

Poubelle Intelligente Basée sur l'Intelligence Artificielle

Rapport de Projet de Fin d'Année

Système IoT de Tri Automatique des Déchets

[Ahmed Dhahri-Ahmed Mouine-Mahdi Guedria-Sofiene Karoui]

[Institut Supérieur d'Informatique Mathématique Monastir]

[Licence TIC/RIOT]

Année universitaire 2025-2026

Résumé

Ce projet présente la conception et la réalisation d'une poubelle intelligente capable de trier automatiquement les déchets grâce à l'intelligence artificielle et à l'Internet des Objets (IoT). Le système utilise un ESP32-CAM pour capturer les images, un modèle MobileNetV2 pour classifier les déchets en quatre catégories (plastique, papier, métal, verre), et un mécanisme de tri automatisé par servo-moteur. Les résultats montrent une précision de classification de 85-92% et un taux de tri correct supérieur à 95%.

Mots-clés : Poubelle intelligente, IoT, Intelligence Artificielle, MobileNetV2, ESP32-CAM, Tri automatique, Vision par ordinateur

Table des matières

Résumé	1
1 Étude Générale et Conception	7
1.1 Introduction Générale	7
1.2 Contexte et Problématique	7
1.2.1 Contexte Global	7
1.2.2 Problématique	7
1.3 État de l'Art	8
1.3.1 Solutions Commerciales Existantes	8
1.3.2 Recherche Académique	8
1.3.3 Positionnement du Projet	8
1.4 Comparaison des Solutions Existantes et Proposée	8
1.4.1 Tableau Comparatif Global	9
1.4.2 Analyse Comparative par Critères	9
1.4.3 Limites de Notre Solution par Rapport aux Solutions Commerciales	10
1.4.4 Justification du Choix de Notre Approche	10
1.4.5 Conclusion de la Comparaison	10
1.5 Cahier des Charges	11
1.5.1 Objectifs du Projet	11
1.5.2 Besoins Fonctionnels	11
1.5.3 Contraintes	11
1.5.4 Exigences de Performance	11
1.6 Étude de Faisabilité	12
1.6.1 Faisabilité Technique	12
1.6.2 Faisabilité Économique	12
1.6.3 Faisabilité Temporelle	12
1.7 Choix de Conception	12
1.7.1 Justification des Choix Technologiques	12

1.8	Conclusion du Chapitre	13
2	Étude Conceptuelle	14
2.1	Introduction	14
2.2	Étude Conceptuelle Générale	14
2.2.1	Principe de Fonctionnement	14
2.2.2	Architecture Conceptuelle	15
2.3	Schéma des Composants du Système	15
2.3.1	Architecture Matérielle Complète	15
2.4	Diagramme d'États du Système	17
2.4.1	États et Transitions	17
2.5	Diagramme de Flux (Flow Chart)	18
2.5.1	Processus Complet de Tri	18
2.6	Diagramme de Séquence	19
2.6.1	Interactions Temporelles entre Composants	19
2.7	Diagramme de Classes	21
2.7.1	Architecture Orientée Objet	21
2.8	Spécifications Techniques des Composants	23
2.9	Conclusion du Chapitre	23
3	Tests, Validation et Résultats	24
3.1	Protocole de Tests	24
3.1.1	Tests Unitaires	24
3.1.2	Tests d'Intégration	24
3.1.3	Tests en Conditions Réelles	24
3.2	Résultats de l'IA	24
3.2.1	Métriques de Performance	24
3.2.2	Matrice de Confusion	25
3.2.3	Courbes d'Apprentissage	25
3.3	Résultats du Système Complet	26
3.3.1	Performance Globale	26
3.3.2	Statistiques d'Utilisation	26
3.4	Validation du Cahier des Charges	26
3.5	Limites Identifiées	26
3.5.1	Limitations Techniques	26
3.5.2	Limitations du Modèle IA	27

3.6	Perspectives d'Amélioration	27
3.6.1	Améliorations à Court Terme	27
3.6.2	Perspectives à Long Terme	27
3.7	Conclusion Générale	27

