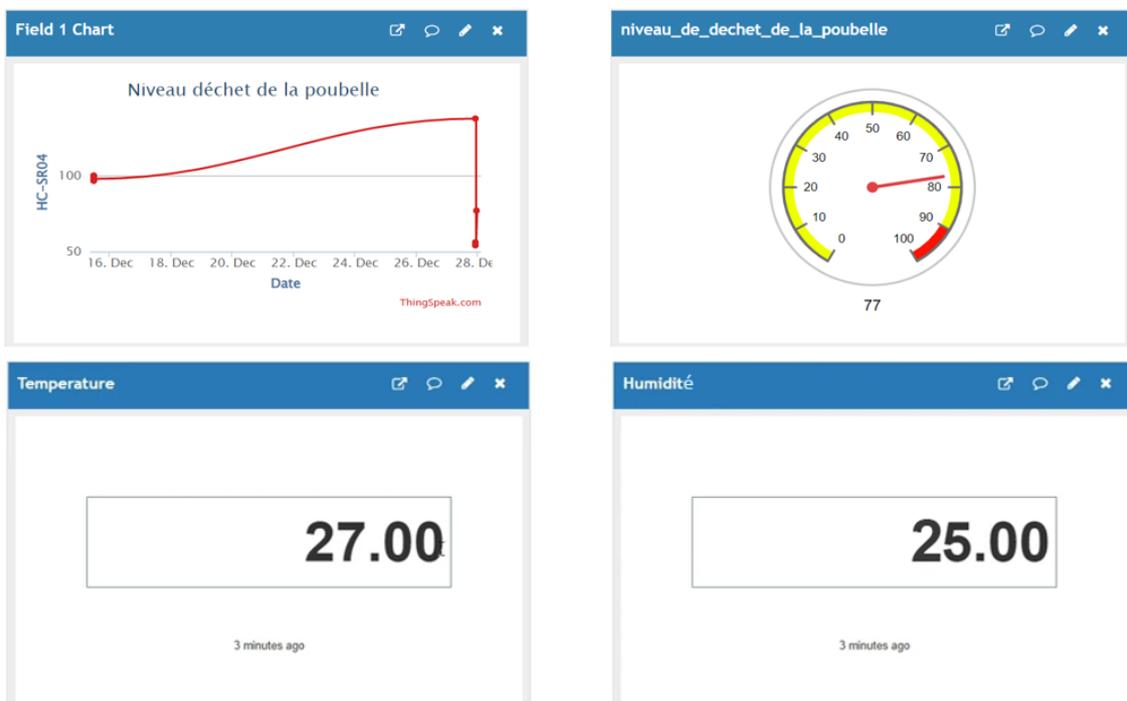


Figure 65 : les informations de la poubelle sur la plateforme IOT

Ce schéma ci-dessus nous montre le niveau de remplissage, la température et l'humidité d'une poubelle, et montre que tant que le niveau est jaune la poubelle pourra toujours recevoir des déchets et dès qu'il est rouge une éventuelle collecte doit se produire.

III. Présentation de l'application Web

Notre application web est une plateforme dédiée à la société de collecte pour visualiser les poubelles et leurs niveaux de remplissage, leurs températures, leurs humidités, et leurs locations sur une carte. Elle est développée en utilisant les technologies PHP et JavaScript avec la bibliothèque Leaflet pour afficher les données sur une carte OpenStreetMap.

Notre application inclut également une page de connexion pour les utilisateurs qui souhaitent accéder aux données. Une fois connecté, les utilisateurs peuvent accéder à une page de visualisation des poubelles.

