

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERRI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

**Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER PROFESIONNEL INSCRIT DANS LE
CADRE 1275**

Domaine : **Sciences et Technologies**

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Electronique Industrielle**

Présenté par :

Mr. Fares BOUHNİK

M.Ile Amina BOUTERA

M.Ile Thinhinane BENETTOUMI

Thème :

**Conception et réalisation d'un système de
reconnaissance avec une optimisation et
réalisation d'un mécanisme de tri pour une
poubelle intelligente**

Encadré par:

M. Mourad LAZRI

Année universitaire 2023-2024

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et la patience d'achever ce modeste travail.

Nous exprimons notre gratitude et tenons à remercier monsieur Lazeri Mourad, qui nous a encadrés. Pour tout le temps qu'il a consacré à diriger notre travail, ainsi que sa grande connaissance dans le domaine, qui ont joué un rôle important dans la conception de ce travail. Nous lui témoignons toute notre reconnaissance et notre profond respect.

Nous remercions aussi mademoiselle Taleb Thiziri et messieurs Bouhnik Belkacem ainsi Mr Feddag Idir pour l'aide qu'ils nous ont apporté, leurs patiences, encouragement, et leurs disponibilité.

Nous présentons nos sincères remerciements aux membres de l'incubateur de l'UMMTO, à la directrice madame Chikh Amnache, à madame Hamlile, à Mr Bechouche Ali, à monsieur Seddiki, à monsieur Mouli et à tous les formateurs qui nous ont offert des formations gratuites et prodigué leurs judicieux conseils, essentiels à la formulation puis à l'élaboration de ce travail. Nous leur exprimons notre profonde gratitude pour leur présence tout au long de ce travail.

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

Nous remercions également tous les enseignants qui ont contribué à notre formation et à notre éducation tout au long de notre cursus universitaire.

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

SOMMAIRE

Chapitre I : La gestion des déchets et les poubelles intelligentes

I.1	Introduction.....	3
I.2	Définition des déchets	3
I.2.1	Différents types des Déchets	4
I.3	Impact des déchets sur l'environnement	4
I.4	La gestion des déchets en Algérie	5
I.4.1	Présentation des différents services de gestion des déchets en Algérie.....	6
I.4.2.	Problèmes de la gestion des déchets en Algérie.....	7
I.5	Innovation technologique dans le domaine de la gestion des déchets	8
I.5.1.	Groupe Abdulla Al Mamun et AL	9
I.5.2.	Groupe Mr. MEKAMCHA Khalid	10
I.6	Conclusion.....	14

Chapitre II : Différentes techniques de tri des déchets

II.1	Introduction.....	15
II.2	Méthodes de tri.....	15
II.2.1	Tri mécanique	16
□	Réception et Prétraitement	16
□	Broyage	16
□	Séparation des matières :	16
□	Valorisation énergétique et recyclage	17
II.2.2	La méthode de poids.....	17
II.2.2.1	Types de capteurs de poids.....	17
II.2.2.	Principe de Fonctionnement des Capteurs de Poids.....	18

II.2.3	Méthode de son	19
II.2.3.1	Définition.....	19
II.2.3.2	Tri à base de son produit lors de l'écrasement des déchets.....	19
II.2.3.3	Le tri a bas de son produit par la chute.....	20
II.2.4	Vision par ordinateur	21
II.2.4.1	Définition.....	21
II.2.4.2	Les outils appliqués en vision par ordinateur.....	21
II.2.4.3	Les types d'algorithmes utilisés.....	23
a	.Les algorithmes de détection d'objet.....	23
b	. Les algorithmes de segmentation d'images.....	23
c	. Les algorithmes de classification d'images.....	24
d	. Les algorithmes de reconnaissance.....	25
II.2.5	Système de Traitement des Déchets Basé sur l'Apprentissage Automatique ...	26
II.2.5.1	Définition.....	26
II.2.5.2	Typed'apprentissage.....	26
a	. Apprentissage supervisé.....	27
b	. Apprentissage non supervisé.....	27
c	. Apprentissage par renforcement.....	27
d	. Apprentissage profond.....	27
II.3	Conclusion.....	28

Chapitre III : conception d'une poubelle intelligente du tri

III.1	Introduction :	29
III.2	Conception du système du tri intelligent.....	30
III.2.1	Détection d'objet (Déchets).....	32
III.2.1.1	Capteur d'obstacle infrarouge.....	32
III.2.2	Prise de photo.....	33
III.2.2.1	ESP 32 CAM AI Thinker	34
III.3	Reconnaissance du type d'objet.....	36
III.4.3	Bibliothèque pour implémentation (TensorFlow)	38
III.4	Placement dans le compartiment approprié :	39
III.4.2	Servomoteur Sg90	40
III.4.3	Moteur pas à pas.....	42
III.5	Détection du niveau de remplissage	43
III.6	Conclusion :	44

Chapitre IV : Réalisation et test de fonctionnement

IV.1	Introduction	44
IV.2	Environnement logiciel.....	44
❖	Python :.....	44
IV.2.1	Préparation des Données d'apprentissage.....	45
IV.2.2	Entraînement du Modèle CNN sous TensorFlow	46
IV.2.3	Architecture de Tensorflow :	47
IV.2.4	Conversion du Modèle en TensorFlow.js	48

IV.2.5	Programmation de l'ESP32-CAM.....	48
IV.2.6	Fonctionnement Général de notre Machine du Tri des Déchets.....	49
IV.2.7	Détection du niveau de remplissage.....	52
IV.2.8	Test et résultats :.....	53
IV.3	Affichage sur le site web.....	56
IV.4	Conclusion :.....	57

LISTE DES FIGURES

Fig.I.1 : L'impact des déchets sur l'environnement

Fig I. 2: la décharge des déchets en Algérie

Fig.I.3 : Prototype de poubelle intelligente

FigI.4: (a) Détection de l'état du couvercle.

(b) Niveau de remplissage des déchets et détection du poids.

FigI.5: Serveur cloud

Fig II .1 : Exemple de tri manuel.

Fig II.2 :Utilisation de la vision par ordinateur.

Fig III.1 : Le schéma synoptique de la conception

Fig.III. 2 : Organigramme de la conception

Fig. III.3 : Capteur d'obstacle infrarouge (a) et son brochage avec esp 32 (b).

Fig.III.4: Caractéristiques techniques du module ESP32-CAM –USB

Fig III.5: Schéma représentant l'architecture d'un CNN

Fig III.6 : Représentation de la carte Esp32

Fig.III.7: servomoteur SG90 branché a esp32

Fig.III.8: 28BYJ-48 avec le pilote ULN2003 relié à esp32

Fig III.9 : Capteur Ultrasonique HC-SR04

Fig IV.1 : les differenetes catégorie de déchets

Fig IV.2 : Apprentissage du CNN pour reconnaître une classe parmi quatre.

Fig IV.3 : bibliothèque d'entraînement du modèle TensorFlow

Fig IV.4 : Apprentissage et Enregistrement d'un modèle de classification des déchets

Fig IV .5 : Conversion de modèle vers TensorFlow.js

Fig IV.6 : Partie du programme de fonctionnement du moteur pas à pas

Fig IV.7 : Partie du programme de fonctionnement du servomoteur

FIG IV.8 : bac rotatif (a) /partiede traitement (b)

FIG IV.9 : résultats des déchets testés

FIG IV.10 : résultats de la matrice de confusion

Fig IV.11: interface web

Fig IV.12: pourcentage des déchets dans chaque bac

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La gestion des déchets est un enjeu majeur pour les sociétés contemporaines, confrontées à des défis environnementaux, économiques et sociaux croissants. Avec l'urbanisation rapide, l'augmentation de la population et les changements dans les modes de consommation, la quantité de déchets produits ne cesse d'augmenter [1].

Dans ce contexte, la gestion efficace des déchets devient cruciale non seulement pour réduire leur impact environnemental, mais aussi pour promouvoir une économie circulaire, améliorer la qualité de vie et répondre aux exigences réglementaires. L'une des solutions innovantes pour répondre à ce défi est l'intégration de technologies intelligentes dans la gestion des déchets, et plus particulièrement dans le tri sélectif. Le tri des déchets à la source est une étape essentielle pour assurer le recyclage et la valorisation des matériaux, réduire la quantité de déchets envoyés en décharge et limiter l'empreinte carbone des activités humaines [2].

A cet effet, plusieurs systèmes de tri de déchets ont été réalisés, tels que les systèmes de tri automatisés dans les centres de traitement des déchets et les poubelles de tri sélectif à usage domestique. Ces systèmes sont basés principalement sur des technologies telles que la reconnaissance optique, la détection par capteurs, l'intelligence artificielle et la robotique. Par exemple, certains systèmes utilisent des caméras et des algorithmes de vision par ordinateur pour identifier et trier automatiquement les différents types de matériaux, tandis que d'autres utilisent des capteurs de poids ou des détecteurs de métaux pour faciliter le tri. Le choix d'un système de tri peut dépendre de plusieurs facteurs, comme l'endroit d'installation, le type de déchets, le système d'alimentation... Certains systèmes peuvent s'avérer efficaces pour un type de déchet, d'autres présentent des anomalies dans le fonctionnement. Malgré les efforts qui ont été faits dans ce sens, il y a toujours des améliorations à apporter. Par exemple, l'apport des modèles d'apprentissage automatique dans la classification des déchets sera considérable. Ces dernières années, le deeplearning a montré des taux de bonne classification avoisinant les 100%. L'implémentation des réseaux de neurones convolutifs basée sur l'apprentissage profond dans les systèmes de tri permet de révolutionner et de rendre très efficace la gestion des déchets.

Dans ce contexte, dans le cadre de notre projet, nous proposons la conception et la réalisation d'une poubelle intelligente de tri des déchets basée sur l'apprentissage profond, capable de prendre en compte n'importe quel type de déchets et le classer pour être affecté au bon bac. Il s'agit d'un premier prototype appliqué dans un premier temps à identifier le plastique, le papier et l'aluminium. Le principe de fonctionnement consiste à implémenter un réseau de neurones convolutifs entraîné sur une série de photos prises dans différentes positions des déchets. Pour inclure un autre type de déchets, il faut modifier la base de données. Ainsi, le prototype peut évoluer pour intégrer tous les types de déchets. Notre système équipé de capteurs et de technologies de reconnaissance, vise à faciliter le tri des déchets pour les utilisateurs et aussi motiver le recyclage et le faciliter cette opération. En exploitant les avancées en matière d'intelligence artificielle, de capteurs et de mécanismes automatisés, cette solution ambitionne de transformer la manière dont les déchets sont gérés à la maison, dans les entreprises et dans les espaces publics. Cette innovation réduit la nécessité d'une intervention humaine, diminue les erreurs de tri et augmente la quantité de matériaux recyclables collectés.[3][4][5]

Pour bien structurer notre mémoire, nous avons scindé le travail en cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur la gestion des déchets, les technologies de tri et les initiatives existantes dans ce domaine.
- Le deuxième chapitre contient les différentes techniques et matérielles employées pour le tri des déchets. Ces techniques sont discutées dans ce chapitre.
- Dans le troisième chapitre, nous présentons la conception de notre poubelle intelligente et identifions les différents dispositifs nécessaires pour la mise en œuvre du système.
- Nous présentons dans le quatrième chapitre la réalisation du système et nous montrons les différents tests de fonctionnement.

CHAPITRE I

LA GESTION DES DÉCHETS ET LES POUBELLES INTELLIGENTES

I.1 Introduction

La gestion des déchets est un enjeu crucial qui nécessite une approche proactive pour réduire les coûts et protéger l'environnement. Depuis les années 1990, la question des déchets est devenue une préoccupation collective, touchant chaque individu dans sa vie professionnelle et personnelle. Chacun peut contribuer à une meilleure gestion des déchets en adoptant des gestes simples tels que le tri sélectif et le recyclage. Les établissements d'enseignement supérieur et de recherche ont un rôle essentiel à jouer en mettant en place des politiques de gestion des déchets efficaces pour limiter les coûts et préserver la santé publique et l'environnement.

La philosophie entourant les déchets est complexe, mêlant des aspects sociaux, techniques, scientifiques, anthropologiques, et moraux. Les travaux sur la gestion des déchets soulignent l'importance de considérer les déchets comme des ressources potentielles à valoriser plutôt que comme un fardeau à éliminer [6].

Dans ce chapitre, nous allons présenter des généralités sur la gestion des déchets, et nous détaillons particulièrement le cas de l'algerie. Ensuite, nous introduirons différents systèmes utilisés pour aider à la gestion des déchets qui consistent en des poubelles intelligentes. Donnons aussi le principe de fonctionnement de ces systèmes.

I.2 Définition des déchets

Un déchet (détritus, ordure, résidu, etc.) désigne la quantité perdue dans l'usage d'un produit, ce qui en reste après son utilisation. De nos jours, ce terme tend à désigner n'importe quel objet ou substance ayant subi une altération d'ordre physique ou chimique, ou qui ne

présente plus d'utilité et le destinant à l'élimination ou au recyclage (Il est alors parfois nommé recyclât).

Ce terme est aussi en usage pour les objets répandus dans la nature par l'homme, le vent, etc.

Quand ils se trouvent en mer, ils font partie des laines de mer. "Laine de terre" ne semble pas l'équivalent pour la terre.

Selon une formule employée notamment en logistique, « le meilleur déchet est celui que l'on ne produit pas. »

Voici la définition très précise du déchet donnée par la loi française :

" Est un déchet tout résidu d'un processus de production, de transformation ou d'utilisation, toute substance, matériau, produit... que son détenteur destine à l'abandon. (**Article 1 de la loi du 15 juillet 1975, modifiée par la loi n°92-646 du 13 juillet 1992**). [7]

I.2.1 Différents types des Déchets

Les différents types de déchets sont classés en fonction de leur nature, de leur provenance et de leur caractère toxique. Voici une liste des principaux types de déchets :

- **Déchets Ménagers** : Ce type de déchets est généré par les ménages et comprend les ordures ménagères à incinérer ainsi que les déchets recyclables triés dans la vie quotidienne.
- **Déchets Industriels** : Les déchets industriels proviennent des activités économiques et sont produits par des entreprises ou des industriels. Ils peuvent être similaires aux déchets ménagers mais sont générés par des entités commerciales.
- **Déchets Toxiques** : Ces déchets proviennent des activités économiques et représentent un danger pour la santé et l'environnement en raison de leur toxicité.
- **Déchets d'Activités de Soins** : Ces déchets, à risques infectieux, nécessitent un traitement spécifique en raison de leur nature médicale ou vétérinaire.
- **Déchets Inertes** : Les déchets inertes peuvent être réutilisés pour des applications telles que les sous-couches routières ou enfouis dans des centres spécialisés.
- **Déchets Agricoles** : Ces déchets proviennent des activités agricoles et nécessitent un traitement spécifique dans des installations adaptées.
- **Déchets Radioactifs** : Les déchets radioactifs sont confiés à des organismes spécialisés pour une gestion sûre en raison de leur nature radioactive.

En comprenant la diversité des types de déchets, il est possible d'adopter des stratégies efficaces pour leur gestion, réduction et recyclage afin de préserver l'environnement et la santé publique.