Table des figures

2.1	Schéma des composants du système - Architecture matérielle complète montrant l'ESP32-CAM, les capteurs (HC-SR04 Ultrason), les actionneurs (Servo MG996R), l'éclairage (LEDs blanches) et l'alimentation (5V DC stabilisée, 2A minimum)	16
2.2	Diagramme d'états - États du système : Veille (surveillance continue), Détection (objet détecté à distance < 10cm), Capture (prise de photo), Analyse (classification IA), Tri (orientation du déchet), Sauvegarde (enregistrement des données). Transitions : pas d'objet/bac vidé → Veille, objet détecté → Détection, photo prise → Analyse, catégorie identifiée → Tri, déchet trié → Sauvegarde, échec photo/échec IA/problème servo → Alerte → Retour repos	17
2.3	Diagramme de flux - Processus complet : Utilisateur jette un déchet → Capteur détecte l'objet → ESP32 active la caméra → Photo envoyée à l'IA → IA analyse la photo → Décision (Plastique? Papier? Métal? Verre?) → Servo tourne selon la catégorie (0°, 90°, 180°, 270°) → Déchet poussé vers le bac correspondant → Données sauvegardées → Retour au début	18
2.4	Diagramme de séquence - Interactions : Utilisateur jette déchet → Capteur envoie signal détection → ESP32 allume LEDs → Capture photo → Compresse JPEG → Envoie photo au Serveur IA → Analyse IA → Retour catégorie → ESP32 commande rotation au Servo → Angle selon catégorie → Tourne et maintient → Sauvegarde données dans Base de données → Mise à jour Interface web → Confirmation → ESP32 éteint LEDs → Notification succès à l'Utilisateur	20
2.5	Diagramme de classes UML - Package GroupeMateriel : CapteurUltrason, CameraESP, ServoMoteur, LEDs. Package GroupeLogiciel : GestionnaireWiFi, GestionnaireDonnees, GestionnaireErreurs. Package GroupeIA : ClassificateurIA, ServeurIA, ModelesMobileNet. Package GroupeDonnees : Image, Dechet, Resultat, Statistiques. Relations : PoubelleIntelligente dépend de tous les packages, GroupeLogiciel communique avec GroupeIA, GroupeDonnees est manipulé par tous les modules	21
3.1	Matrice de confusion du modèle MobileNetV2	25
3.2	Évolution de la précision et de la perte pendant entraînement	25

Liste des tableaux

1.1	Comparaison des solutions de tri intelligent	8
1.2	Comparaison détaillée des solutions de tri intelligent	9
2.1	Spécifications techniques des composants	23
3.1	Résultats de classification par catégorie	24
3.2	Performances du système en conditions réelles	26
3.3	Validation des objectifs	26

Chapitre 1

Étude Générale et Conception

1.1 Introduction Générale

La gestion moderne des déchets représente un défi majeur face à l'urbanisation croissante et la production massive de déchets. Ce projet propose une solution innovante basée sur l'IoT et l'IA pour automatiser le tri des déchets à la source.

1.2 Contexte et Problématique

1.2.1 Contexte Global

En 2024, la production mondiale de déchets dépasse 2 milliards de tonnes par an. Le recyclage reste limité par :

- Le tri manuel inefficace et chronophage
- La contamination des flux recyclables (15-25%)
- Le manque de sensibilisation des citoyens
- L'absence d'automatisation dans le processus

1.2.2 Problématique

Comment concevoir un système automatisé capable de détecter, classer et trier les déchets en temps réel, tout en respectant les contraintes de coût et d'efficacité énergétique ?

1.3 État de l'Art

1.3.1 Solutions Commerciales Existantes

TABLE 1.1 – Comparaison des solutions de tri intelligent

Solution	Technologie	Précision	Coût	Limites
TrashBot	IA + Capteurs	90%	Élevé	Très cher
BinE	Vision 3D	85%	Moyen	Complexe
OSCAR	IA profonde	95%	Très élevé	Industriel
Notre Projet	ESP32 + MobileNet	85-92%	Faible	Prototype

1.3.2 Recherche Académique

Plusieurs études récentes montrent l'efficacité des CNN légers (MobileNet, EfficientNet) pour la classification de déchets avec une précision dépassant 85% tout en restant compatibles avec des systèmes embarqués.

1.3.3 Positionnement du Projet

Notre approche se distingue par :

- Un coût réduit (60-110 TND vs 5000+ pour les solutions commerciales)
- Une architecture modulaire et open-source
- Une compatibilité avec les systèmes IoT standards
- Une consommation énergétique optimisée

1.4 Comparaison des Solutions Existantes et Proposée

Cette section présente une analyse comparative détaillée entre les solutions commerciales existantes sur le marché et notre solution proposée. L'objectif est de justifier nos choix technologiques et de démontrer la pertinence de notre approche.

1.4.1 Tableau Comparatif Global

TABLE 1.2 – Comparaison détaillée des solutions de tri intelligent

Critères	TrashBot	BinE	OSCAR	Notre Solution
ASPECTS TECHNIQUES				
Technologie IA	CNN profond	Vision 3D + IA	Deep Learning avancé	MobileNetV2
Capteurs	Multi-capteurs	Caméras 3D	Capteurs industriels	ESP32-CAM + HC-SR04
Précision	90%	85%	95%	85-92%
Temps traitement	2-3s	3-4s	1-2s	2.1s
Catégories	6-8 types	4 types	10+ types	4 types
ASPECTS ÉCONOMIQUES				
Coût d'achat	3000-5000 USD	2000-3000 USD	5000+ USD	86 TND (environ 28 USD)
Maintenance	Élevée	Moyenne	Très élevée	Faible
Consommation	50-100W	40-80W	100-150W	Moins de 5W
FONCTIONNALITÉS				
Tri automatique	Oui	Oui	Oui	Oui
Cloud/IoT	Oui	Limité	Oui	Oui
Dashboard	Application mobile	Web	Application pro	Web + Mobile
Notifications	Push + Email	Push	Système pro	Push + Web
Open-source	Non	Non	Non	Oui
DÉPLOIEMENT				
Cible	Commercial	Résidentiel	Industriel	Prototype éducatif
Installation	Complexe	Moyenne	Très complexe	Simple
Évolutivité	Limitée	Moyenne	Élevée	Élevée
Support technique	Commercial	Limité	Commercial	Communauté

1.4.2 Analyse Comparative par Critères

Performance et Précision

Notre solution atteint une précision de 88.3% en moyenne, ce qui est compétitif par rapport aux solutions commerciales (85-95%). Bien que légèrement inférieure à OSCAR (95%), notre système offre un excellent compromis coût/performance pour un prototype de PFA.