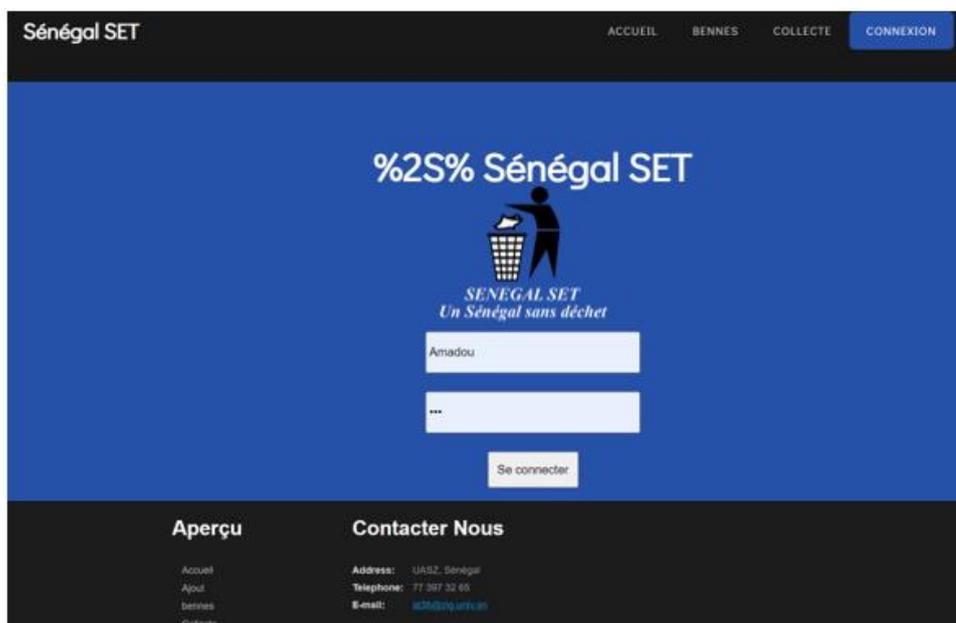


Figure 66 : Page de connexion de notre application web

La fonctionnalité principale de notre application est la visualisation en temps réel des données de niveau de remplissage, de température et d'humidité des poubelles sur une carte. Les utilisateurs peuvent cliquer sur un marqueur de poubelle pour afficher les détails de remplissage de cette poubelle.

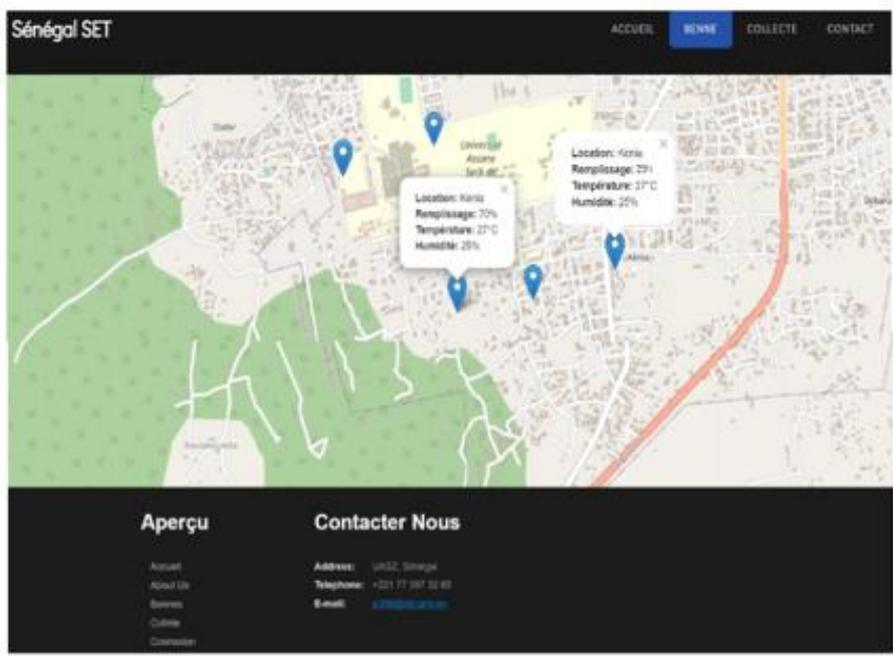


Figure 67 : Liste des poubelles de la ville et leurs statuts

Si toutefois il clique sur le bouton "COLLECTE", les poubelles susceptibles d'être collectées sont regroupées sur la carte, c'est-à-dire les poubelles dont les niveaux de remplissage, de température ou d'humidité dépassent le seuil défini. Et si un certain nombre de poubelles pleines le système génère une route pour optimiser la collecte en se basant sur la position (longitude, latitude) des poubelles pleines.