I.3 Impact des déchets sur l'environnement

Les déchets sont des substances qui sont nocives pour la santé humaine et pour l'environnement. Si elles sont jetées de façon inappropriée, ces substances toxiques peuvent se rassembler dans les organismes vivants à l'aide de l'air, de l'eau polluée et des aliments contaminés. Du côté environnemental, la pluie acide, le smog et la pollution atmosphérique sont reconnus comme de graves dangers pour la santé. En plus, cette pollution a de nombreux

effets néfastes sur l'être humain. Les malformations, le dysfonctionnement reproductif, les

tumeurs et la mortalité des embryons, en sont de bons exemples [8]. (Fig.I.1)





Fig.I.1 : L'impact des déchets sur l'environnement

I.4 La gestion des déchets en Algérie

En Algérie, la gestion des déchets municipaux est une priorité pour le ministère de l'Environnement depuis plusieurs décennies. Des mesures et des organisations ont été mises en place pour améliorer ce service. Depuis 2001, le gouvernement s'est engagé à améliorer la gestion des déchets municipaux en utilisant divers moyens techniques. [9]

Cependant, la quantité de déchets a augmenté en raison de la croissance démographique. Sans mesures préventives, la production de déchets pourrait dépasser 30 millions de tonnes d'ici 2025[10]. Les sites d'enfouissement comme méthode d'élimination ont entraîné des coûts supplémentaires pour les collectivités locales, et le financement de ces installations reste difficile à mettre en œuvre (Fig.1.2). Il est essentiel d'améliorer la qualité des services pour inciter les ménages à contribuer financièrement aux coûts de collecte et de traitement des déchets. La sensibilisation du public et la mise en place de mesures incitatives sont nécessaires pour encourager une meilleure gestion des déchets municipaux en Algérie.



FigI.2 : la décharge des déchets en Algérie

I.4.1 Présentation des différents services de gestion des déchets en Algérie

En Algérie, la gestion des déchets est un enjeu crucial en raison de la croissance démographique et urbaine rapide, ainsi que de l'industrialisation du pays.

Avant l'indépendance en 1962, la gestion des déchets en Algérie était rudimentaire, avec peu d'infrastructures dédiées et une sensibilisation limitée. Dans les premières décennies post-indépendance, le pays a connu une croissance économique rapide, entraînant une urbanisation accélérée et une augmentation significative de la production de déchets. Cependant, la gestion des déchets est longtemps restée une préoccupation secondaire, avec des problèmes d'infrastructures inadaptées et de planification insuffisante. Au fil des décennies, l'Algérie a progressivement mis en place des politiques et des programmes visant à améliorer la gestion des déchets, en mettant l'accent sur la collecte, le traitement et la sensibilisation.

- **Présentation des services de gestion des déchets :**

- ❖ **Collecte des déchets** : La collecte des déchets est assurée par des municipalités ou des entreprises privées dans certaines régions. Cependant, dans de nombreuses zones, en particulier dans les zones rurales et les quartiers informels, la collecte est irrégulière ou absente.
- ❖ **Traitement des déchets** : En Algérie, le traitement des déchets comprend principalement l'enfouissement, la valorisation organique et le recyclage. Les décharges contrôlées et les sites d'enfouissement sont les principales méthodes de traitement, bien que le recyclage soit de plus en plus encouragé.
- ❖ **Valorisation organique** : La valorisation organique, notamment le compostage, est promue comme une méthode de réduction des déchets et de production d'engrais naturels. Certaines initiatives communautaires et municipales sont en place pour encourager cette pratique.
- ❖ **Recyclage** : Le recyclage en Algérie est encore relativement sous-développé, mais il existe des efforts pour promouvoir cette pratique. Des entreprises privées et des

organisations non gouvernementales sont impliquées dans la collecte et le recyclage de certains matériaux, tels que le plastique, le papier et le verre.

- ❖ **Sensibilisation et éducation** : Les autorités algériennes mènent des campagnes de sensibilisation pour encourager la réduction à la source, le tri des déchets à la source et la sensibilisation à l'importance de la gestion des déchets pour l'environnement et la santé publique.

Malgré ces efforts, la gestion des déchets en Algérie reste confrontée à des défis majeurs, notamment l'insuffisance des infrastructures, le manque de sensibilisation du public et la nécessité d'une meilleure coordination entre les différents acteurs impliqués. Cependant, le gouvernement et la société civile continuent de travailler ensemble pour améliorer la situation et promouvoir des pratiques plus durables de gestion des déchets.

I.4.2.Problèmes de la gestion des déchets en Algérie

Les principaux défis de la gestion des déchets en Algérie incluent :

- ❖ **Augmentation de la production de déchets** : La population algérienne est en constante croissance, ce qui entraîne une augmentation constante de la production de déchets ménagers et assimilés.
- ❖ **Insuffisance des infrastructures de collecte et de traitement** : Les infrastructures de collecte et de traitement des déchets sont insuffisantes pour gérer la quantité de déchets produits en Algérie.
- ❖ **Mauvaise gestion des déchets spéciaux** : Les déchets spéciaux, tels que les déchets dangereux et inertes, sont mal gérés et peuvent avoir des impacts négatifs sur l'environnement et la santé publique.
- ❖ **Manque de sensibilisation au recyclage et à la valorisation des déchets** : La population algérienne n'est pas suffisamment sensibilisée à la nécessité de recycler et de valoriser les déchets, ce qui entraîne une mauvaise gestion des déchets.
- ❖ **Incivisme et mauvaise gestion des déchets** : L'incivisme et la mauvaise gestion des déchets sont des problèmes récurrents en Algérie, ce qui entraîne une pollution environnementale importante.

- ❖ **Financement insuffisant des infrastructures de collecte et de traitement :** Les infrastructures de collecte et de traitement des déchets sont financées principalement par les collectivités locales, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires pour les collectivités et une mauvaise gestion des déchets.

Pour surmonter ces défis, l'Algérie a adopté plusieurs politiques et programmes, tels que la Stratégie Nationale de l'Environnement (SNE) et le Progdem, pour améliorer la gestion des déchets et réduire leur impact sur l'environnement et la santé publique.

I.5 Innovation technologique dans le domaine de la gestion des déchets

Des systèmes de gestion de déchets sont mis au point. On peut citer les innovations du groupe Abdullah Al Mammun et Al Et le groupe de M. Mekamcha Khalid , qui ont développé des systèmes de poubelles intelligentes connectées, permettant une gestion optimisée des déchets via des applications mobiles, favorisant ainsi une collecte plus efficace et une réduction des coûts de gestion. Ces avancées technologiques marquent un pas important vers une gestion des déchets plus durable et efficace.

I.5.1. Groupe Abdulla Al Mamun et AL [11]

Ils ont présenté la mise en œuvre et l'exécution d'un système de détection intégré et d'un algorithme pour la corbeille à déchets solides afin d'automatiser le processus de gestion des déchets solides. Plusieurs méthodes de détection ont été intégrées et ont combiné leurs verdicts qui offrent la détection de la condition de la corbeille et la mesure de ses paramètres. Un certain nombre d'essais ont été effectués pour évaluer le fonctionnement du système prototype.

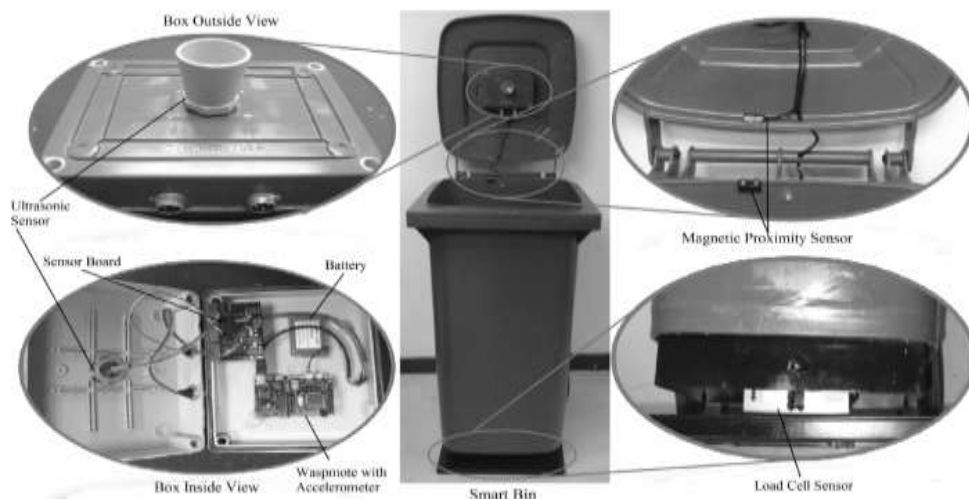


Fig.I.3 : Prototype de poubelle intelligente.

• **Principe du fonctionnement :**

Le système automatique développé offre les données d'état de la poubelle en temps réel issues de trois systèmes de détection : détection de l'état du couvercle, détection du niveau de déchet et détection du poids. Les systèmes individuels sont décrits ci-dessous.

❖ **Détection de l'état du couvercle :**

La structure fonctionnelle du système de détection de l'état du couvercle est mise en œuvre pour suivre l'initialisation du chargement et du déchargement des déchets et percevoir l'état de débordement de la corbeille, comme indiqué sur la Fig.1.4 (a). Les données du capteur d'accéléromètre sont accumulées pour fournir la dérive et sa direction pour identifier l'ouverture / la fermeture du couvercle. L'accélération « A » est définie comme suit :

$A = (A_x, A_y, A_z)$ Où A_x , A_y et A_z représentent l'accélération vers les axes x , y et z . Le capteur de proximité magnétique indique si le couvercle est correctement fermé ou non en utilisant un commutateur à lames et un aimant permanent. L'interrupteur peut changer d'état du fait de l'aimantation ou de la polarisation provoquée par l'aimant lorsqu'un conducteur fixé dans le couvercle pénètre dans le champ magnétique monté dans la partie supérieure.

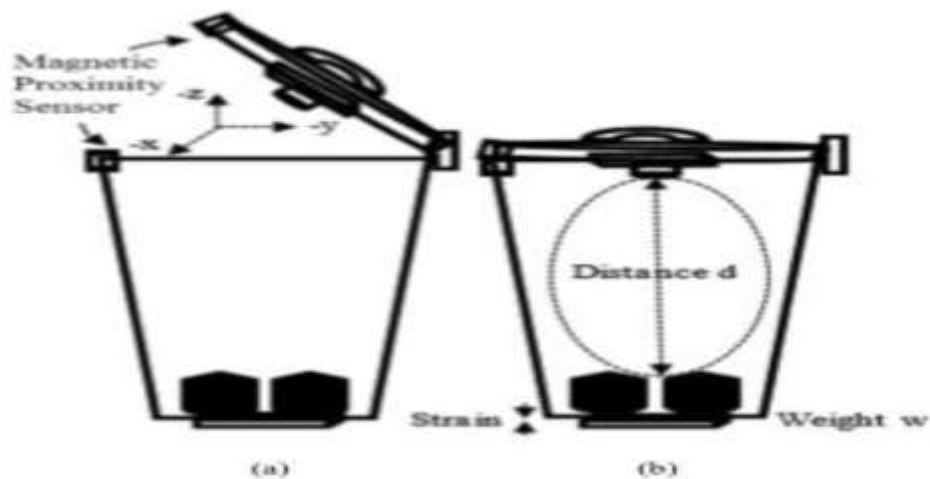


Fig.I.4: (a) Détection de l'état du couvercle.
(b) Niveau de remplissage des déchets et détection du poids.

❖ **Détection du niveau de remplissage des déchets :**

La détection du niveau de remplissage des déchets à l'intérieur d'une corbeille est basée sur la mesure du temps d'émission et de réception du signal ultrason, c'est-à-dire le temps de parcours complet du retour, une impulsion ultrasonore permettant de transmettre et de

recevoir son écho réfléchi entre le capteur et le niveau de matériau détecté comme le montre la Fig.1.4 (b).

❖ **Mesure du poids :**

L'estimation du poids des déchets à l'intérieur d'une poubelle est basée sur le principe d'un conducteur électrique dont la résistance change lorsque sa longueur change en fonction de la contrainte et qui est pratiquement proportionnelle à la contrainte appliquée, comme indiqué sur la Fig.1.4 (b). Un réseau de ponts de Wheatstone est construit en utilisant au moins quatre jauges de contrainte et quatre résistances distinctes. Les déchets à l'intérieur de la corbeille provoquent une variation de valeur d'une ou plusieurs résistances en raison de la contrainte générée par l'élément métallique contenant les jauges de contrainte. Ainsi, la tension de sortie du pont est modifiée avec cette variation de résistance proportionnelle au poids des déchets.

I.5.2.Groupe Mr. MEKAMCHA Khalid [12]

L'une des techniques les plus importantes de l'ère moderne est l'existence de l'Internet des objets, qui a provoqué de grandes disparités dans nombre de nos domaines quotidiens. Les auteurs ont présenté un modèle de développement durable, à savoir la conception d'une poubelle intelligente, qui mesure le taux de remplissage d'une poubelle et l'emplacement de cette dernière à l'aide d'un Smartphone et de l'application (poubelle intelligente).

Avec ce projet, il sera plus facile de surveiller l'état des poubelles à distance et en temps réel, conformément à la technologie du 21ème siècle.

• **Principe de fonctionnement :**

Développé deux systèmes, une réalisation avec connexion Bluetooth et une autre avec connexion Wifi, les deux versions de cette application « Poubelle intelligente » vont permettre de localiser et de se connecter à distance, à n'importe quelle poubelle pour connaître en temps réel son taux de remplissage pour la méthode Wifi et de se connecter au contact de la poubelle dans la méthode Bluetooth.

❖ **Première méthode « Bluetooth » :**

Le principe de fonctionnement du système de la première méthode « Réalisation avec connexion Bluetooth » dépend de l'envoi des mesures de niveau de remplissage des poubelles à l'application Android via une connexion Bluetooth.

Ce projet est divisé en trois parties principales :

- 1. Partie électronique** : capteur ultrasons, ArduinoUno, Bluetooth, LED, servomoteur
- 2. Partie télécommunication** : Bluetooth, Smartphone (application Android) ;
- 3. Partie informatique** : application Android.

Initialement, le capteur, placé sur le couvercle de la poubelle, calcule la longueur de référence quand la poubelle est complètement vide, le pourcentage de remplissage de celle-ci sur sa longueur mesurée à vide est défini à 0 %, on appelle cette procédure, Calibration.

Cette méthode permet au capteur de connaître la longueur de toute poubelle et de n'importe quel objet, pour calculer avec précision le niveau de remplissage.

Le capteur à ultrasons utilise un sonar pour déterminer la distance à un objet avec une précision élevée et des lectures stables. Par l'utilisation d'émetteurs et récepteurs à ultrasons. Le rôle du servomoteur est de tourner à un angle de 60 degrés en continu et des deux côtés pour balayer toute la zone de mesure.

Le capteur transmet ces mesures à Arduino, qui à son tour les envoie au module Bluetooth par les ports TX et RX. Le module Bluetooth envoie ensuite ces données à l'application Android.

L'application Android nous permet de connaître le niveau de remplissage de chaque poubelle.

Montage général de la première méthode :

Après avoir expliqué comment lier chaque outil à Arduino, nous allons maintenant expliquer l'assemblage général des composants sur la fig.1 .5 et présenter une image réelle de notre prototype de poubelle intelligente sur la figure

Les composants du système :

1 : Arduino UNO.

2 : Servomoteur.

3 : Capteur ultrason HC-SR04.

4 : LED.

5 : Résistance 1K.

6 : Résistance 20K.

7 : Résistance 220Ohm.

❖ Deuxième méthode (Wifi) :

Principe de fonctionnement :

Ce projet est divisé en trois parties principales :

1. Partie électronique : capteur ultrasons, NodeMCU ESP8266 V3, servomoteur.

2. Partie télécommunication : NodeMCU ESP8266 V3(Wifi), serveur cloud, Smartphone (Application Android).

3. Partie informatique : application Android, serveur cloud. Le capteur à ultrasons utilise un sonar pour déterminer la distance à un objet avec une précision élevée et des lectures stables. Par l'utilisation d'émetteurs et récepteurs à ultrasons.