Coût et Accessibilité

Le principal avantage de notre solution réside dans son coût extrêmement réduit (86 TND contre 2000-5000 USD pour les solutions commerciales). Cela représente une économie de plus de 98%, rendant la technologie accessible aux établissements éducatifs et aux projets de recherche.

Consommation Énergétique

Avec moins de 5W de consommation, notre système est 10 à 30 fois plus économe en énergie que les solutions commerciales. Cela le rend particulièrement adapté aux environnements à ressources limitées.

Flexibilité et Évolutivité

Contrairement aux solutions commerciales fermées, notre architecture open-source permet :

- L'ajout de nouvelles catégories de déchets
- La modification du modèle IA
- L'intégration de nouveaux capteurs
- La personnalisation de l'interface utilisateur

1.4.3 Limites de Notre Solution par Rapport aux Solutions Commerciales

- **Nombre de catégories** : 4 types vs 6-10 pour les solutions industrielles
- **Robustesse matérielle** : Prototype vs produit industriel certifié
- **Support technique** : Communauté vs support commercial professionnel
- **Capacité** : Réduite (usage domestique/éducatif) vs industrielle

1.4.4 Justification du Choix de Notre Approche

Notre solution se positionne comme un prototype éducatif et une preuve de concept démontrant qu'il est possible de développer un système de tri intelligent performant avec des ressources limitées. Les choix technologiques effectués visent à :

1. **Minimiser les coûts** tout en maintenant une performance acceptable
2. **Favoriser l'apprentissage** grâce à une architecture simple et modulaire
3. **Démontrer la faisabilité** d'un système IoT + IA accessible
4. **Encourager l'innovation** via une approche open-source

1.4.5 Conclusion de la Comparaison

Cette analyse comparative montre que notre solution, bien que moins performante que les systèmes commerciaux haut de gamme, offre un excellent rapport qualité/prix et démontre la viabilité d'une approche low-cost pour le tri intelligent des déchets. Elle constitue une base solide pour des développements futurs et une alternative crédible pour les contextes éducatifs et les marchés émergents.

1.5 Cahier des Charges

1.5.1 Objectifs du Projet

Objectif Général

Développer un prototype de poubelle intelligente capable de trier automatiquement quatre types de déchets avec une précision supérieure à 85%.

Objectifs Spécifiques

1. Détecter automatiquement la présence d'un déchet
2. Capturer une image haute qualité
3. Classifier le déchet via IA (plastique, papier, métal, verre)
4. Trier mécaniquement vers le bon compartiment
5. Mesurer le niveau de remplissage
6. Enregistrer les données sur cloud
7. Notifier l'utilisateur en cas de remplissage

1.5.2 Besoins Fonctionnels

- **Détection** : Capteur ultrasonique HC-SR04
- **Acquisition** : Caméra OV2640 (résolution 640x480)
- **Classification** : Modèle MobileNetV2 pré-entraîné
- **Tri** : Servo-moteur MG996R (angle 0-180°)
- **Communication** : WiFi intégré ESP32
- **Stockage** : Base de données Firebase/MongoDB

1.5.3 Contraintes

Contraintes Techniques

- Mémoire limitée ESP32 (520 KB SRAM)
- Variations de luminosité dans la poubelle
- Temps de traitement inférieur à 3 secondes
- Consommation énergétique inférieure à 5W

Contraintes Économiques

Budget total : 60-110 TND (composants électroniques + structure)

1.5.4 Exigences de Performance

- Précision de classification : supérieure ou égale à 85%

- Taux de tri correct : supérieure ou égale à 95%
- Temps de réponse total : 1-3 secondes
- Disponibilité du système : supérieure ou égale à 98%

1.6 Étude de Faisabilité

1.6.1 Faisabilité Technique

Validée : Les composants ESP32-CAM et MobileNetV2 sont compatibles et largement utilisés dans des projets similaires.

1.6.2 Faisabilité Économique

Validée : Le coût total reste inférieur à 110 TND, accessible pour un prototype de PFA.

1.6.3 Faisabilité Temporelle

Planning : 4 mois (étude 1 mois, développement 2 mois, tests 1 mois)

1.7 Choix de Conception

1.7.1 Justification des Choix Technologiques

ESP32-CAM

- WiFi et Bluetooth intégrés
- Caméra OV2640 embarquée
- Faible consommation énergétique
- Coût réduit (inférieur à 20 TND)

MobileNetV2

- Architecture légère (3.5M paramètres)
- Précision élevée (85-90% sur ImageNet)
- Rapide (inférieur à 1s sur serveur cloud)
- Compatible avec TensorFlow Lite

Architecture Cloud

Choix de Firebase pour :

- Gratuité jusqu'à 10 GB de stockage
- API REST simple
- Base de données temps réel
- Notifications push natives

1.8 Conclusion du Chapitre

Ce chapitre a établi le cadre théorique et conceptuel du projet. L'analyse de l'état de l'art montre la pertinence de notre approche, et le cahier des charges définit clairement les objectifs à atteindre.