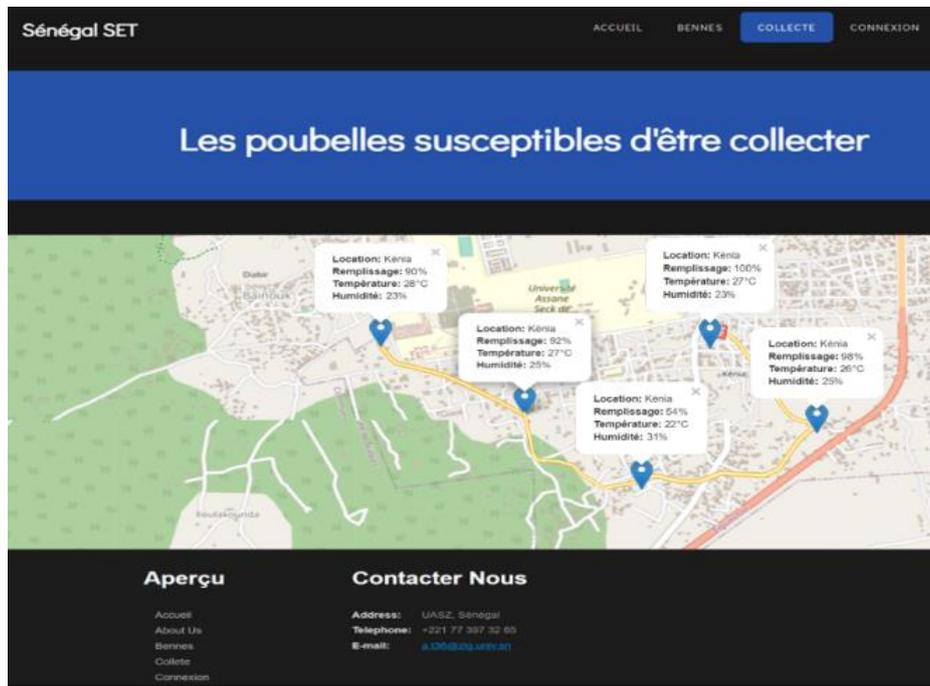


Figure 68 : Page de visualisation des poubelles pleines

IV. Présentation de l'application mobile

Notre application mobile est conçue pour les habitants de la ville qui souhaitent surveiller l'état de leurs poubelles. Une fois pleines, les poubelles publiques les plus proches de chez eux leur seront notifiées. L'application leur permet de visualiser en temps réel le niveau de remplissage de la poubelle devant leur propriété, ainsi que d'autres informations telles que la température et l'humidité de la poubelle.

Pour utiliser l'application, le citoyen doit activer le WiFi sur son téléphone et ouvrir l'application en cliquant sur "MonappliMobile". Il sera alors dirigé vers une interface qui affiche les informations de la poubelle, y compris le niveau de remplissage, la température et l'humidité. Cette interface comporte également deux boutons : l'un pour trouver les poubelles publiques de proximité et l'autre pour voir quel chemin sera pris par le camion de collecte en cas de collecte. L'application permet donc aux citoyens de surveiller leurs poubelles et de contribuer activement à la gestion des déchets de la ville.



Figure 69 : Notre application Mobile

Conclusion

Il convient de noter que ce système de gestion intelligente des déchets a été conçu pour répondre aux besoins des villes sénégalaises, en améliorant la gestion des déchets tout en réduisant les coûts et l'impact environnemental.

Le prototype de poubelle équipé de capteurs a été testé avec succès pour détecter le niveau de

remplissage, la température et l'humidité, et pour transmettre ces données au serveur cloud via les technologies Lora et WiFi.

Le serveur cloud a été conçu pour stocker les données collectées et les analyser pour permettre une meilleure planification des tâches de collecte des déchets, en utilisant les itinéraires les plus efficaces pour les camions de collecte.

Les applications web et mobile ont été développées pour permettre aux utilisateurs de surveiller les niveaux de remplissage de leurs poubelles et de recevoir des notifications lorsque celles-ci sont pleines ou proches de l'être. L'application mobile permet également aux utilisateurs de trouver les poubelles publiques de proximité et de voir le chemin que le camion de collecte prendra pour les collecter.