Le rôle du servomoteur est de tourner à un angle de 60 degrés en continu et des deux côtés pour balayer toute la zone de mesure.

Le capteur transmet ces mesures à la carte de développement NodeMCU ESP8266 V3, qui à son tour traite ces données et les envoyer au serveur cloud par Wifi (il faut connecter NodeMCU ESP8266 V3 à internet). L'application Android obtient les résultats à partir du serveur cloud et nous permet de connaître le niveau de remplissage de chaque poubelle.

Els a utilisé le serveur cloud Firebase (Fig.I.5) pour stocker les données envoyées par NodeMCUESP8266 V3 obtenues par l'application Android.

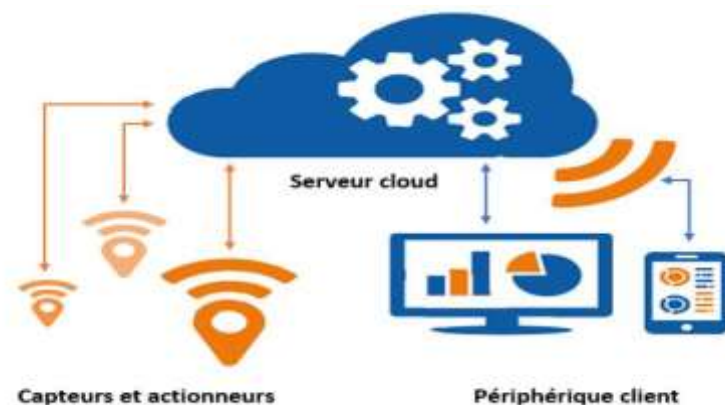


Fig.I.5: Serveur cloud.

❖ La différence entre les deux méthodes (Bluetooth, Wifi) :

Dans la méthode avec connexion Bluetooth, le camion devra se déplacer jusqu'à l'emplacement de la poubelle, ce n'est qu'une fois la connexion Bluetooth établie entre le camion et la poubelle que le chauffeur pourra connaître son niveau de remplissage, il pourra décider par la suite s'il doit la ramasser ou pas. Si la poubelle est vide, le camion ne va pas la ramasser et continuera son chemin vers la prochaine poubelle, il évitera ainsi une perte de temps inutile et optimisera le temps relatif aux arrêts des camions.

Dans la deuxième méthode l'utilisateur n'aura pas besoin de s'approcher de la poubelle pour voir le taux de remplissage, il peut le savoir de n'importe où dans le monde, contrairement à la première méthode où il devrait s'approcher de la poubelle. Il évitera ainsi un déplacement inutile et optimisera la distance parcourue.

Dans la première méthode l'utilisateur n'est pas obligé de se connecter à internet et pourra connaître le taux de remplissage juste en se rapprochant de la poubelle.

Dans la seconde méthode, la poubelle doit être en permanence connecté à internet via le module wifi pour que l'utilisateur puisse connaître à distance le taux son remplissage.

Dans la deuxième méthode nous avons utilisé moins des composants que dans la première.

I.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en évidence le principe de la gestion des déchets. Nous avons aussi montré les types des déchets et leurs impacts sur l'environnement. La gestion des déchets en Algérie a été présentée. Quelques types des poubelles intelligentes, avec leur principe de fonctionnement ont été décrits dans ce chapitre. Notons que ces poubelles ont été réalisées pour des espaces publiques dotées seulement du système de contrôle à distance. La question du tri qui est devenue fondamentale pour une meilleure gestion des déchets n'a pas été suffisamment mise en avant. L'objectif de notre travail dans ce mémoire est de réaliser une poubelle intelligente qui sera capable, outre le contrôle à distance, de trier plusieurs types de déchets.

CHAPITRE II

DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE TRI DES DÉCHETS

II.1 Introduction

Le tri des déchets est une méthode de gestion des déchets qui consiste à séparer et récupérer les déchets selon leur nature, à la source. Ce tri permet une meilleure gestion des déchets, facilitant ainsi le recyclage et garder l'environnement propre[13]. Cependant, les quantités de déchets qui augmentent chaque jour nécessitent une prise en charge réelle. Face à ce défi, des solutions sont proposées pour optimiser le tri des déchets.

Dans ce chapitre, nous donnons et nous discutons les différentes techniques de tri des déchets existantes.

II.2 Méthodes de tri [14]

Anciennement le tri des déchets c'était un travail sous fortes contraintes physiques, c'est une tâche difficile, extrêmement répétitive, très sollicitant pour les membres supérieurs et qui s'exerce en travail posté dans une pénible ambiance sonore, tactile et olfactive. Les opérateurs doivent trier plus de 2000 à 3000 déchets à l'heure (cartons, métaux, papiers, etc.) qui défilent sur des tapis de tri à environ 0,4 mètres par seconde. Les sites de tri adoptent une organisation généralement fondée sur une équipe d'une vingtaine d'opérateurs, dont du personnel intérimaire. Un responsable, dit « premier trieur », affecte les opérateurs aux différents postes et règle la vitesse du débit de déchets arrivant sur les convoyeurs de tri en fonction du nombre d'opérateurs présents, de son estimation de la quantité à traiter, de la qualité du flux (léger ou lourd, dégradé ou non) et des objectifs de production à atteindre. Plusieurs opérateurs travaillent sur une même ligne (au moins deux et jusqu'à plus de cinq trieurs par ligne), chacun a des consignes spécifiques de tri de déchets, qui varient selon les sites, en fonction de la mécanisation plus ou moins sophistiquée des lignes de tri.



Fig II .1 : Exemple de tri manuel.

À cet effet des efforts soutenus sont actuellement réalisés pour améliorer cette opération en cherchant à automatiser la plus grande partie des opérations de tri afin d'éviter tout contact direct entre l'opérateur et les déchets, et parmi ces méthodes innovantes on :

II.2.1 Tri mécanique: [15]

Le tri mécanique des déchets est une solution complexe mais nécessaire pour gérer les déchets de manière durable et responsable. C'est un processus où chaque étape joue un rôle crucial pour maximiser le recyclage et minimiser l'impact environnemental, voici comment cela fonctionne, étape par étape :

- **Réception et Prétraitement :**

Dès que les camions poubelles déversent leurs chargements dans l'usine de tri, les gros objets non désirés sont retirés manuellement ou mécaniquement. Cela permet de se débarrasser des objets encombrants qui pourraient perturber les machines.

- **Broyage :**

Ensuite, les déchets passent par une machine de broyage qui réduit leur taille. Imaginez une énorme déchiqueteuse qui transforme tout en petits morceaux plus faciles à trier.

- **Séparation des matières :**

Les déchets passent par plusieurs types de machines qui les trient en fonction de leurs propriétés physiques :

-**Aimants** pour attraper les métaux ferreux comme l'acier.

-**Courant de Foucault** pour les métaux non ferreux comme l'aluminium.

-**Séparateurs optiques** qui utilisent des capteurs pour identifier et trier différents types de plastiques et de papiers.

-**Tamis** qui séparent les matériaux selon leur taille.

-**Tables densimétriques** pour trier selon la densité des matériaux.

- **Valorisation énergétique et recyclage**

Après tout ce tri, les matériaux recyclables (comme les plastiques, le verre, les métaux) sont envoyés vers des usines de recyclage. Les matériaux qui ne peuvent pas être recyclés mais sont combustibles sont incinérés pour produire de l'énergie.

II.2.2 La méthode de pesée

La méthode de pesée est une approche utilisée dans le tri des déchets qui consiste à mesurer la masse des déchets à l'aide de capteurs de poids. Cette technique permet d'évaluer la quantité de matériau présente dans un déchet donné, fournissant ainsi des informations sur sa densité et son type. En combinant cette mesure de poids avec d'autres données, comme la taille ou le volume, il est possible de déduire des caractéristiques spécifiques du déchet. Cela contribue à son identification et à sa classification plus précise.

La méthode de pesée est souvent utilisée en complément d'autres techniques de tri afin d'améliorer la précision du processus de séparation des matériaux. Elle permet d'affiner l'analyse des déchets et de mieux orienter les étapes suivantes du traitement.

II.2.2.1 Types de Capteurs de Poids

❖ **Capteurs de Charge (Load Cells) :** Les capteurs de charge sont parmi les dispositifs les plus couramment utilisés pour mesurer le poids. Ils sont composés de plusieurs jauges de contrainte disposées de manière à détecter la force appliquée. Ces capteurs sont disponibles dans différentes configurations, dont les capteurs de compression, de traction et de flexion, adaptés à diverses applications de mesure de poids.

- ❖ **Jauges de Contrainte** : Les jauges de contrainte sont des éléments essentiels des capteurs de poids. Elles sont fixées à des surfaces déformables du capteur et réagissent aux changements de contrainte en modifiant leur résistance électrique.
Les capteurs basés sur les jauges de contrainte peuvent être utilisés dans diverses situations, de la pesée industrielle à la mesure précise des petites charges.
- ❖ **Capteurs de Pression** : Certains capteurs de poids utilisent des éléments de mesure basés sur la variation de pression. Ils peuvent être utilisés dans des applications spécifiques où la détection de la pression est plus adaptée que la mesure directe du poids. Ces capteurs sont souvent employés dans des contextes tels que la mesure de la pression des pneus ou des systèmes de pesée sous pression.
- ❖ **Capteurs à Déformation Élastique** : Certains capteurs de poids utilisent des matériaux déformables élastiquement, tels que des ressorts ou des membranes, pour mesurer la force appliquée. La déformation de ces éléments est ensuite mesurée et convertie en données de poids. Ces capteurs sont parfois utilisés dans des applications nécessitant une mesure rapide et précise.
- ❖ **Capteurs à Résonance Acoustique** : Les capteurs de poids basés sur la résonance acoustique mesurent les variations de fréquence induites par la charge appliquée. Ces capteurs peuvent être utilisés dans des applications spécifiques où la sensibilité à la résonance permet des mesures précises, par exemple dans la pesée de substances en vrac.

II.2.2.2 Principe de Fonctionnement des Capteurs de Poids

Les capteurs de poids fonctionnent sur le principe de la déformation mécanique d'un matériau flexible sous la charge appliquée. Voici les étapes clés de leur fonctionnement :

- ❖ **Déformation mécanique** : Lorsqu'une charge est appliquée sur le capteur, il se déforme proportionnellement au poids de la charge. Cette déformation entraîne un changement de la configuration du capteur.

- ❖ **Variation de la résistance électrique:** Les jauges de contrainte, généralement collées à la surface du capteur, subissent également une déformation. Cette déformation provoque une variation de la résistance électrique de la jauge, qui peut être mesurée à l'aide d'un circuit électronique.
- ❖ **Conversion en signal numérique :** Un dispositif de lecture, souvent un convertisseur analogique-numérique (CAN) ou un circuit de traitement spécifique, interprète la variation de résistance en une valeur numérique représentant la charge appliquée.
- ❖ **Mesure du poids :** Ce signal numérique peut être converti en une mesure de poids dans une unité de masse appropriée, comme kilogrammes ou livres.

II.2.3 Méthode de son

II.2.3.1 Définition

La reconnaissance de son pour le tri des Déchets est une technologie innovante qui utilise l'analyse des sons générés par les objets lorsqu'ils tombent dans une poubelle pour identifier et trier automatiquement différents types de matériaux tels que le plastique, le papier et l'aluminium....

Cela peut être utilisé avec deux méthodes :

II.2.3.2 Tri à base de son produit lors de l'écrasement des déchets

Le tri à base de son produit lors de l'écrasement à l'aide d'un vérin est une méthode innovante de tri des déchets) qui utilise des capteurs sonores intégrés à un système de vérin pour identifier et séparer automatiquement différents types de matériaux Cette méthode de tri des déchets combine l'utilisation de capteurs sonores avancés et de mécanismes de vérin pour automatiser et optimiser le processus de gestion des déchets. Elle permet une séparation efficace et précise des matériaux recyclables dès leur dépôt dans le système de tri, réduisant ainsi la nécessité d'interventions manuelles et améliorant la durabilité globale du processus de recyclage des déchets :

- ❖ **Capteurs Sonores Intégrés** : Des capteurs acoustiques sont installés dans le mécanisme de vérin ou à proximité de la zone d'impact où les déchets tombent ou sont écrasés. Ces capteurs détectent et capturent les sons générés par l'impact des déchets, produisant ainsi des signaux acoustiques.

- ❖ **Écrasement Contrôlé par Vérin** : Un vérin hydraulique ou pneumatique est utilisé pour contrôler l'écrasement ou le mouvement des objets dans la poubelle ou le dispositif de tri. L'activation du vérin est déclenchée par la chute d'un objet dans la poubelle.

- ❖ **Capture et Analyse des Sons** : Les signaux sonores capturés par les capteurs sont analysés pour extraire des caractéristiques acoustiques spécifiques telles que les fréquences dominantes, les amplitudes et les modèles temporels. Ce processus est essentiel pour distinguer les différents types de matériaux comme le plastique, le papier, aluminium.

- ❖ **Classification Automatique** : Les caractéristiques sonores extraites sont utilisées comme entrées pour un modèle de classification automatique. Ce modèle est préalablement entraîné à reconnaître les signatures sonores spécifiques associées à chaque type de matériau.

- ❖ **Tri Sélectif et Direction des Déchets** : Une fois le type de matériau identifié par le modèle de classification, le système dirige automatiquement l'objet vers le compartiment ou le processus approprié de tri des déchets. Cela peut inclure le déplacement mécanique des objets vers des conteneurs séparés ou d'autres systèmes de traitement spécifiques.

II.2.3.3 Le tri à bas de son produit par la chute

Le tri à base de son produit lors de la chute de déchets est une méthode avancée de tri des déchets qui utilise des capteurs sonores pour identifier automatiquement les matériaux lorsqu'ils tombent dans une poubelle ou un système de tri. Voici les étapes clés de cette méthode :

- ❖ **Capteurs Sonores** : Des dispositifs comme des microphones sont placés près de la zone de dépôt des déchets pour détecter les sons produits lorsque les déchets chutent.
- ❖ **Capture et Traitement des Signaux Sonores** : Les capteurs enregistrent les sons émis lors de la chute des déchets et les transforment en signaux électriques. Ces signaux sont ensuite filtrés et amplifiés pour isoler les caractéristiques sonores distinctives des différents matériaux.
- ❖ **Analyse des Caractéristiques Sonores** : Les caractéristiques extraites des signaux sonores, telles que les fréquences dominantes et les modèles temporels, sont analysées pour déterminer le type de matériau (plastique, papier, aluminium, etc.).
- ❖ **Classification Automatique** : À l'aide d'algorithmes d'apprentissage automatique préalablement entraînés, comme les réseaux neuronaux ou les SVM, le système classe automatiquement chaque déchet en fonction de son type.
- ❖ **Tri Automatisé** : Une fois classifié, le déchet est dirigé automatiquement vers le conteneur ou le processus de tri approprié, facilitant ainsi le recyclage et la gestion efficace des déchets.

II.2.4 Vision par ordinateur : [16]

II.2.4.1 Définition

La vision par ordinateur, ou computer vision, est une technique d'intelligence artificielle qui consiste à permettre aux ordinateurs de « voir » et d'interpréter les images et vidéos de la même manière que le font les êtres humains.