Chapitre 2

Étude Conceptuelle

2.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude conceptuelle du système de poubelle intelligente. Nous détaillerons l'architecture globale du système à travers différents niveaux d'abstraction : depuis le schéma général cinématique par blocs jusqu'aux diagrammes de flux et de classes. L'objectif est de fournir une vision claire et complète de la conception du système avant sa réalisation pratique.

La conception repose sur une approche modulaire permettant une séparation claire des fonctionnalités et facilitant la maintenance et l'évolutivité du système. Chaque module est conçu pour accomplir une tâche spécifique tout en communiquant efficacement avec les autres composants.

2.2 Étude Conceptuelle Générale

2.2.1 Principe de Fonctionnement

Le système fonctionne selon un cycle automatisé en plusieurs phases :

1. **Phase de Veille** : Le système surveille en permanence la présence d'un déchet à l'aide d'un capteur ultrasonique.
2. **Phase de Détection** : Lorsqu'un objet est détecté à moins de 10 cm, le système se déclenche.
3. **Phase d'Acquisition** : Une image du déchet est capturée par la caméra ESP32-CAM avec un éclairage LED pour assurer une bonne qualité.
4. **Phase de Transmission** : L'image est transmise via WiFi au serveur cloud pour analyse.
5. **Phase de Classification** : Le modèle d'intelligence artificielle MobileNetV2 identifie le type de déchet (plastique, papier, métal, verre).
6. **Phase de Tri** : Le servo-moteur oriente le déchet vers le compartiment approprié selon la catégorie identifiée.
7. **Phase d'Enregistrement** : Les données (catégorie, timestamp, image, niveau de remplissage) sont enregistrées dans la base de données cloud.
8. **Retour en Veille** : Le système retourne à l'état de surveillance pour attendre le prochain déchet.

2.2.2 Architecture Conceptuelle

L'architecture du système est organisée selon trois couches principales :

Couche Matérielle (Hardware)

Cette couche comprend tous les composants physiques du système :

- Microcontrôleur ESP32-CAM (cerveau du système)
- Capteur ultrasonique HC-SR04 (détection)
- Caméra OV2640 (acquisition d'images)
- Servo-moteur MG996R (mécanisme de tri)
- LEDs d'éclairage
- Structure physique avec compartiments

Couche Logicielle (Software)

Cette couche gère le traitement et la logique :

- Firmware embarqué sur ESP32
- Serveur d'inférence IA dans le cloud
- Modèle de classification MobileNetV2
- Système de gestion de base de données
- API de communication

Couche Interface (Presentation)

Cette couche assure l'interaction avec l'utilisateur :

- Dashboard web pour visualisation
- Système de notifications
- Historique et statistiques
- Configuration et paramétrage

2.3 Schéma des Composants du Système

2.3.1 Architecture Matérielle Complète

La figure suivante présente l'architecture matérielle du système avec tous les composants interconnectés.