Dans l'ensemble, notre système de gestion intelligente des déchets propose une solution innovante pour répondre aux besoins des villes intelligentes en matière de gestion des déchets, en utilisant des technologies IoT pour améliorer l'efficacité et réduire les coûts tout en préservant l'environnement

Conclusion Générale et perspectives

Tout au long de ce mémoire, nous nous sommes attelés avec succès à l'étude d'un système de gestion intelligente des déchets basé sur un réseau de communication hybride qui améliorera la filière de la gestion des déchets solides et la salubrité au Sénégal. Le développement et la validation d'une approche d'architecture de réseau hybride pour gérer efficacement les poubelles dans les lieux publics et les zones résidentielles des villes ont été discutés dans ce rapport. Toutes les facettes d'un système IoT ont été développées, y compris la conception des nœuds d'extrémité, c'est-à-dire PEP et PM ; la transmission de données à longue portée avec le réseau LoRa pour les lieux publics et la connectivité Wi-Fi pour les maisons ; le stockage de données à long terme ; et la visualisation du niveau de la corbeille.

Les nœuds d'extrémité de ce projet sont capables de s'ouvrir automatiquement à la détection de présence d'usager dans leur champ de détection, de surveiller leur niveau de remplissage et de les envoyer en temps réel au serveur cloud afin de les transmettre aux applications.

Ce système est mis en œuvre pour pallier les débordements et les mauvaises odeurs des poubelles à ordures que nous observons dans nos villes. Ce système permettra d'encourager les citoyens à utiliser les poubelles en améliorant l'expérience de jet d'ordure par l'ouverture automatique, en réduisant considérablement le coût lié à la sensibilisation tout en augmentant sa portée.

Cependant, le système que nous avons réalisé n'est pas une finalité ; il peut évoluer et connaître de nombreuses améliorations pour ne pas se limiter aux aspects économiques et scientifiques, mais également à l'aspect humanitaire en facilitant le travail des agents de propreté, en plus de rehausser la valeur de ce travail honorable dans la société.

Déjà, la fonctionnalité de détection de niveau de remplissage peut être améliorée en remplaçant le capteur à ultrasons HC-04 par le capteur de niveau et de volume, plus efficace, ou en utilisant un système de radar pour éviter les cas de remplissage asymétrique.

Il serait également possible d'utiliser un mécanisme de compactage de déchets dans le conteneur pour agrandir le temps de remplissage de la poubelle et minimiser le nombre de tours pour les camions.

Il serait également intéressant d'ajouter un module GPRS dans les lieux ne contenant pas d'Internet, et d'ajouter un capteur olfactif pour pouvoir intervenir et ramasser la poubelle qui dégage de fortes odeurs indésirables, même si celle-ci n'est pas programmée dans le planning de collecte.

En fin il nous faut l'intégration de l'intelligence artificielle, pour assurer la présence d'un humain pour l'ouverture de la poubelle.

Bibliographie et webographie

- [1] « Définition - Développement durable | Insee ». <https://www.insee.fr/fr/metadonnees/definition/c1644> (consulté le 8 janvier 2023).
- [2] « Unité de Coordination de la Gestion des déchets solides (UCG) ». https://www.ucg.gouv.sn/docsucg/presentation_ucg.php (consulté le 11 septembre 2022).
- [3] « Unité de Coordination de la Gestion des déchets solides (UCG) ». <https://www.ucg.gouv.sn/docsucg/projets.php> (consulté le 5 janvier 2023).
- [4] « Objet connecté : définition et fonctionnements ». <https://www.1min30.com/dictionnaire-du-web/objet-connecte> (consulté le 10 juillet 2022).
- [5] P. Kassaa, « L'internet des Objets (IoT) et les réseaux hauts et bas débit, est-ce un outil essentiel pour une ville intelligente et moins Polluée ? », p. 71.
- [6] « Architecture IoT : L'essentiel à savoir », *IoT Industriel Blog*, 2 janvier 2022. <https://iotindustriel.com/iot-iiot/architecture-iot-lessentiel-a-savoir/> (consulté le 6 janvier 2023).
- [7] « La technologie RFID, comment ça marche ? », *SBE Direct*. <https://sbedirect.com/fr/blog/article/comprendre-la-rfid-en-10-points.html> (consulté le 25 mars 2023).
- [8] « RFID vs NFC : quelle est la différence entre eux ? -WXR », <https://www.rfidfuture.com/fr>. <https://www.rfidfuture.com/fr/rfid-vs-nfc-whats-the-difference-between-them.html> (consulté le 25 mars 2023).
- [9] « Bluetooth ». <https://web.maths.unsw.edu.au/~lafaye/CCM/bluetooth/bluetooth-intro.htm> (consulté le 25 mars 2023).
- [10] « Réseau Sans-fil : La technologie Wifi - Cours réseau », *cours-gratuit.com*. <https://www.cours-gratuit.com/cours-reseau/reseau-sans-fil-la-technologie-wifi> (consulté le 25 mars 2023).
- [11] F. Kuan, « Technologie de communication sans fil à courte portée vs technologie de communication sans fil à longue portée », *MOKOSmart #1 Solution d'appareil intelligent en Chine*, 8 septembre 2022. <https://www.mokosmart.com/short-range-wireless-communication-technology-vs-long-range-wireless-communication-technology/> (consulté le 25 mars 2023).