II.2.4.2 Les outils appliqués en vision par ordinateur

Il existe plusieurs bibliothèques logicielles utilisées en Computer Vision pour la programmation, l'analyse et le traitement des images. Voici quelques-unes des bibliothèques les plus populaires :

Open CV : OpenCV (Open Source Computer Vision Library) est une bibliothèque open source écrite en C++ qui fournit des outils pour la vision par ordinateur, y compris l'acquisition d'images, le traitement d'images, la segmentation d'images, la reconnaissance d'objets, la détection de visages, etc. OpenCV est disponible dans plusieurs langages, y compris Python, Java, C++ et MATLAB.

TensorFlow : TensorFlow est une bibliothèque open source de deep learning développée par Google, qui permet la création et l'entraînement de modèles de réseaux de neurones pour la vision par ordinateur. TensorFlow est disponible dans plusieurs langages, y compris Python, C++, Java, JavaScript et Swift.

PyTorch : PyTorch est une bibliothèque open source de deep learning développée par Facebook, qui permet la création et l'entraînement de modèles de réseaux de neurones pour la vision par ordinateur. PyTorch est disponible dans Python.

Keras : Keras est une bibliothèque open source de deep learning qui fournit une interface conviviale pour la création, l'entraînement et le déploiement de modèles de réseaux de neurones pour la vision par ordinateur. Keras est disponible dans Python.

Caffe : Caffe est une bibliothèque open source de deep learning écrite en C++, qui est principalement utilisée pour la classification d'images, la détection d'objets et la segmentation d'images. Caffe est disponible dans plusieurs langages, y compris Python et MATLAB.

Ces bibliothèques sont régulièrement mises à jour et sont utilisées par la communauté de la vision par ordinateur pour résoudre diverses tâches et problèmes.

II.2.4.3 Les types d'algorithmes utilisés

Il existe plusieurs algorithmes de détection d'objets qui sont largement utilisés en computer vision. Voici quelques exemples :

a .Les algorithmes de détection d'objet :

YOLO (You Only Look Once) : ce modèle est un autre modèle de détection d'objets basé sur des CNN. Il utilise un réseau de neurones unique pour détecter des objets et prédire leurs boîtes englobantes et leurs classes.

Mask R-CNN : ce modèle est une extension de Faster R-CNN qui permet également la segmentation d'images en plus de la détection d'objets. Il utilise une approche multi-tâches pour détecter des objets, prédire leurs boîtes englobantes et segmenter l'image en même temps.

SSD (Single Shot Detector) : ce modèle est également basé sur des CNN et est conçu pour détecter des objets dans des images en temps réel. Il utilise des filtres de convolution à différentes échelles pour détecter des objets de différentes tailles.

b . Les algorithmes de segmentation d'images :

Il existe plusieurs algorithmes de segmentation d'images utilisés en computer vision. Voici quelques exemples :

K-means clustering : cette méthode de segmentation d'images utilise l'algorithme de clustering K-means pour diviser une image en plusieurs régions en fonction des couleurs ou des intensités de pixels. Les régions sont ensuite assignées à des étiquettes pour identifier les différentes parties de l'image.

Graph cut : cette méthode de segmentation d'image utilise des graphes pour définir les frontières entre les différentes régions. Elle est souvent utilisée pour la segmentation d'objets dans des images.

Convolutional neural networks (CNN) : ces algorithmes de segmentation d'image utilisent des réseaux de neurones pour identifier les régions d'intérêt dans une image. Les CNNs sont souvent utilisés pour la segmentation d'images médicales, comme la segmentation de tumeurs dans des images de tomographie par ordinateur (CT) ou d'IRM.

c. Les algorithmes de classification d'images

Il existe plusieurs algorithmes de classification d'images utilisés en computer vision, voici quelques exemples :

Réseaux de neurones profonds (Deep Neural Networks, DNN) : ces algorithmes de classification utilisent des réseaux de neurones à plusieurs couches pour apprendre les caractéristiques de l'image à partir des pixels bruts. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont souvent utilisés pour la classification d'images.

SVM (Support Vector Machine) : cet algorithme est utilisé pour la classification binaire et multi-classes en utilisant un hyperplan de séparation. Il est souvent utilisé pour la classification d'images basée sur des caractéristiques extraites de l'image, comme les descripteurs SIFT ou HOG.

Random Forest : cet algorithme est un ensemble d'arbres de décision utilisé pour la classification d'images. Il est souvent utilisé pour la classification basée sur des caractéristiques extraites de l'image, comme les descripteurs SIFT ou HOG.

Réseaux de neurones récurrents (Recurrent Neural Networks, RNN) : ces algorithmes sont utilisés pour la classification de séquences d'images, telles que des vidéos. Les réseaux de neurones récurrents peuvent capturer la dépendance temporelle entre les images et améliorer la classification.

Réseaux de neurones résiduels (Residual Neural Networks, ResNet) : ces algorithmes de classification utilisent des blocs résiduels pour améliorer la performance des réseaux de neurones profonds. Ils sont souvent utilisés pour la classification d'images à grande échelle.

d. Les algorithmes de reconnaissance

Les algorithmes de reconnaissance de formes, d'images ou de **mouvements** sont souvent utilisés pour la reconnaissance de formes et la détection de mouvements dans des applications telles que la surveillance vidéo, la reconnaissance de gestes, la reconnaissance d'activités humaines et la réalité augmentée.

Il existe plusieurs algorithmes de reconnaissance de forme d'images et de mouvements utilisés en computer vision. Voici quelques exemples :

Template matching : cette méthode de reconnaissance de forme utilise une image modèle pour trouver des occurrences de cette forme dans une image cible. C'est une méthode simple mais souvent peu robuste aux variations d'échelle, de rotation et d'éclairage.

Contours actifs (Active contours) : cette méthode de reconnaissance de forme utilise des contours actifs, également appelés snakes, pour détecter les bords d'objets dans une image. Les contours actifs peuvent être déformés pour épouser la forme de l'objet à détecter.

Algorithmes de détection de mouvement : ces algorithmes sont utilisés pour détecter les mouvements dans des séquences d'images. Les algorithmes les plus courants utilisent des

techniques de différence d'images ou de flux optique pour détecter les changements dans la scène.

Réseaux de neurones convolutifs (CNN) : ces algorithmes sont également utilisés pour la reconnaissance de forme et la détection de mouvement. Les CNNs peuvent apprendre à détecter des caractéristiques pertinentes dans une image ou une séquence d'images pour identifier des objets ou des mouvements spécifiques.

De plus, des algorithmes sont souvent combinés pour résoudre des tâches plus complexes. Par exemple, un CNN peut être utilisé pour extraire des caractéristiques d'une image, qui sont ensuite alimentées à un RNN pour l'analyse de séquence.



Fig II.2 : utilisations de la vision par ordinateur.

II.2.5 Système de Traitement des Déchets Basé sur l'Apprentissage Automatique

II.2.5.1 Définition

L'apprentissage automatique fait référence au développement, à l'analyse et à l'implémentation de méthodes qui permettent à une machine d'évoluer grâce à un processus d'apprentissage, et ainsi de remplir des tâches qu'il est difficile ou impossible de remplir par des moyens algorithmiques plus classiques. [17]

II.2.5.2 Types d'apprentissage

Voici les principaux types d'apprentissage automatique qui peuvent être utilisés pour le traitement et le tri des déchets :

a. Apprentissage supervisé :

Classification : Permet de classer les déchets en différentes catégories (plastique, papier, métal, etc.) en se basant sur des données d'entraînement étiquetées. Des algorithmes comme les réseaux de neurones convolutés (CNN) peuvent être utilisés.

Régression : Peut être utilisé pour prédire des caractéristiques quantitatives des déchets comme le poids, le volume, etc.

b. Apprentissage non supervisé :

Clustering : Permet de regrouper les déchets en différents clusters en fonction de leurs similarités, sans avoir besoin d'étiquettes. Des algorithmes comme K-means peuvent être utilisés.

Réduction de dimensionnalité : Peut aider à identifier les caractéristiques les plus pertinentes des déchets pour faciliter leur tri et leur classification.

c. Apprentissage par renforcement :

Peut être utilisé pour optimiser les processus de tri et de recyclage en permettant aux robots d'apprendre à prendre les meilleures décisions en temps réel.

d. Apprentissage profond :

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont particulièrement adaptés pour la reconnaissance visuelle des déchets à partir d'images

Les réseaux de neurones récurrents (RNN) peuvent être utilisés pour traiter des données séquentielles comme les flux de déchets sur un tapis roulant

L'utilisation de ces différentes techniques d'apprentissage automatique permet d'automatiser et d'optimiser les processus de tri et de recyclage des déchets, en améliorant la précision, la vitesse et l'adaptabilité des systèmes.

II.3 Conclusion

On a exploré en profondeur les différentes techniques de tri des déchets, soulignant l'importance de méthodes innovantes face aux défis environnementaux actuels. L'approche traditionnelle de tri manuel, basée sur des critères physiques simples, est de plus en plus remplacée par des solutions technologiques avancées comme l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique. Parmi les techniques examinées, la méthode de pesée se distingue par son utilisation de capteurs de poids pour une classification précise, tandis que la vision par ordinateur et la reconnaissance sonore apportent des capacités sophistiquées d'analyse et de tri des matériaux. Ces technologies permettent non seulement une amélioration significative de l'efficacité du tri, mais aussi une réduction de la nécessité d'interventions manuelles, favorisant ainsi une gestion des déchets plus durable et optimale.

CHAPITRE III

CONCEPTION D'UNE POUBELLE INTELLIGENTE

III.1 Introduction :

Afin d'optimiser le tri des déchets et répondre donc à notre problématique, nous avons conçu une poubelle intelligente basée sur les techniques de l'intelligence artificielle et plus particulièrement sur l'apprentissage automatique. Le système de commande de cette poubelle intelligente Le processus du tri s'opère lorsqu'un objet est détecté. Le mécanisme que nous avons conçu combine les opérations de détection, de reconnaissance et de positionnement dans un enchaînement synchronisé. Toutes ces opérations sont essentielles pour un fonctionnement optimal et une consommation en énergie très faible.

Pour mettre en évidence notre système de tri, dans ce chapitre, nous détaillons les différentes étapes de notre conception en présentant les motivations du choix de chaque processus. Pour une meilleure compréhension, dans un premier temps, nous définissons un système embarqué et ses avantages dans des applications à fonctionnement autonome. Dans un second temps, nous présenterons la conception élaborée illustrée par un schéma synoptique et son fonctionnement en utilisant son organigramme. Pour chaque processus conçu, nous avons adapté le matériel et le logiciel correspondant tout en décrivant son fonctionnement.

III.2 Conception du système de tri intelligent

Notre objectif dans ce projet est la conception d'un système de tri intelligent pour la poubelle qui repose sur l'intégration de technologies avancées pour améliorer l'efficacité de la gestion des déchets. Le système à concevoir utilise des capteurs pour détecter et identifier différents types de matériaux tels que le plastique, le papier, l'aluminium, et les déchets non recyclables. Les données collectées par ces capteurs sont ensuite traitées par des algorithmes d'intelligence artificielle qui déterminent le type de déchet et le dirigent vers le compartiment approprié. De plus, ces poubelles peuvent être équipées de connexions IoT (Internet des objets), permettant de surveiller à distance son niveau de remplissage pour optimiser les itinéraires de collecte et aussi pour identifier des éventuelles anomalies de fonctionnement.

Dans le contexte de répondre à ces innovations, nous concevons un système de tri intelligent répondant aux critères de performances en exploitant les derniers algorithmes de classification et les technologies disponibles.

Pour bien mettre en évidence le système à réaliser, la conception est schématisée par le synoptique donné par (figure III.1)

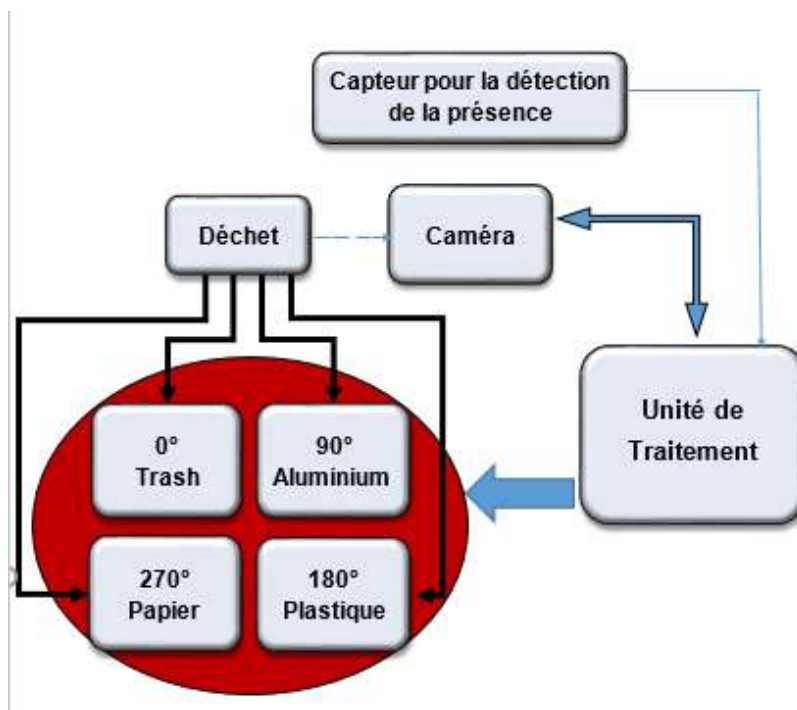


Fig III.1:schéma synoptique de notre conception

- Le fonctionnement de notre conception est illustré par l'organigramme donné à (la figure 3.2).

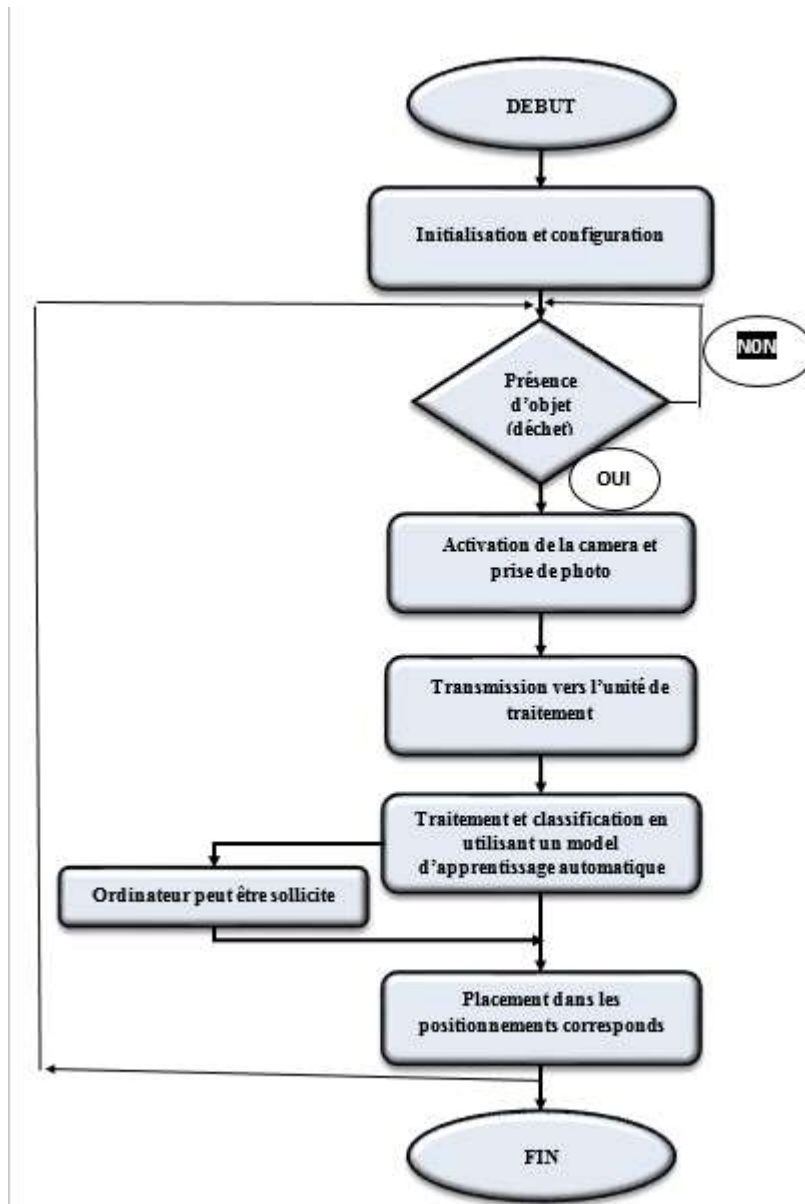


Figure III.2 : Organigramme de la conception

Selon l'organigramme élaboré, le fonctionnement de notre conception peut être divisée en trois étapes, à savoir :

- Détection d'objets (déchets)
- Reconnaissance du type du déchet
- Placement dans la position correspondante

Pour bien gérer la collecte des déchets, nous avons aussi intégré la fonction de la détection de remplissage.