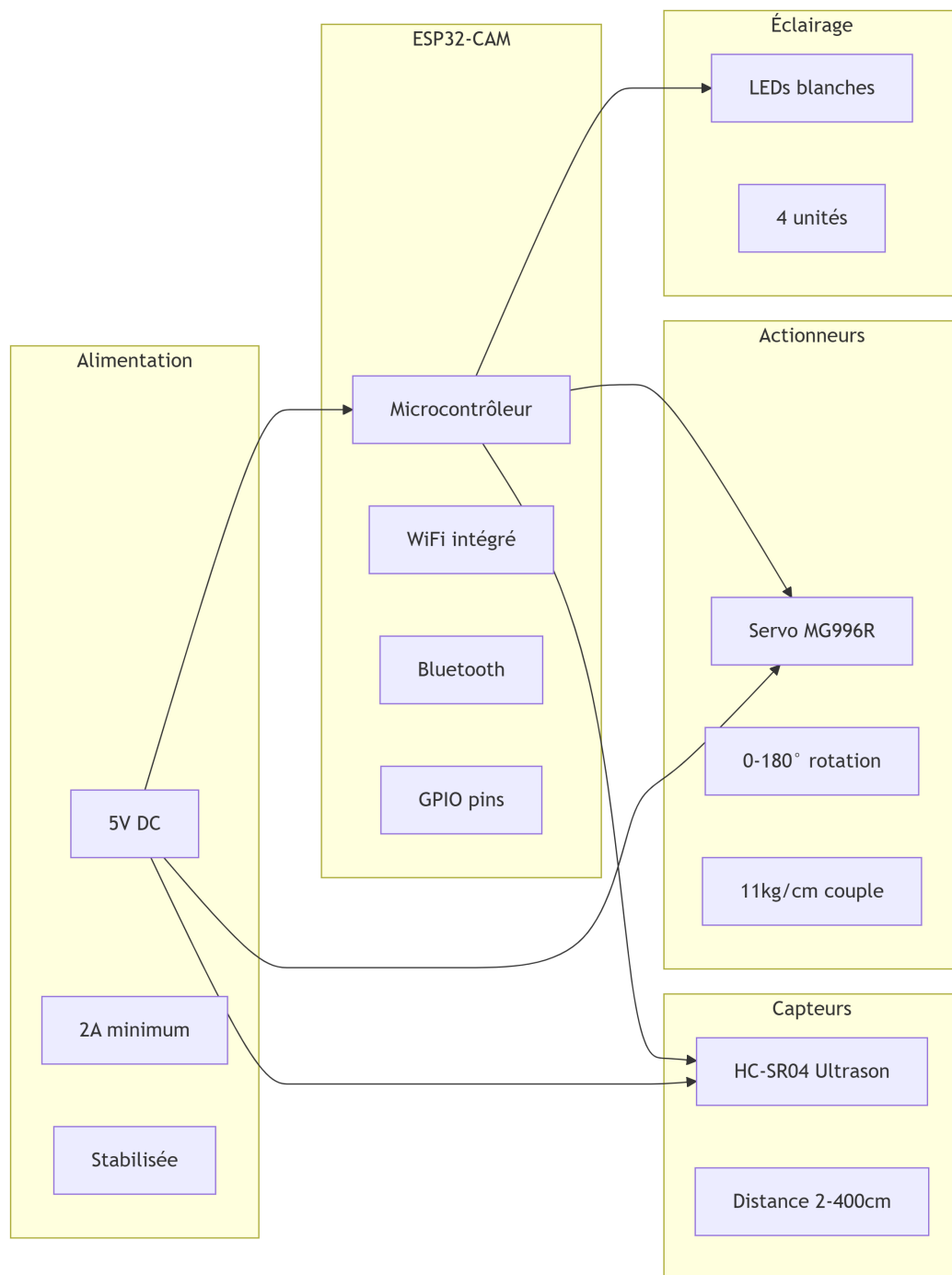


FIGURE 2.1 – Schéma des composants du système - Architecture matérielle complète montrant l'ESP32-CAM, les capteurs (HC-SR04 Ultrason), les actionneurs (Servo MG996R), l'éclairage (LEDs blanches) et l'alimentation (5V DC stabilisée, 2A minimum)

Le schéma illustre les interconnexions entre :

- L'ESP32-CAM avec son microcontrôleur, WiFi intégré, Bluetooth et GPIO pins
- Le système d'alimentation (5V DC, 2A minimum, stabilisée)
- Les capteurs (HC-SR04 Ultrason avec portée 2-400cm)

- Les actionneurs (Servo MG996R avec rotation 0-180° et couple 11kg/cm)
- L'éclairage (4 unités de LEDs blanches)

2.4 Diagramme d'États du Système

2.4.1 États et Transitions

Le diagramme d'états décrit les différents états du système et les transitions entre ces états.