[12] « Z-Wave : caractéristiques et évolution du réseau ». <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-de-l-iot/1440712-z-wave-caracteristiques-et-evolution-du-reseau-20221220/> (consulté le 25 mars 2023).

[13] G. R, « LoRa : tout savoir sur ce réseau très utilisé dans l'univers de l'IoT », *Objetconnecte.com*, 2 mai 2022. <https://www.objetconnecte.com/tout-savoir-reseau-lora-bouygues/> (consulté le 2 janvier 2023).

[14] « Technology - Sigfox 0G Technology ». <https://www.sigfox.com/technology/> (consulté le 25 mars 2023).

[15] « Les 5 critères pour choisir sa plateforme IoT ? » <https://www.synox.io/actualites-sectorielle/5-criteres-pour-choisir-sa-plateforme-iot/> (consulté le 9 octobre 2022).

[16] « Définition | Déchet | Futura Planète ». <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/developpement-durable-dechet-5725/> (consulté le 29 juin 2022).

[17] « Senegal-Code-2001-environnement.pdf ». Consulté le : 12 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.droit-afrique.com/upload/doc/senegal/Senegal-Code-2001-environnement.pdf>

[18] *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement - Pierre Merlin, - Librairie Eyrolles*. Consulté le : 10 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.eyrolles.com/BTP/Livre/dictionnaire-de-l-urbanisme-et-de-l-amenagement-9782130630685/>

[19] « Les déchets : un problème ou une ressource ? — Agence européenne pour l'environnement », Consulté le : 29 juin 2022. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.eea.europa.eu/fr/signaux/signaux-2014/articles/les-dechets-un-probleme-ou>

[20]

« [les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf](https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf) ». Consulté le : 12 juillet 2022. [En ligne]. Disponible sur : https://www.spi-vds.org/medias/publications/les_dechets_definition_gestion_collecte_traitement_responsabilites_police_speciale.pdf

- [21] « Cadre général de la prévention des déchets », *Ministères Écologie Énergie Territoires*. <https://www.ecologie.gouv.fr/cadre-general-prevention-des-dechets> (consulté le 2 janvier 2023).
- [22] « Le réemploi et la réutilisation – Paprec ». <https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/seconde-vie/les-differentes-filieres-pour-vos-dechets/reemploi/> (consulté le 2 janvier 2023).
- [23] AlexandreR, « Qu'est-ce que la Collecte des Déchets ? Définition », *Les joyeux recycleurs*, 15 septembre 2022. <https://lesjoyeuxrecycleurs.com/lexique/collecte-des-dechets/> (consulté le 2 janvier 2023).
- [24] F. Massari et J. Gonzales-Feliu, « La collecte et le transport des produits usagés et des déchets dans une optique de logistique inverse. État des connaissances et propositions méthodologiques ».
- [25] « Tri des déchets », *Wikipédia*. 31 octobre 2022. Consulté le : 2 janvier 2023. [En ligne]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Tri_des_d%C3%A9chets&oldid=198260663
- [26] « Le traitement des déchets – Ademe », *Agence de la transition écologique*. <https://expertises.ademe.fr/economie-circulaire/dechets/quoi-parle-t/prevention-gestion-dechets/traitement-dechets> (consulté le 2 janvier 2023).
- [27] « (PDF) Cloud-based smart waste management for smart cities ». https://www.researchgate.net/publication/312422329_Cloud-based_smart_waste_management_for_smart_cities (consulté le 12 octobre 2022).
- [28] « (PDF) Waste Management as an IoT-Enabled Service in Smart Cities ». https://www.researchgate.net/publication/279196726_Waste_Management_as_an_IoT-Enabled_Service_in_Smart_Cities (consulté le 30 juin 2022).
- [29] S. R. J. Ramson, D. J. Moni, S. Vishnu, T. Anagnostopoulos, A. A. Kirubaraj, et X. Fan, « An IoT-based bin level monitoring system for solid waste management », *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 23, n° 2, p. 516-525, mars 2021, doi: 10.1007/s10163-020-01137-9.