III.2.1 Détection d'objet (Déchets)

Lorsqu'un déchet est jeté dans le système, la première fonction est de détecter sa présence pour ensuite activer la caméra. Cette opération économisera de l'énergie. Pour ce faire, nous avons fait appel aux capteurs d'obstacles qui sont conçus pour détecter la présence d'objets dans leur proximité. Ils peuvent utiliser différentes technologies pour fonctionner. Dans notre cas, nous utilisons le capteur de détection des objets à infrarouge.

III.2.1.1 Capteur d'obstacle infrarouge

Dans un système de tri intelligent dans une poubelle, l'utilisation de capteurs infrarouges (IR) est essentielle. Les capteurs IR sont des dispositifs capables de détecter la présence d'objets en émettant et en recevant des rayons infrarouges. Lorsqu'un déchet est introduit dans la poubelle, le capteur IR détecte ce mouvement et active le système de tri. Cette technologie est particulièrement efficace pour déclencher des actions automatiques sans contact physique, ce qui est crucial pour maintenir l'hygiène et la fonctionnalité de la poubelle intelligente. Le type de capteur infrarouge que nous utilisons est illustré dans **(la fig.III.2)**.

La **(figure III.2.a)** présente le capteur lui-même et la **(figure III.2.b)** montre le brochage avec ESP32.

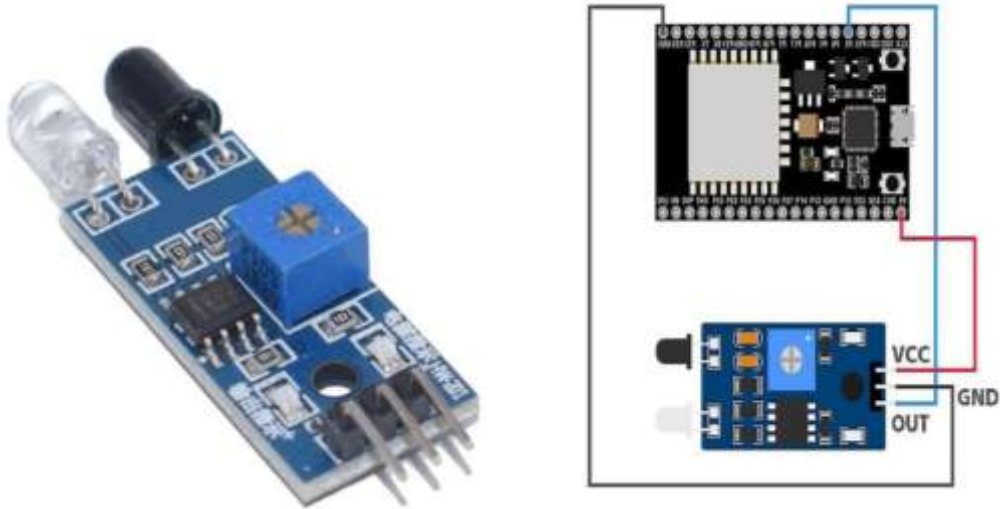


Fig. III.3 :Capteur d’obstacle infrarouge (a) et son brochage avec esp 32 (b)

Capteur d’obstacle infrarouge(a) et son brochage avec esp 32 (b).

Les capteurs infrarouges fonctionnent en émettant de la lumière infrarouge et en mesurant soit la réflexion (capteurs actifs) soit la chaleur émise par des objets (capteurs passifs). Il existe deux principales catégories :

- **Capteurs IR actifs :**

- **Principe :** Émettent une lumière infrarouge et détectent la réflexion sur un objet.
- **Composants principaux :** Émetteur (LED IR), récepteur (photodiode ou phototransistor).
- **Applications :** Détection de proximité, télémétrie, barrières infrarouges.

III.2.2 Prise de photo

Une caméra est intégrée pour prendre des photos sur les déchets injectés dans le système. Après la détection de leur présence par le capteur infrarouge, cette caméra est activée et capture une image du déchet introduit. Il existe plusieurs types de caméras utilisées dans ce domaine. Le choix de ce type de caméra dépend de la distance des objets et la portée de la caméra. Dans notre cas, nous optons pour une **ESP 32 CAM AI Thinker** qui répond parfaitement aux critères du choix, telles que la consommation en énergie, la transmission sans fils et l'activation selon le besoin. Une description de cette caméra est donnée ci-dessous:

III.2.2.1 ESP 32 CAM AI Thinker

Le module CAM ESP32 d'AI-Thinker (**Fig.III.4**) est une carte de développement à faible coût avec un port de carte micro-SD et une petite caméra OV2640. Il contient une puce Wi-Fi et Bluetooth intégrée, ainsi que deux processeurs LX6 32 bits haute performance et un pipeline à 7 étages architecture.

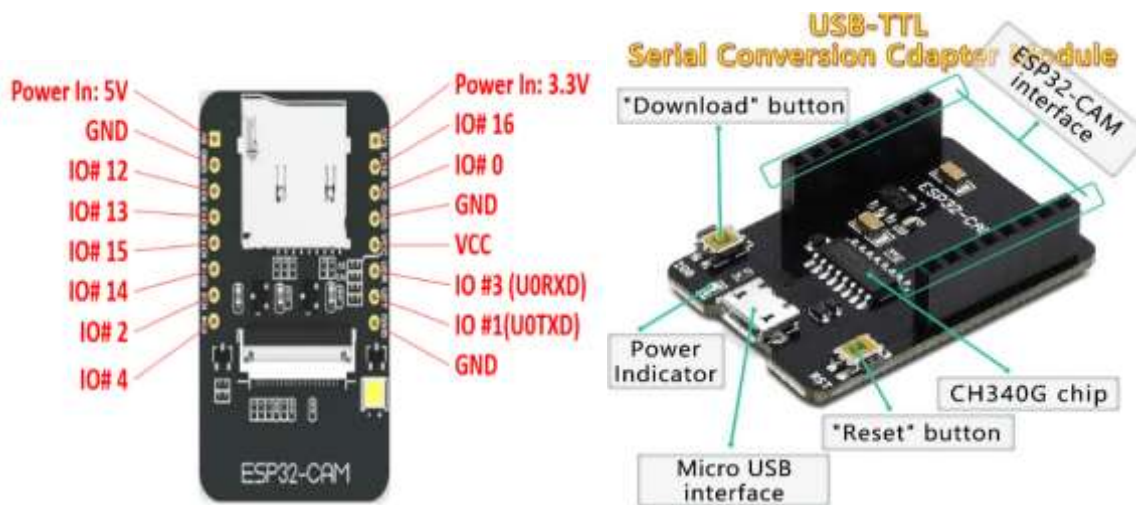


Fig.III.4: Caractéristiques techniques du module ESP32-CAM –USB

III.2.1 Présentation du module ESP32-CAM mb :

L'ESP32-CAM est une carte de développement ESP-WROOM-32 du fabricant AI Thinker associé à une caméra couleur 2MP OV2640 (**Fig.III.4**). Le module ESP32-CAM

dispose également d'un lecteur de carte SD qui pourra servir à enregistrer des images lorsqu'un événement est détecté.

La société Expressif fournit une API complète qui permet d'accéder à toutes les fonctionnalités du module caméra. C'est vraiment une excellente base pour développer son propre système de vidéosurveillance IP sans avoir la crainte que le flux vidéo arrive sur des serveurs douteux. L'ESP-32CAM peut être utilisé dans diverses applications IoT. Elle convient aux appareils intelligents domestiques, aux commandes sans fil industrielles, à la surveillance sans fil, à l'identification sans fil QR, aux signaux du système de positionnement sans fil et à d'autres applications IoT. C'est une solution idéale pour les applications IoT.

III.2..2 Caractéristiques techniques du module ESP32-CAM :

Processeur et mémoire :

- Processeur ESP32 dual-core 32 bits basse consommation
- Fréquence d'horloge jusqu'à 240 MHz
- Puissance de calcul jusqu'à 600 DMIPS
- SRAM intégrée de 520 Ko
- PSRAM externe de 8 Mo

Connectivité :

- Wi-Fi 802.11 b/g/n/e/i
- Bluetooth 4.2 BR/EDR et BLE
- Interface USB pour la programmation et le débogage
- Prise en charge des cartes microSD jusqu'à 4 Go

Caméra :

- Capteur OV2640 ou OV7670 (selon la version)
- Résolution photo de 2 mégapixels
- Flash intégré
- Prise en charge du traitement d'image

Autres caractéristiques :

- 9 ports GPIO
- Interfaces UART, SPI, I2C et PWM
- Mode veille avec faible consommation d'énergie
- Prise en charge du téléchargement d'images Wi-Fi
- Compatible avec l'IDE Arduino

III.2.3 Environnements de Développement :

Arduino IDE : Permet un développement rapide et simple grâce à une interface conviviale et de nombreuses bibliothèques.

PlatformIO : Offre un environnement de développement plus avancé avec des fonctionnalités supplémentaires pour les projets complexes.

ESP-IDF (Espressif IoT Development Framework) : Le framework officiel de Espressif pour le développement de projets IoT, offrant des outils puissants pour l'optimisation et la gestion des ressources.

III.3 Reconnaissance du type d'objet

Après la prise de photo du déchet, l'image obtenue est transmise à l'unité de traitement. Un modèle basé sur le deeplearning est implémenté pour une l'identification du type de déchet. Ces dernières années, nous assistons à une utilisation massive du réseaux de neurones convolutionnels(CNN)[19]

A cet effet, notre processus de classification utilise le modèle CNN, spécialement entraîné pour reconnaître différents types de déchets. Le concept mathématique du CNN est donné ci-dessous :

III.3.1 Concept mathématique du CNN

Un réseau de neurones convolutif (CNN) est une classe de réseaux de neurones profondément utilisée pour analyser les images. Les CNN sont particulièrement efficaces pour la reconnaissance d'objets grâce à leur capacité à capturer des caractéristiques spatiales et hiérarchiques dans les données d'image.

Les CNN imitent la façon dont les humains perçoivent et reconnaissent les objets visuellement. Contrairement aux réseaux de neurones traditionnels, les CNN peuvent reconnaître des motifs et des structures dans les images en utilisant des couches convolutives qui appliquent des filtres pour extraire des caractéristiques importantes, telles que les bords, les textures, et les formes.

III.3.1 Principales caractéristiques d'un modèle CNN

Localité des Filtres : Les filtres convolutifs sont appliqués localement sur des petites portions de l'image, permettant de capturer des caractéristiques locales.

Partage des Poids : Les mêmes filtres sont appliqués sur toute l'image, ce qui réduit le nombre de paramètres et améliore l'efficacité computationnelle.

Pooling : Les couches de pooling réduisent la dimensionnalité des données en conservant les informations les plus importantes, aidant ainsi à diminuer le risque de surapprentissage et à rendre le modèle plus invariant aux translations et aux distorsions mineures.

Ces caractéristiques font des CNN un choix idéal pour les tâches de classification d'images et d'objets, ce qui en fait une technologie clé pour notre projet de poubelle de tri.

(La figure III.4) donne un exemple d'une architecture du Modèle CNN

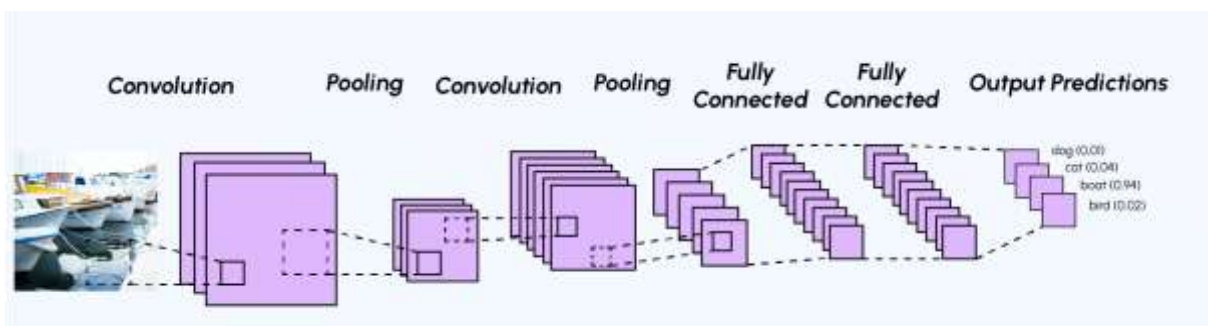


Fig III.5: Schéma représentant l'architecture d'un CNN

III.3.2 Architecture d'un CNN

L'architecture d'un CNN typique comprend plusieurs types de couches, chacune jouant un rôle spécifique dans le traitement et l'extraction des caractéristiques d'une image. Voici une description détaillée de ces couches et leur fonctionnement dans notre modèle de classification des déchets :

- Couches Convolutives : Ces couches appliquent des filtres (ou noyaux) sur l'image d'entrée pour extraire des caractéristiques locales comme les bords, les textures, et d'autres motifs. Chaque filtre glisse sur l'image et produit une carte de caractéristiques.
- Couches de Pooling : Elles réduisent la dimensionnalité des cartes de caractéristiques tout en conservant les informations essentielles. Cela aide à rendre le modèle plus invariant aux petites translations et déformations dans l'image.
- Couches FullyConnected : Ces couches classiques de réseau de neurones prennent les caractéristiques extraites par les couches précédentes et les utilisent pour effectuer la classification finale. Elles connectent chaque neurone à tous les neurones de la couche précédente, permettant une combinaison complexe de caractéristiques.

Dans notre cas, le modèle CNN examine les caractéristiques visuelles de l'image prise par la caméra, telles que les formes, les couleurs et les textures, pour identifier et classer le type de déchet (plastique, papier, Aluminium, Trash). L'implémentation de CNN nécessite une machine puissante en raison de nombre de données qu'il faut utiliser. Dû à l'indisponibilité des cartes à microprocesseur embarquées dans lesquelles le modèle CNN peut être implémenté, nous optons dans cette partie pour le traitement par ordinateur. Dans le prototype que nous présentons, la classification est réalisée en utilisant le modèle CNN implémenté dans un ordinateur connecté à notre système. Les échanges de données se fait entre l'ordinateur et le système conçu.

Le prototype réalisé peut toujours être doté d'une carte à microprocesseur embarquée pour fonctionner d'une façon autonome dans laquelle nous implémentons le modèle CNN.