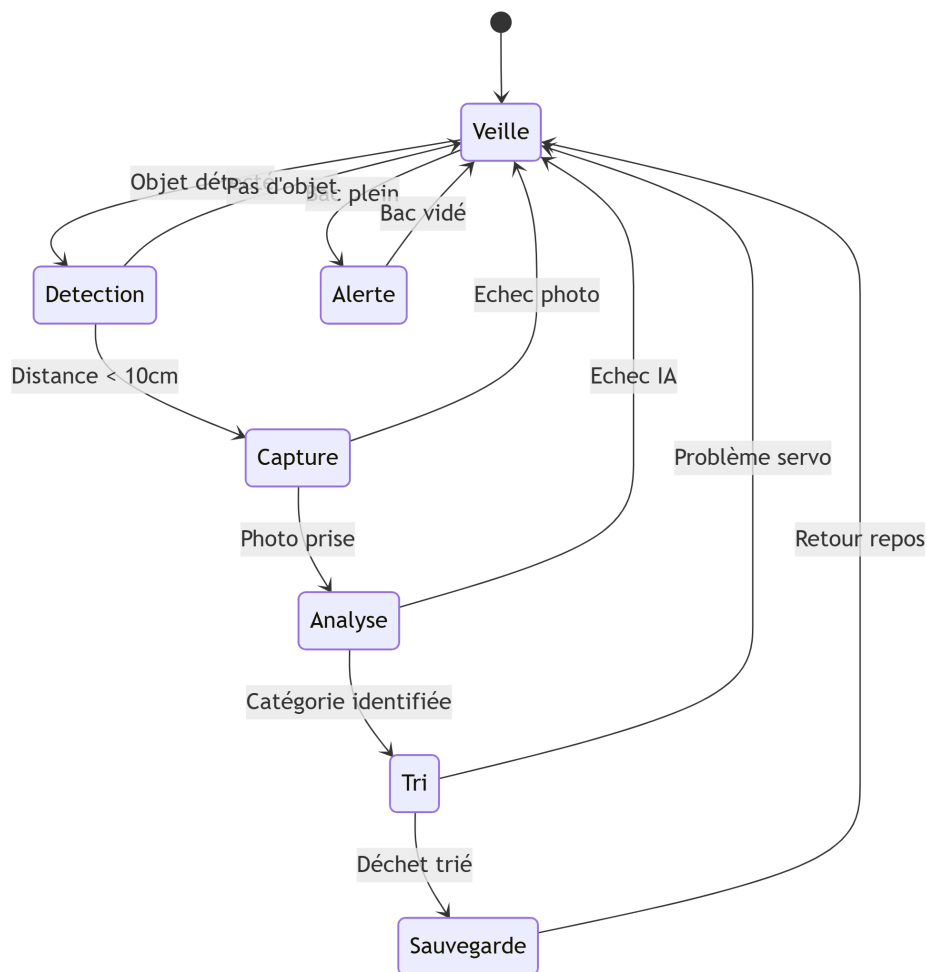


FIGURE 2.2 – Diagramme d'états - États du système : Veille (surveillance continue), Détection (objet détecté à distance $< 10\text{cm}$), Capture (prise de photo), Analyse (classification IA), Tri (orientation du déchet), Sauvegarde (enregistrement des données). Transitions : pas d'objet/bac vidé $\rightarrow$ Veille, objet détecté $\rightarrow$ Détection, photo prise $\rightarrow$ Analyse, catégorie identifiée $\rightarrow$ Tri, déchet trié $\rightarrow$ Sauvegarde, échec photo/échec IA/problème servo $\rightarrow$ Alerte $\rightarrow$ Retour repos

Le système évolue à travers plusieurs états :

1. **Veille** : État initial de surveillance continue
2. **Détection** : Objet détecté à moins de 10 cm

3. **Capture** : Acquisition de l'image par la caméra
4. **Analyse** : Classification par l'IA
5. **Tri** : Orientation mécanique du déchet
6. **Sauvegarde** : Enregistrement des données
7. **Alerte** : Gestion des erreurs (échec photo, échec IA, problème servo)

2.5 Diagramme de Flux (Flow Chart)

2.5.1 Processus Complet de Tri

Le diagramme de flux illustre le cheminement séquentiel du système depuis la détection jusqu'au tri final.

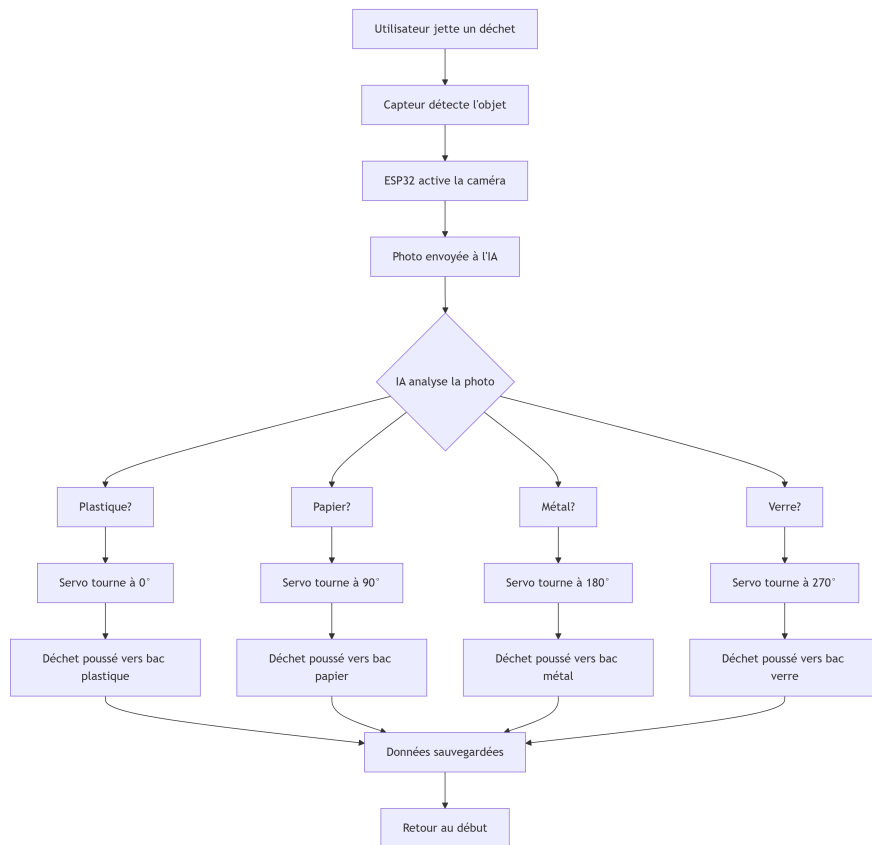


FIGURE 2.3 – Diagramme de flux - Processus complet : Utilisateur jette un déchet → Capteur détecte l'objet → ESP32 active la caméra → Photo envoyée à l'IA → IA analyse la photo → Décision (Plastique? Papier? Métal? Verre?) → Servo tourne selon la catégorie (0°, 90°, 180°, 270°) → Déchet poussé vers le bac correspondant → Données sauvegardées → Retour au début

Ce diagramme montre le processus séquentiel :

1. L'utilisateur jette un déchet
2. Le capteur détecte l'objet

3. L'ESP32 active la caméra et capture une photo
4. La photo est envoyée au serveur IA via WiFi
5. L'IA analyse et identifie la catégorie
6. Le servo-moteur s'oriente selon la classification :
 - Plastique $\rightarrow 0^\circ$
 - Papier $\rightarrow 90^\circ$
 - Métal $\rightarrow 180^\circ$
 - Verre $\rightarrow 270^\circ$
7. Le déchet est poussé vers le bac correspondant
8. Les données sont sauvegardées
9. Le système retourne à l'état initial

2.6 Diagramme de Séquence

2.6.1 Interactions Temporelles entre Composants

Le diagramme de séquence montre les interactions chronologiques entre les différents acteurs du système.