- [30] « Sensors | Free Full-Text | A Smart Waste Management Solution Geared towards Citizens ». <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/8/2380> (consulté le 30 juin 2022).
- [31] T. S. Vasagade, S. S. Tamboli, et A. D. Shinde, « Dynamic solid waste collection and management system based on sensors, elevator and GSM », in *2017 International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, mars 2017, p. 263-267. doi: 10.1109/ICICCT.2017.7975200.
- [32] S. Azad, A. Rahman, A. T. Asyhari, et A.-S. K. Pathan, « Crowd Associated Network: Exploiting over a Smart Garbage Management System », *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, n° 7, p. 186-192, juill. 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600379.
- [33] Shweta Dhawan Chachra et K. J. Somaiya College of Engineering, Vidyavihar, Mumbai, « Smart Dustbins - Automatic Segregation Efficient Solid Waste Management using IoT Solutions for Smart Cities », *Int. J. Eng. Res.*, vol. V8, n° 12, p. IJERTV8IS120303, janv. 2020, doi: 10.17577/IJERTV8IS120303.
- [34] A. J. Pranay Mahajan*1, « Implementation Of Municipal Solid Liquid Based Smart Waste Management System- Zero Waste Using Internet Of Thing », août 2018, doi: 10.5281/ZENODO.1345602.
- [35] N. Sharma, N. Mishra, et P. Gupta, « IoT based garbage monitoring system », p. 5, 2018.
- [36] M. S. Chaudhari, B. Patil, et V. S. Raut, « IoT based Waste Collection Management System for Smart Cities: An Overview », *2019 3rd Int. Conf. Comput. Methodol. Commun. ICCMC*, 2019, doi: 10.1109/ICCMC.2019.8819776.
- [37] A. Bano, I. Ud Din, et A. A. Al-Huqail, « AIoT-Based Smart Bin for Real-Time Monitoring and Management of Solid Waste », *Sci. Program.*, vol. 2020, p. 1-13, déc. 2020, doi: 10.1155/2020/6613263.
- [38] M. N. Rajaprabha, P. Jayalakshmi, R. V. Anand, et N. Asha, « IOT BASED SMART GARBAGE COLLECTOR FOR SMART CITIES », p. 5.
- [39] A. Sena, B. Michael, et M. Howard, « Improving Task-Parameterised Movement Learning Generalisation with Frame-Weighted Trajectory Generation », in *2019 IEEE/RSJ*

International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), nov. 2019, p. 4281-4287.
doi: 10.1109/IROS40897.2019.8967688.

[40] « Homepage », *LoRa Alliance*®. <https://lora-alliance.org/> (consulté le 25 mars 2023).

[41] I. R. McAndrew et E. Vishnevskaya, « Is the Sky Above us Safe and How Has This Been Influenced by the Past and Present Policies? : Unmanned Aerial Systems and their Cybersecurity Implications », in *2018 9th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE)*, juill. 2018, p. 435-439. doi: 10.1109/ICMAE.2018.8467686.

[42] N. Lee, « Comment le capteur LoRa envoie et reçoit des données », *MOKOSmart #1 Solution d'appareil intelligent en Chine*, 5 novembre 2019.

<https://www.mokosmart.com/how-does-lora-sensor-send-and-receive-data/> (consulté le 1 janvier 2023).