III.4.3 Bibliothèque pour implémentation (TensorFlow)

Afin de pouvoir entraîner le modèle CNN, nous utilisons TensorFlow. Ce dernier est une bibliothèque open source de machine learning développée par Google. Elle est utilisée pour créer et entraîner des modèles de machine learning (ML) et de deep learning. TensorFlow offre une flexibilité et une extensibilité qui permettent aux chercheurs de développer des modèles complexes, tout en offrant une API simple et intuitive pour les développeurs qui veulent créer des applications basées sur le machine learning.)[18]

Pour des raisons de compatibilités avec l'ESP 32, nous utilisons le TensorFlow.js qui est une bibliothèque JavaScript pour l'entraînement et le déploiement de modèles de machine learning directement dans le navigateur et dans Node.js. Elle permet aux développeurs de tirer une partie des capacités de machine learning sans quitter l'environnement JavaScript.

Les principales caractéristiques de TensorFlow.js sont :

- **Exécution dans le navigateur** : Permet l'entraînement et l'inférence directement dans le navigateur en utilisant WebGL pour l'accélération matérielle.
- **Interopérabilité avec d'autres bibliothèques JavaScript** : Facilite l'intégration du machine learning dans les applications web existantes.
- **Entraînement et inférence** : Vous pouvez entraîner des modèles à partir de zéro ou importer des modèles pré-entraînés depuis TensorFlow ou Keras.
- **Conversion de modèles** : Les modèles créés avec TensorFlow ou Keras peuvent être convertis dans un format compatible avec TensorFlow.js.

III.4 Placement dans le compartiment approprié :

La mise en place de cette partie nécessite, selon notre conception, une unité de commande pour coordonner toutes ces opérations, un Servo-moteur et un moteur pas à pas.

Avec un mécanisme de rotation, le placement des déchets dans les positions voulues est conçu selon les données suivantes

- `ALUMINIUM_POSITION = 90; // Angle pour Aluminium`

- PLASTIC_POSITION = 180; // Angle pour Plastique
- PAPER_POSITION = 270; // Angle pour Papier
- TRASH_POSITION = 0; // Angle pour Déchets

Nous décrivonsci-dessous les composants choisis pour cette opération:

III.4.1 Unité de commande ESP32

L'ESP32 (**fig.III.6**) est une unité de commande puissante et polyvalente, dotée d'un microcontrôleur à double cœur, de capacités Wi-Fi et Bluetooth intégrées, il offre une connectivité sans fil robuste et rapide, idéale pour notre projet.Elle reçoit les commandes par l' Esp32 CAM et commande ainsi la partie mécanisme.

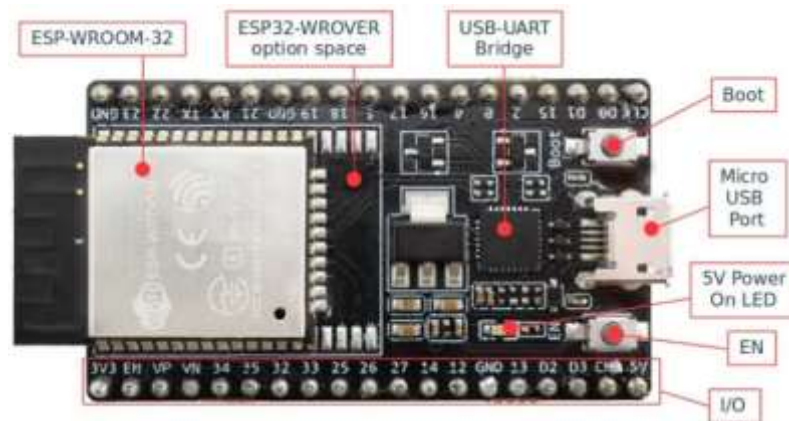


Fig III.6 : Représentation de la carte Esp32

III.4.2 Servomoteur Sg90

Un servomoteur (**Sg90**) est un type de moteur qui peut tourner sur une plage d'angle limitée, typiquement 180 degrés. Les servomoteurs SG90 sont conçus pour des applications nécessitant un contrôle précis de la position dans une plage limitée. Ils sont couramment utilisés dans les applications robotiques, les systèmes de contrôle de position, les bras articulés, et divers autres dispositifs nécessitant un mouvement angulaire limité.

Les servomoteursSG90 sont commandés par des signaux PWM (Pulse With Modulation), où la largeur de l'impulsion détermine la position angulaire du moteur

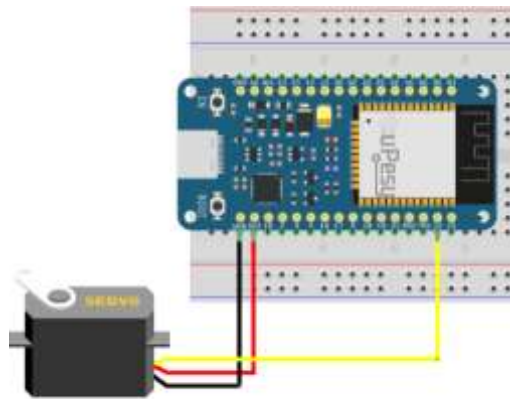


Fig.III.7: servomoteur SG90 branché a esp32

➤ Voici quelques spécifications techniques typiques d'un servo-moteurSG90:

- **Couple (Torque)** : Le couple est une mesure de la force de rotation du moteur. Un servo-moteur typique pourrait avoir un couple de 1,8 kg-cm à 4,8 volts, ce qui signifie qu'il peut appliquer une force de 1,8 kg à une distance de 1 cm du centre de rotation.
- **Vitesse de Rotation** : La vitesse de rotation est souvent spécifiée en secondes par 60 degrés (sec/60°). Par exemple, n servo-moteur 180 degrés pourrait tourner de 60 degrés en 0,12 seconde à 4,8 volts.
- **Tension d'Alimentation** : Les servo-moteurs fonctionnent généralement à une tension de 4,8 à 6 volts. Certains modèles peuvent supporter des tensions plus élevées pour un couple et une vitesse accrus.
- **Courant de Fonctionnement** : Le courant de fonctionnement typique peut varier de quelques centaines de milliampères (mA) au repos à plusieurs ampères (A) sous charge maximale.

- **Contrôle par PWM** : Les servo-moteurs sont contrôlés par des signaux PWM, où la largeur de l'impulsion détermine la position angulaire. Par exemple, une impulsion de 1 milliseconde pourrait positionner le moteur à 0 degré, 1,5 millisecondes à 90 degrés, et 2 millisecondes à 180 degrés.
- **Dimensions et Poids** : La taille et le poids du servo-moteur sont également importants, surtout dans des applications où l'espace est limité. Un servo-moteur typique peut mesurer environ 40 x 20 x 40 mm et peser environ 50 grammes.

III.4.3 Moteur pas à pas

Le moteur pas à pas que nous utilisons est Stepper Motor 28byj-48 uln2003. La **(Fig.III.8)** montre un exemple de moteur utilisé connecté à l'ESP 32.

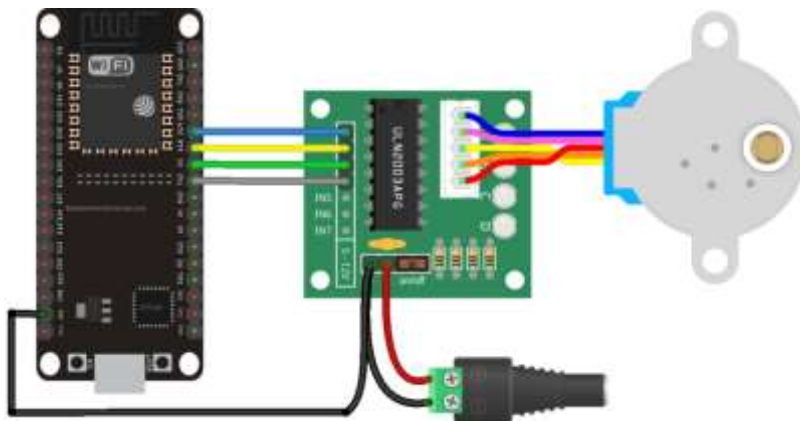


Fig.III.8: 28BYJ-48 avec le pilote ULN2003 relié à esp32

Le moteur pas à pas 28BYJ-48 est un moteur pas à pas unipolaire, souvent utilisé en conjonction avec le pilote ULN2003. Voici quelques informations utiles et un guide de connexion de base pour le moteur pas à pas 28BYJ-48 avec le pilote ULN2003.

➤ **Les caractéristiques sont :**

- Tension de fonctionnement : 5V
- Nombre de phases : 4

- Nombre de pas par révolution : 2048 (certains disent 4096 en mode demi-pas)Angle de pas : $5.625^\circ/64$

➤ **Les Caractéristiques du ULN2003**

- Pilote de transistor Darlington : permet de contrôler les moteurs pas à pas unipolaires
- Courant maximum par canal : 500 mA
- Tension maximum : 50V

➤ **Voici une explication détaillée de son fonctionnement:**

Le moteur pas-à-pas (28BYJ-48) est utilisé dans ce projet pour positionner précisément la trappe de tri des déchets en fonction de la catégorie de l'objet détecté (Aluminium, Plastique, Papier, Déchet). Le programme contrôle le moteur en définissant des positions spécifiques pour chaque type de déchet, et en utilisant le capteur IR pour vérifier la présence d'un objet avant d'ouvrir ou de fermer la trappe. Le moteur est mis à jour régulièrement dans la boucle principale, assurant ainsi un fonctionnement fluide et précis du système de tri des déchets.

III.5 Détection du niveau de remplissage

Comme nous l'avons mentionné dans la conception présentée ci-dessus, nous ajoutons à notre système la fonction de détection de remplissage. Pour ce faire, nous intégrons pour chaque compartiment un capteur ultrasonique (**Fig.III.9**). Avec ces capteurs, selon la distance indiquée, il est possible d'identifier le niveau de remplissage.

- Le capteur ultrasonique HC-SR04 est placé au-dessus de chaque bac pour mesurer la distance entre le capteur et la surface des déchets.
- Un seuil de distance est défini, et lorsque la distance mesurée est inférieure à ce seuil, cela indique que le bac est plein, déclenchant une alerte.



Fig III.9:Capteur Ultrasonique HC-SR04

III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les différentes étapes de la conception de notre projet. Nous avons présenté les capteurs et le matériel utilisés, en expliquant leur fonctionnement et leur rôle spécifique. La partie essentielle du système conçu est basée sur l'apprentissage automatique où nous avons implémenté un CNN. Nous avons donc donné une description détaillée du CNN. Nous avons montré aussi le mécanisme de positionnement adopté pour l'affectation finale. La détection du niveau de remplissage a été aussi intégré dans la conception dont le fonctionnement a été bien présenté dans ce chapitre.

Le prochain chapitre sera consacré à la réalisation concrète de notre prototype, une étape importante pour valider notre conception et donc mettre au point le premier prototype de notre projet.

CHAPITRE IV

RÉALISATION ET TESTS DE FONCTIONNEMENT

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, après avoir bien mis en évidence la conception, nous présentons les différentes étapes de la réalisation de notre poubelle intelligente que nous appelons « EcoTrash ».

Des ressources matérielles et logicielles sont utilisées pour cette réalisation. A cet effet, en premier lieu, nous expliquerons l'installation des bibliothèques nécessaires et la façon dont nous avons créé notre propre base de données, ainsi que le principe de fonctionnement de cette dernière. En second lieu, nous réalisons les différents brochages et implémentations. Pour vérifier le fonctionnement, nous réalisons des tests. Les résultats obtenus pour la réalisation de la poubelle « EcoTrash » sont ensuite discutés.

IV.2 Environnement logiciel

Pour ce projet, le choix du langage de programmation est important. En effet dans le domaine de la vision artificielle les langages n'offrent pas les mêmes perspectives. Nous prendrons en compte deux critères pour choisir le langage le plus adapté à nos besoins. Premièrement la vitesse d'exécution qui permet d'exécuter la tâche demandée en temps réel et deuxièmement sa simplicité d'utilisation. Notre choix se portera plus spécifiquement sur le python. Sachant que les langages les plus utilisés pour la vision artificielle sont le C++, python, JavaScript.

❖ Python :

Python est un langage de programmation open source, disponible en plusieurs versions et compatible avec tous les systèmes d'exploitation. Il est l'un des langages les plus populaires pour les systèmes embarqués. Python est également considéré comme le premier langage de programmation pour l'intelligence artificielle, grâce à sa simplicité et à sa syntaxe facilement assimilable. Il permet un temps de développement très court comparé à d'autres langages comme Java ou C++. Développé au début des années 1990, Python inclut également de nombreuses bibliothèques dédiées au traitement d'images en temps réel.

IV.2.1 Préparation des Données d'apprentissage

Un ensemble d'images est construit dans le but de réaliser l'apprentissage du CNN. Nous avons pris des photos des déchets en respectant les caractéristiques définies par le système réalisé. Le système conçu permet de classifier quatre catégories de déchets, à savoir « Aluminium, Papier, Plastic, Trash ».

Pour chaque catégorie de déchets, nous effectuons une série de photos pour pouvoir regrouper toutes les possibilités. Ainsi, quatre classes de photos sont construites. **La figure (Fig IV.1)** donne quelques photos de déchets prises pour chaque classe.

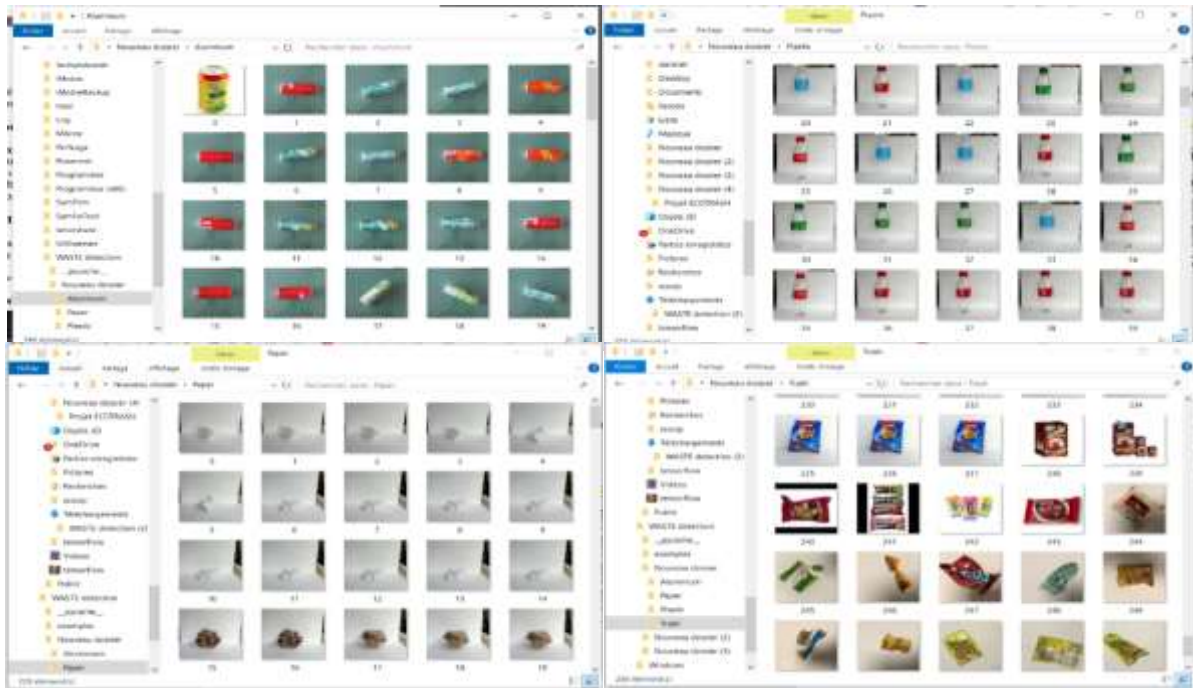


Fig IV.1 : Differentes catégories de déchets

IV.2.2 Entraînement du Modèle CNN sous TensorFlow

Pour faire fonctionner notre système, nous réalisons un apprentissage automatique de CNN en utilisant la base de données construite. Le schéma adopté pour l'apprentissage du CNN est donné à la (**figure IV.2**).