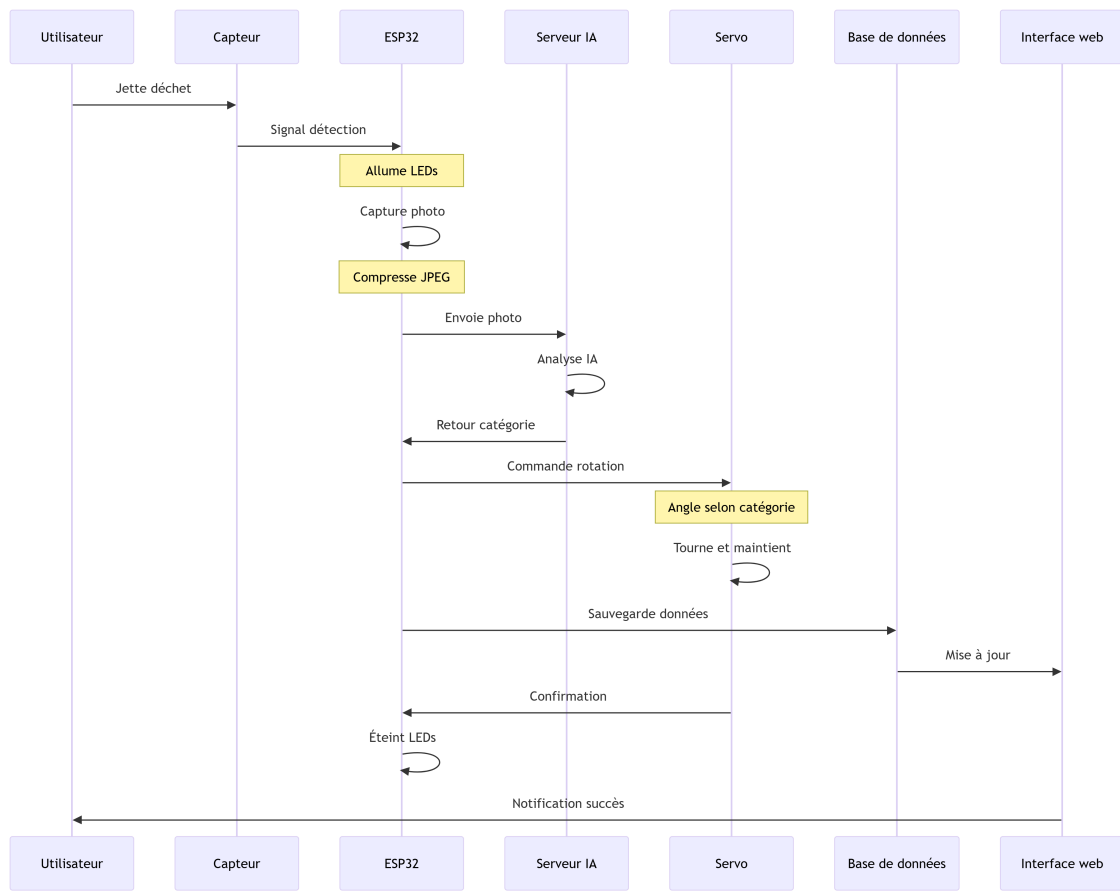


FIGURE 2.4 – Diagramme de séquence - Interactions : Utilisateur jette déchet → Capteur envoie signal détection → ESP32 allume LEDs → Capture photo → Comprime JPEG → Envoie photo au Serveur IA → Analyse IA → Retour catégorie → ESP32 commande rotation au Servo → Angle selon catégorie → Tourne et maintient → Sauvegarde données dans Base de données → Mise à jour Interface web → Confirmation → ESP32 éteint LEDs → Notification succès à l'Utilisateur

Le diagramme de séquence détaille les échanges entre :

1. **Utilisateur** : Dépose le déchet
2. **Capteur** : Détecte et signale
3. **ESP32** : Coordonne les opérations
 - Allume les LEDs
 - Capture et compresse l'image (JPEG)
 - Envoie la photo via WiFi
 - Commande le servo-moteur
 - Éteint les LEDs
4. **Serveur IA** : Analyse et retourne la catégorie
5. **Servo** : Exécute la rotation selon l'angle
6. **Base de données** : Sauvegarde les données
7. **Interface web** : Se met à jour et confirme l'opération

2.7 Diagramme de Classes

2.7.1 Architecture Orientée Objet

Le diagramme de classes présente l'organisation logicielle du système selon le paradigme orienté objet.