[43] « Quel est le mode de fonctionnement d'une carte Wifi ? », *INMAC WSTORE*.
<https://www.inmac-wstore.com/guides-achat-composants-fonctionnement-carte-wifi/cp37687.htm> (consulté le 1 janvier 2023).

[44] « Définition du réseaux wifi - 910 Mots | Etudier ».
<https://www.etudier.com/dissertations/D%C3%A9finition-Du-R%C3%A9seaux-Wifi/463392.html> (consulté le 1 janvier 2023).

[45] « LoRaWAN : Conception et mise en œuvre pour l'IoT », *IoT Industriel Blog*, 3 janvier 2022. <https://iotindustriel.com/iot-iiot/lorawan-conception-et-mise-en-oeuvre-pour-liot/> (consulté le 1 janvier 2023).

[46] « IP-1-C2-F-Notion-d'algorithme-de-routage.pdf ». Consulté le: 6 octobre 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://ent2d.ac-bordeaux.fr/disciplines/sti-college/wp-content/uploads/sites/63/2019/05/IP-1-C2-F-Notion-d%E2%80%99algorithme-de-routage.pdf>

[47] « Carte Arduino Uno Rev3 – Thies Innovation Center ».
<https://thiesinnovationcenter.com/product/carte-arduino-uno/> (consulté le 8 janvier 2023).

[48] Isaac, « ESP8266: le module WIFI pour Arduino », *Hardware libre*, 10 juin 2019.
<https://www.hwlibre.com/fr/espXNUMX/> (consulté le 11 juillet 2022).

- [49] Thomas, « Guide complet du capteur à ultrasons HC-SR04 avec Arduino », *Raspberryme*, 21 juillet 2021. <https://www.raspberryme.com/guide-complet-du-capteur-a-ultrasons-hc-sr04-avec-arduino/> (consulté le 11 juillet 2022).
- [50] Futura, « Définition | GPS - Global Positioning System | Futura Tech », *Futura*. <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/technologie-gps-1897/> (consulté le 5 janvier 2023).
- [51] S. CUBE, « SMART CUBE », *SMART CUBE*, 9 octobre 2019. <https://www.smart-cube.biz/produit/module-neo-6m-gps/> (consulté le 5 janvier 2023).
- [52] « Reyax RYLR998 LoRa Module with Arduino. » <https://www.technolabcreation.com/re yax-rylr998-lora-module-with-arduino/> (consulté le 5 janvier 2023).
- [53] « Capteur de température et d'humidité DHT11 DHT22 », *Tutoduo*, 11 septembre 2021. <https://tutoduo.fr/debuter/capteur-temperature/> (consulté le 15 février 2023).
- [54] « Cours pour débiter sur Arduino », *Developpez.com*. <https://arduino.developpez.com/tutoriels/arduino-a-l-ecole/> (consulté le 5 janvier 2023).
- [55] « Arduino Integrated Development Environment (IDE) v1 | Arduino Documentation ». <https://docs.arduino.cc/software/ide-v1/tutorials/arduino-ide-v1-basics> (consulté le 7 janvier 2023).
- [56] « ThingSpeak Documentation ». <https://www.mathworks.com/help/thingspeak/> (consulté le 7 janvier 2023).
- [57] « Tutoriel XAMPP : Installation et premiers pas », *IONOS Digital Guide*. <https://www.ionos.fr/digitalguide/serveur/outils/tutoriel-xampp-creer-un-serveur-de-test-local/> (consulté le 7 janvier 2023).
- [58] « PHP : définition simple et détaillée », *JobPhoning*, 30 juillet 2020. <https://jobphoning.com/dictionnaire/php> (consulté le 22 janvier 2023).
- [59] « Qu'est-ce que le JavaScript ? - Apprendre le développement web | MDN ». https://developer.mozilla.org/fr/docs/Learn/JavaScript/First_steps/What_is_JavaScript (consulté le 22 janvier 2023).

[60] «  OpenStreetMap - Définition et Explications », *Techno-Science.net*.
<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/OpenStreetMap.html> (consulté le 22 janvier 2023).

[61] « MIT App Inventor ». <https://appinventor.mit.edu/> (consulté le 7 janvier 2023).