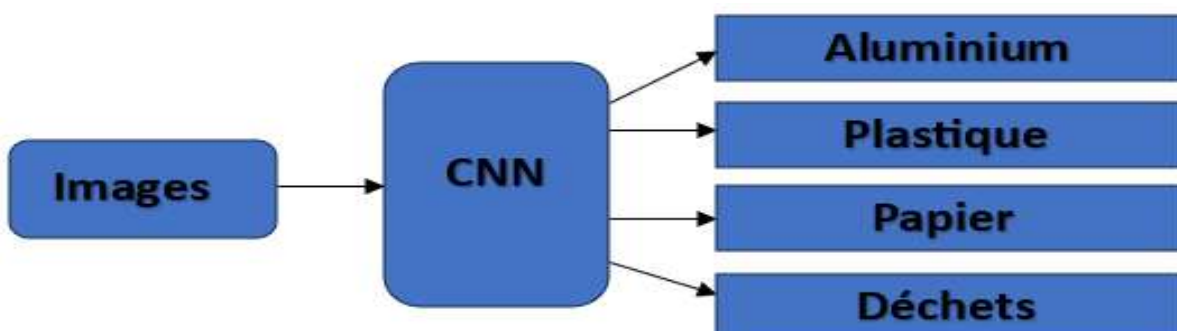
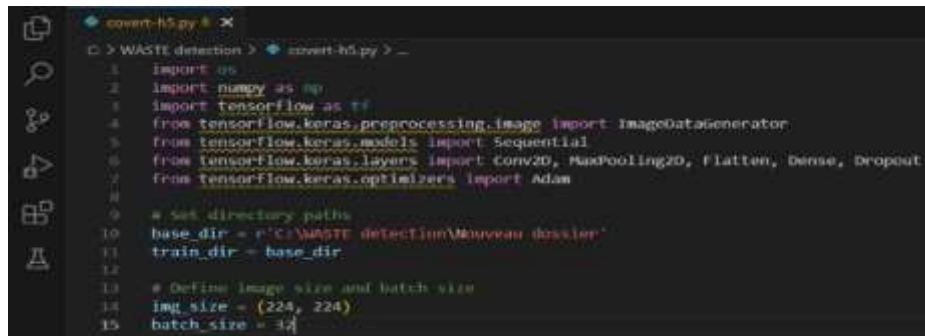


Fig IV.2 : Apprentissage du CNN pour reconnaître une classe parmi quatre.

➤ Une série de configuration, de programmation et d'installation est effectuée

❖ Installez TensorFlow et d'autres bibliothèques nécessaires :

pip install tensorflow numpy



```
1 import os
2 import numpy as np
3 import tensorflow as tf
4 from tensorflow.keras.preprocessing.image import ImageDataGenerator
5 from tensorflow.keras.models import Sequential
6 from tensorflow.keras.layers import Conv2D, MaxPooling2D, Flatten, Dense, Dropout
7 from tensorflow.keras.optimizers import Adam
8
9 # Set directory paths
10 base_dir = r'C:\WASTE detection\Kuvvaan dossier'
11 train_dir = base_dir
12
13 # Define image size and batch size
14 img_size = (224, 224)
15 batch_size = 32
```

Fig IV.3 : bibliothèque d'entraînement du modèle TensorFlow

➤ A partir de la figure 4.3, nous clarifions les différentes bibliothèques

-Instructions d'importation :

- **os** : Cette bibliothèque fournit des fonctions pour interagir avec le système d'exploitation, telles que les opérations de fichiers et de répertoires
- **numpy as np** : NumPy est une puissante bibliothèque pour les calculs numériques en Python. L'alias np est couramment utilisé pour plus de concision.
- **tensorflow as tf** : TensorFlow est un framework d'apprentissage automatique open source. Il est largement utilisé pour construire et entraîner des réseaux neuronaux
- **ImageDataGenerator** : Cette classe génère des lots de données d'images augmentées pour l'entraînement des réseaux neuronaux.
- **Sequential** : Une pile linéaire de couches dans un réseau neuronal.
- **Conv2D, MaxPooling2D, Flatten, Dense, Dropout** : Ce sont différentes couches utilisées pour construire un réseau de neurones convolutif (CNN).

IV.2.3 Architecture de Tensorflow :

Le code configure un modèle séquentiel à l'aide de **Sequential**. Il ajoute des couches au modèle à l'aide de `add()`. Ces couches comprennent des couches de convolution (**Conv2D**),

des couches de max-pooling (**MaxPooling2D**), une couche de mise à plat (**Flatten**), des couches entièrement connectées (**Dense**) et des couches de dropout (**Dropout**).

L'architecture est destinée à une tâche de classification d'images. L'optimiseur utilisé est **Adam**. Il s'agit d'un algorithme d'optimisation populaire pour l'entraînement des réseaux neuronaux.

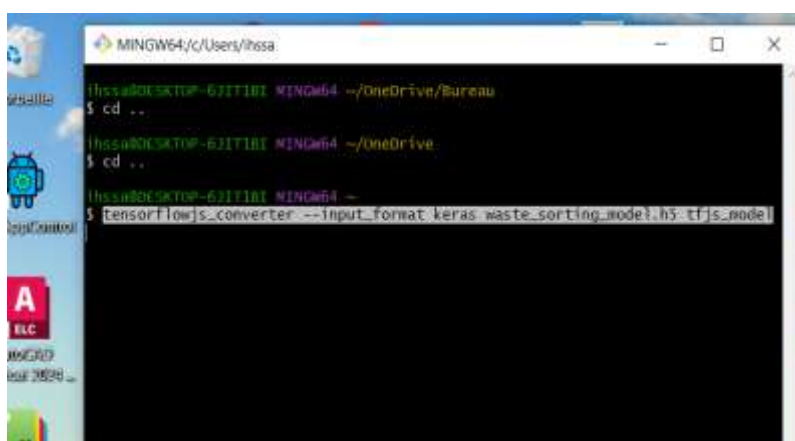
```
61
62 # Train the model
63 history = model.fit(
64     train_generator,
65     validation_data=validation_generator,
66     epochs=20,
67     steps_per_epoch=train_generator.samples // batch_size,
68     validation_steps=validation_generator.samples // batch_size
69 )
70
71 # Save the model
72 model.save("waste_classification_model.h5")
73
```

Fig IV.4 : Apprentissage et Enregistrement d'un modèle de classification des déchets

IV.2.4 Conversion du Modèle en TensorFlow.js

Script de conversion en js :

La conversion de **TensorFlow** vers **TensorFlow.js** (Fig IV.6) est plus adaptée pour des applications web, alors que pour des microcontrôleurs comme l'ESP32-CAM.



```
MINGW64/C:/Users/ihasa
ihasa@DESKTOP-6J1T1BI MINGW64 ~/OneDrive/Bureau
$ cd ..
ihasa@DESKTOP-6J1T1BI MINGW64 ~/OneDrive
$ cd ..
ihasa@DESKTOP-6J1T1BI MINGW64 ~
$ tensorflowjs_converter --input_format keras waste_sorting_model.h5 tfjs_model
```

Fig IV.5 : Conversion de modèle vers TensorFlow.js

IV.2.5 Programmation de l'ESP32-CAM

Pour faire fonctionner la caméra utilisée, nous procédons ainsi :

➤ **Préparation de l'environnement Arduino:**

- Installez l'IDE Arduino.
- Arduino IDE Setup

➤ **Configurer l'IDE Arduino :**

Installer le package de la carte ESP32 :

1. Dans l'IDE Arduino, allez dans **Fichier -> Préférences**.
2. Ajoutez l'URL suivante dans le champ **URL de gestionnaire de cartes supplémentaires** : https://dl.espressif.com/dl/package_esp32_index.json.
3. Allez dans **Outils -> Carte -> Gestionnaire de cartes** et recherchez ESP32, puis installez le package esp32.

Sélectionner la carte et le port corrects :

1. Allez dans **Outils -> Carte**, et sélectionnez **AI Thinker ESP32-CAM**.
2. Allez dans **Outils -> Port**, et sélectionnez le port COM auquel l'ESP32-CAM est connecté.

Cela permet de configurer correctement votre environnement de développement pour l'ESP32 dans l'IDE Arduino.

IV.2.6 Fonctionnement Général du système

Après la partie apprentissage, configuration et implémentation, nous présentons le fonctionnement du système du tri. Comme nous l'avons déjà indiqué, la machine de tri des déchets commence par détecter la présence d'un déchet à l'entrée grâce à un capteur infrarouge (IR). Lorsqu'un déchet est détecté, l'ESP32-CAM capture une image du déchet et l'envoie à une application web pour analyse. Cette application utilise un modèle de réseau de neurones convolutifs (CNN) implémenté en TensorFlow.js pour classer le déchet en l'une des catégories suivantes : Aluminium, Plastique, Papier, et Déchets, voir la figure (**Fig IV.1**).

La prédiction de la catégorie est ensuite transmise à un ESP32-Dev, qui traite l'information et envoie des commandes au module de contrôle des moteurs. Ce module contrôle un moteur pas-à-pas pour positionner le compartiment de tri correct et un servomoteur pour ouvrir la porte du compartiment. Les capteurs ultrasoniques HC-SR04 placés dans chaque compartiment mesurent le niveau de remplissage, et les données sont transmises à une application web pour surveillance. L'ensemble du processus est coordonné pour assurer un tri efficace des déchets, avec une surveillance en temps réel des niveaux de remplissage pour une gestion optimisée.

IV.2.6.1 Fonctionnement du Capteur d'Obstacle Infrarouge (IR)

Le capteur IR émet un faisceau infrarouge et détecte la réflexion de cet infrarouge sur un objet. Lorsqu'un objet est présent dans le champ de détection du capteur, une partie de l'infrarouge est réfléchi vers le capteur. Lorsqu'un obstacle est détecté, le capteur IR produit un signal électrique qui peut être lu par l'ESP32-CAM via une broche GPIO configurée en entrée. Ce signal peut être de niveau HIGH (par exemple, 3.3V ou 5V) lorsqu'un obstacle est détecté, et LOW (0V) lorsqu'aucun obstacle n'est présent.

Dans le programme Arduino, nous configurons une broche GPIO spécifique pour lire le signal du capteur IR (**IR_SENSOR_PIN** dans l'exemple précédent). Lorsque la boucle principale (**loop()**) s'exécute, elle vérifie constamment l'état de cette broche.

IV.2.6.2 Fonctionnement de la caméra

Dès que le capteur IR détecte un obstacle (signal HIGH), le programme déclenche la capture d'image par la caméra ESP32-CAM.

- ❖ **Automatisation de la Capture d'Image** : Permet une capture d'image automatique basée sur la détection d'objets (déchets), rendant le système plus réactif et autonome.
- ❖ **Réduction de l'Énergie** : Le capteur IR ne consomme généralement pas beaucoup d'énergie, ce qui le rend efficace pour une utilisation continue dans des applications IoT.
- ❖ **Intégration Facile** : Facile à intégrer dans des projets Arduino grâce à son interface simple de signalisation.

IV.2.6.3 Fonctionnement du système de reconnaissance

Après la capture de l'image, le programme peut ensuite procéder à la classification des déchets. Cette étape est assurée par la carte à microprocesseur (micro-ordinateur) dans laquelle nous avons implémenté le modèle CNN sous TensorFlow.(**FIGIV.3**)

IV.2.6.4 Affectation dans des bacs

Une fois le système de reconnaissance à identifier le type du déchet, les moteurs pas à pas et les servo-moteur sont activés pour déplacer et ouvrir la porte appropriée en fonction de la catégorie de déchet détectée.

IV.2.6.4.1 Programme conçu au fonctionnement de moteur pas à pas

Le stepmotor (28BYJ-48) est principalement utilisé pour créer un mouvement rotatif dans une direction spécifique en réponse à un signal de commande électrique. Dans le contexte de notre projet de classification des déchets, on a utilisé le stepmotor (28BYJ-48) pour déplacer un dispositif (par exemple, la corbeille) vers différentes positions correspondant aux types de déchets identifiés par votre modèle de classification.(**Fig IV.6**) Montre une partie de notre programme de fonctionnement du moteur pas à pas.

```
void handlePost() {
  if (server.hasArg("waste")) {
    String wasteType = server.arg("waste");
    Serial.println("Received waste type: " + wasteType);

    // Move stepper to specified position based on waste type
    if (wasteType == "Aluminium") {
      targetStepperPos = ALUMINIUM_POSITION;
    } else if (wasteType == "Plastic") {
      targetStepperPos = PLASTIC_POSITION;
    } else if (wasteType == "Paper") {
      targetStepperPos = PAPER_POSITION;
    } else if (wasteType == "Trash") {
      targetStepperPos = TRASH_POSITION;
    } else {
      Serial.println("Invalid waste type.");
    }

    moveStepperToAngle(targetStepperPos);
    stepperReachedPosition = false; // Reset the flag
  }
}
```

Fig IV.6 : Partie du programme de fonctionnement du moteur pas à pas

- Dans notre fonction **targetstepperPos**, on a utilisé des conditions pour vérifier quelle position spécifique (comme **posAluminum, posPaper, posPlastic, posTrash**) correspond à la prédiction obtenue par le modèle de détection.
- En fonction de la prédiction détectée, on a activé les conditions appropriées pour déplacer le moteur pas à pas vers l'angle la direction correspondante. Par exemple, si `position == posAluminum`, le step motor (28BYJ-48) tournera pour déplacer notre dispositif vers la zone attribuée aux déchets en aluminium.

IV.2.6.4.2 Programme du fonctionnement de servomoteur SG90

Dans votre projet de tri des déchets, le servomoteur joue un rôle crucial en agissant comme une porte qui s'ouvre et se ferme pour diriger les déchets vers les différentes catégories (Aluminium, Plastique, Papier, Déchets).

Dans l'application, le servomoteur est utilisé pour s'ouvrir ou fermer une porte dans les positions spécifiques correspondant aux différents types de déchets identifiés par le modèle de classification sous les deux conditions (`irState == HIGH && atValidPosition`). (**Fig IV.7**)

```
// Check if the stepper has reached the target position
if (stepper.distanceToGo() == 0 && stepperReachedPosition == false) {
    stepperReachedPosition = true;
    currentStepperPos = targetStepperPos; // Update the current stepper position.

    // Check IR sensor and control servo motor
    int irState = digitalRead(irSensorPin); // Read IR sensor state

    // Determine if the stepper is at a valid position
    bool atValidPosition = (currentStepperPos == ALUMINIUM_POSITION ||
                           currentStepperPos == PLASTIC_POSITION ||
                           currentStepperPos == PAPER_POSITION ||
                           currentStepperPos == TRASH_POSITION);

    if (irState == HIGH && atValidPosition) {
        // If an obstacle is detected and stepper is at valid position, move the servo to 90 degrees
        doorServo.write(90);
    } else if (irState == LOW && atValidPosition) {
        // If no obstacle is detected and stepper is at valid position, move the servo to 0 degrees after 2 seconds
        delay(2000);
        doorServo.write(0);
    }
}
```

Fig IV.7 : Partie du programme de fonctionnement du servomoteur

IV.2.7 Détection du niveau de remplissage

C'est une approche pour surveiller et gérer le remplissage des bacs d'une poubelle intelligente qui trie les déchets en utilisant des capteurs ultrasoniques HC-SR04. Cette méthode permet de déterminer le pourcentage de déchets dans chaque bac et d'indiquer lorsqu'ils sont pleins

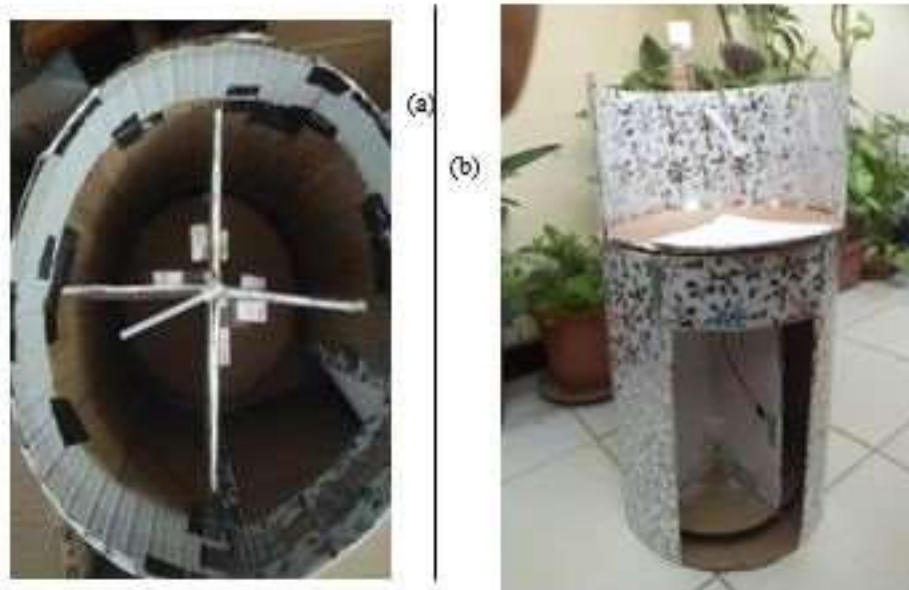


Fig IV.8: bac rotatif (a) /partiede traitement (b)

Le produit final de notre conception est illustré dans (**FIG IV.8**). Nous rappelons que le produit est le premier prototype qui répond à notre problématique.

IV.2.8 Test et résultats :

Les tests que nous réalisons sont effectués pour chaque partie du système. La classification, la détection et l'affectation au compartiment correspondant.

❖ Test de classification

Pour vérifier la fiabilité de la classification, nous avons effectué un ensemble de tests. Dans le but de généraliser objectivement la détection et d'évaluer les performances, nous avons pris différentes prédictions du type de déchets et dans plusieurs positions.(**Fig IV.9**) montre les déchets choisis et les résultats de leur affectation après normalisation.

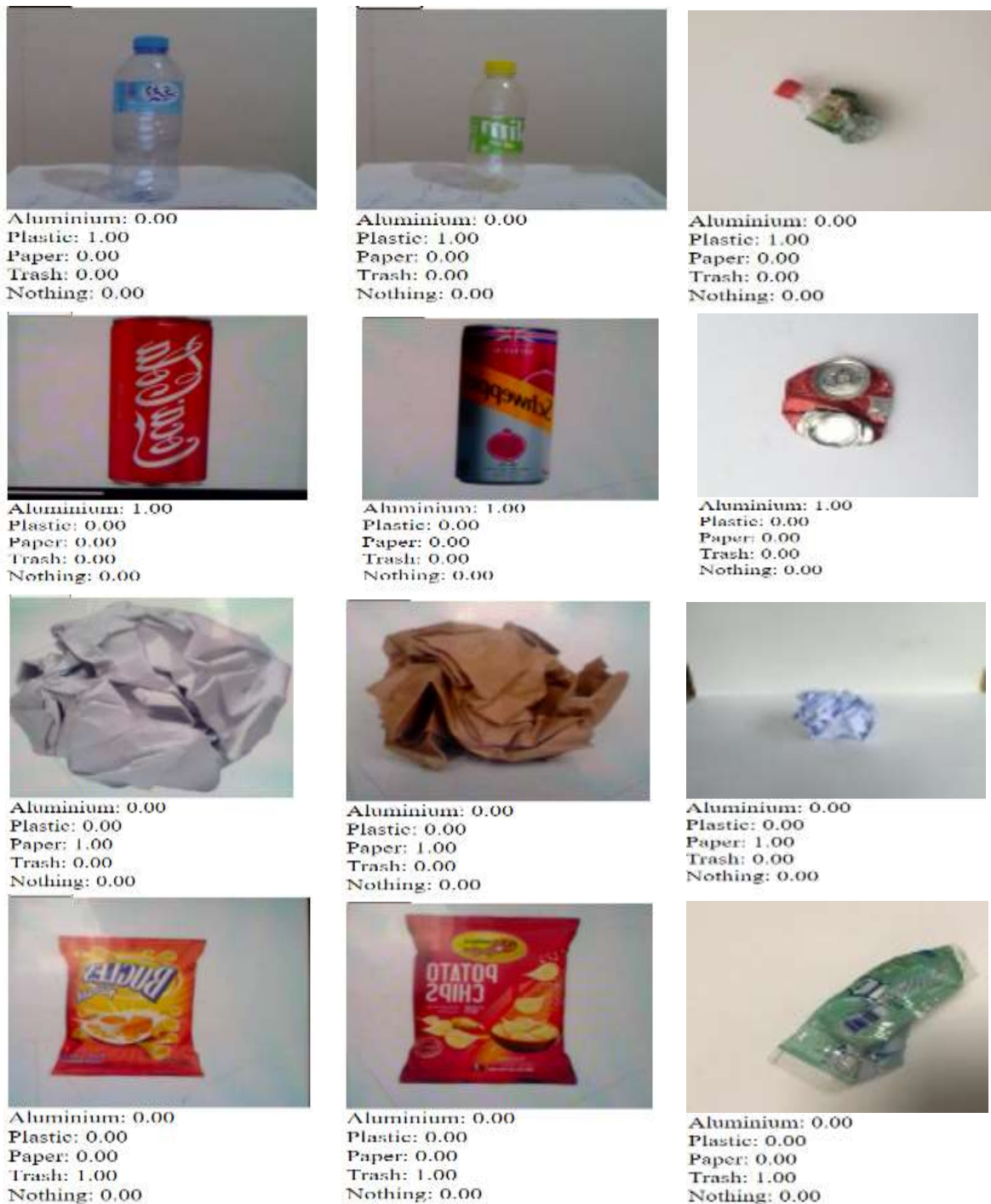


Fig IV.9: résultats des déchets testés

Pour quantifier la fiabilité de notre classification, nous utilisons une matrice de confusion. Cette matrice est un outil essentiel pour évaluer les performances du modèle de classification CNN. C'est un tableau qui présente les prédictions faites par le modèle par rapport aux données réelles. Chaque ligne de la matrice correspond à une classe réelle, et

chaque colonne correspond à une classe prédite par le modèle CNN. Les résultats de la matrice de confusion sont calculés pour un test de 143 cas pour chaque catégorie (**Fig IV.10**)



Fig IV.10 : résultats de la matrice de confusion.

Comme nous pouvons le voir, toutes les situations ont été correctement identifiées. Les taux obtenus sont à 100%, ce qui montre de bonnes performances.

➤ **Test de détection et d’affectation**

Pour vérifier le système de détection, plus de 578 déchets ont été jetés successivement dans la poubelle. Nous avons constaté que tous les déchets ont été détectés et par conséquent traités par notre application. Comme nous l’avons montré précédemment, les déchets ont été classés correctement.

Pour tester l’affectation des déchets dans le bon compartiment, nous avons vérifié les différents compartiments après remplissage. Les déchets se trouvant dans ces compartiments sont contrôlés manuellement. Au terme de cette opération, nous avons enregistré les résultats donnés au tableau IV.1

Nombre de déchets testés	Traités	Non traités	Affectation aux compartiments			
			Bac1	Bac2	Bac3	Bac4
578	578	0				
Aluminium 143	143	0	143	0	0	0
Papier 143	143	0	0	143	0	0
Plastique 143	143	0	0	0	143	0
Trash 149	149	0	0	0	0	149

TableauIV.1: résultats de la matrice de confusion.

Ainsi, Selon le tableau, le système de détection et le système d’affectation ont fonctionné correctement.

IV.3 Affichage sur le site web

Nous avons aussi conçu une application sur le site web pour montrer les résultats de fonctionnement. En effet, les résultats de détection et le positionnement des déchets sont affichés en temps réel sur une interface web. Cette interface affiche également les niveaux de remplissage de chaque compartiment, mesurés par des capteurs ultrasoniques HC-SR04. Les données collectées par ces capteurs sont envoyées à l'ESP32 et mises à jour sur l'application web, permettant une gestion proactive des compartiments de tri. En cas de remplissage élevé d'un compartiment, des alertes peuvent être générées pour informer l'utilisateur de la nécessité de vider le compartiment concerné, assurant ainsi une efficacité maximale du système de tri des déchets. La figure(FIG IV.11): résultats de la matrice de confusion montre une interface de l'application web connectée au système.



Fig IV.11 : interface web

Le code HTML relative à cette figure, présente une interface web pour le projet **EcoTrash**, qui utilise une caméra ESP32-CAM et un modèle de reconnaissance d'images de

ML pour identifier les types de déchets. Le style de la page est défini dans la section <style> et inclut des classes de mise en page et de formatage. Lorsque l'utilisateur clique sur le bouton "Start", la fonction JavaScript init() charge le modèle de ML et démarre une boucle de prédiction d'images prises par l'ESP32-CAM. Les prédictions sont ensuite affichées dans le conteneur de labels. Un script supplémentaire interroge un autre ESP32 pour obtenir les distances des capteurs ultrasoniques, calcule les pourcentages de remplissage des bacs en fonction des distances mesurées, et les affiche sur la page web. Si la distance dépasse une longueur précisée en centimètre, un message "Le boîtier est vide" est affiché à la place du pourcentage.

Après une période de fonctionnement, nous avons enregistré les résultats sur la page web suivante :



FIG IV.12 : pourcentage des déchets dans chaque bac

IV.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons détaillé les étapes de la conception et de la réalisation de notre poubelle intelligente, « **EcoTrash** ». Nous avons expliqué l'installation des bibliothèques nécessaires à la mise en marche, la création de notre propre base de données, ainsi que son principe de fonctionnement. Ensuite, nous avons présenté les différents brochages et

implémentations effectués. Pour vérifier le bon fonctionnement de notre système, nous avons mené une série de tests. Les résultats obtenus ont été analysés et discutés, confirmant ainsi l'efficacité de notre solution pour une gestion intelligente et automatisée des déchets.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce projet, nous avons développé une poubelle intelligente (Eco Trash) capable de trier le papier, le plastique, l'aluminium, et les déchets généraux grâce à l'apprentissage profond. Le Eco Trash combine l'intelligence artificielle et les systèmes embarqués pour effectuer le tri des déchets en temps réel. Cette solution est spécialement conçue pour les entreprises et les espaces publics tels que les jardins, les centres commerciaux, les gares routières, et les établissements éducatifs, permettant ainsi une gestion efficace des déchets produits quotidiennement par les utilisateurs.

Dans un premier temps, nous avons mis en relief l'importance de la gestion des déchets et leur recyclage. Les impacts sur l'environnement et les mesures à prendre ont été bien discutés dans ce projet. Nous avons aussi présenté une revue de techniques utilisées dans la gestion et le tri des déchets. Après avoir identifié les limitations des systèmes de tri, dans un second temps, nous avons conçu une poubelle intelligente connectée basée sur le tri en utilisant l'apprentissage profond. Suite à ce schéma conceptionnel élaboré, nous avons réalisé le système correspondant en intégrant à la fois les différentes technologies apportées par les capteurs employés et le modèle CNN implémenté pour la classification. L'apprentissage du CNN a été effectué en utilisant une base de données que nous avons construite, constituée de photos des différents déchets.

Au terme de cette réalisation, nous avons procédé aux tests de fonctionnement. Ainsi, nous avons traité en utilisant le système réalisé plus de 579 déchets en opérant en trois étapes. La première étape a permis de détecter la présence des objets. En deuxième étape, la camera réalise des prises de photos qui sont transmises à la carte à microprocesseur pour la reconnaissance du type de déchet. En troisième étape, le mécanisme de tri oriente le déchet vers le bac correspondant en fonction son type. Ces étapes ont été toutes testées séparément. Les résultats ont indiqué que les 579 déchets placés successivement à la poubelle ont été détectés. Le système de reconnaissance a été aussi testé. Toutes les classes ont été correctement identifiées. Le mécanisme de tri a montré que les déchets ont été correctement orientés vers les bacs correspondants.

Nous avons ajouté au système mis au point la fonction de détection du niveau de remplissage. Une application Web est aussi développée pour afficher en temps réel le niveau de remplissage. Cette partie a été testée et les résultats ont montré une bonne synchronisation entre l'application web et les niveaux de remplissage des bacs.

En tenant compte des moyens utilisés et les tests de fonctionnement réalisés, nous pouvons affirmer que cette réalisation réponde aux exigences en termes d'aspects économiques et scientifiques. La généralisation d'un tel produit facilitera ainsi le recyclage et valorisera cette action au sein de notre société. De plus, Eco Trash connectée, offrant des fonctionnalités avancées pour le suivi du niveau de remplissage et permettre une collecte très fiable.

L'objectif final dans un tel projet est la mise en place d'un réseau de poubelles intelligentes géré par un système central qui collecte toutes les informations sur les différentes poubelles. Les interventions humaines seront coordonnées avec le système pour la mise en service, la collecte et la maintenance. C'est dans cette optique que nous suggérons les perspectives de notre projet.

Aussi, nous suggérons d'installer des panneaux photovoltaïques pour chaque poubelle pour assurer une alimentation autonome.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Les sociétés face à leurs déchets : une question de sciences humaines et sociales
- [2] Exposé gestion et valorisation des déchets
- [3]Lynred
- [4] Thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay : Recyclage de déchets électroniques: tri et réutilisation
- [5] Tri a base de capteur -TOMRA
- [6] Mémoire de fin d'études : Conception et Réalisation d'une poubelle intelligente
- [7] JEAN-michel Ballet Aid mémoire gestion des déchets 2ème édition Paris 2008.246P
- [8] Environnement -mongroupe
- [9] UNIVERSITE DE ROUEN THÈSE de doctorat en sciences économiques La gestion des déchets municipaux en Algérie: Analyse prospective et éléments d'efficacité
- [10]Unep pops batbepwk.2-rel-cs01 .french .pdf
- [11] Sacha Carniere,Victor BACCONET. Projet smartbin « poubelle intelligente »polytech'Nice Sophia-université de Nice
- [12] ARIB Souleymane. YALAOUI Fouad. ZEROUKLANE Massinissa. Pour une amélioration de la gestion des déchets dans le milieu urbain. Cas de la ville de Bejaia. Mémoire pour l'obtention du diplôme de Master en Architecture
- [13] Le guichet électronique de la Fédération Wallonie-Bruxelles
- [14] Du tri manuel au tri automatisé des déchets recyclables : intégration de l'analyse des stratégies individuelles et collectives des trieurs
- [15] Agir ESE,les modes de traitement des déchets
- [16] Lepton learning
- [17] Univ-tlemcen benmammar IA2.pdf

[18] Databricks glossary tensorflow-guide

[19] PDF (dspace.univ-ouargla.dz)