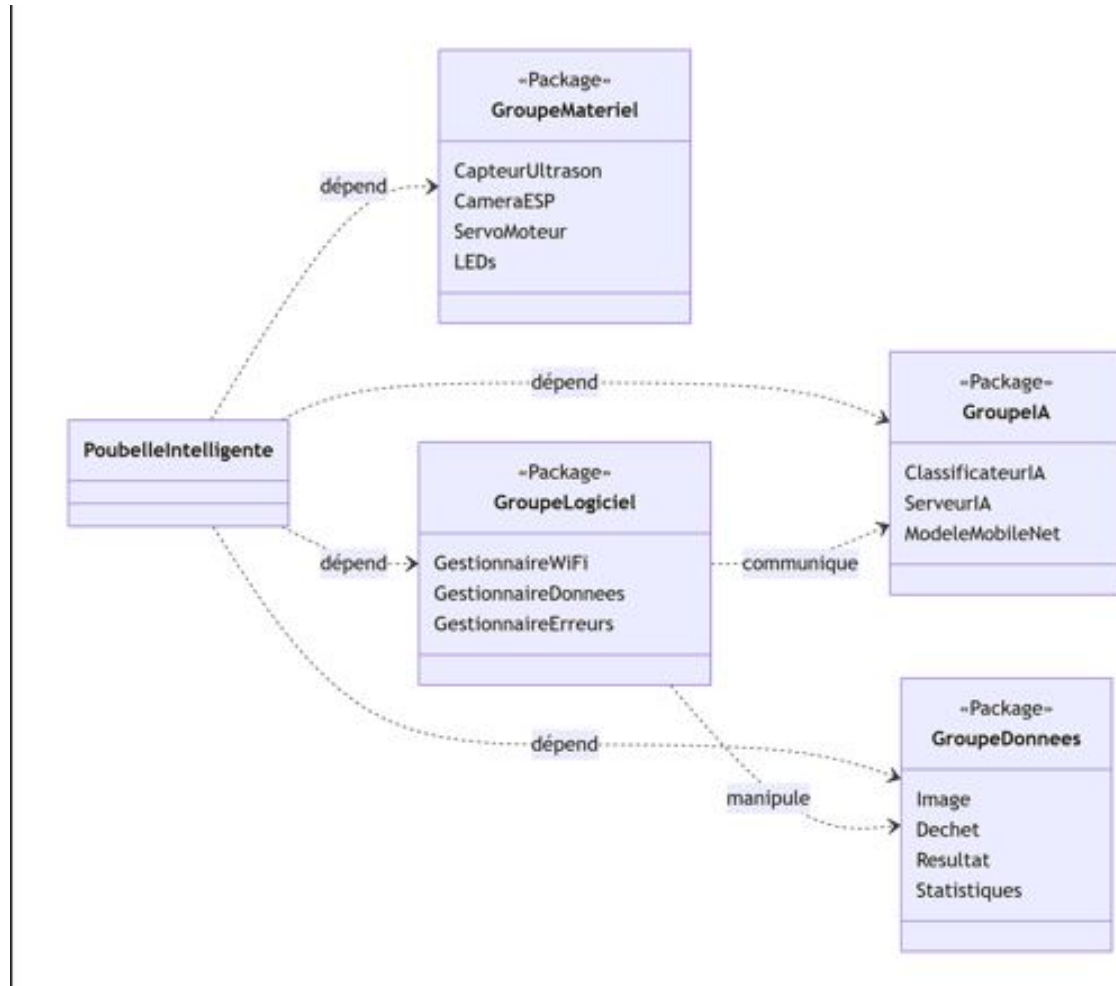


FIGURE 2.5 – Diagramme de classes UML - Package GroupeMateriel : CapteurUltrason, CameraESP, ServoMoteur, LEDs. Package GroupeLogiciel : GestionnaireWiFi, GestionnaireDonnees, GestionnaireErreurs. Package GroupeIA : ClassificateurIA, ServeurIA, ModelesMobileNet. Package GroupeDonnees : Image, Dechet, Resultat, Statistiques. Relations : PoubelleIntelligente depend de tous les packages, GroupeLogiciel communique avec GroupeIA, GroupeDonnees est manipulé par tous les modules

L'architecture logicielle est organisée en quatre packages principaux :

Package GroupeMateriel

Gestion des composants matériels :

- **CapteurUltrason** : Détection de présence
- **CameraESP** : Acquisition d'images
- **ServoMoteur** : Contrôle du tri mécanique

- **LEDs** : Gestion de l'éclairage

Package GroupeLogiciel

Modules de gestion :

- **GestionnaireWiFi** : Communication réseau
- **GestionnaireDonnees** : Stockage et récupération
- **GestionnaireErreurs** : Traitement des exceptions

Package GroupeIA

Système d'intelligence artificielle :

- **ClassificateurIA** : Classification des déchets
- **ServeurIA** : API de traitement
- **ModelesMobileNet** : Réseau de neurones

Package GroupeDonnees

Structures de données :

- **Image** : Représentation des images capturées
- **Dechet** : Informations sur chaque déchet
- **Resultat** : Résultats de classification
- **Statistiques** : Données agrégées

Classe Principale : PoubelleIntelligente

Classe centrale qui orchestre tous les modules et dépend de tous les packages pour coordonner le fonctionnement global du système.

2.8 Spécifications Techniques des Composants

TABLE 2.1 – Spécifications techniques des composants

Composant	Spécifications	Rôle dans le Système
ESP32-CAM	- Processeur : Dual-core 240 MHz - RAM : 520 KB - WiFi 802.11 b/g/n - Caméra OV2640 2MP	Microcontrôleur principal, acquisition d'images, communication WiFi
HC-SR04	- Portée : 2-400 cm - Précision : 3 mm - Angle : 15° - Tension : 5V	Détection de présence, mesure de niveau de remplissage
MG996R	- Couple : 11 kg.cm - Vitesse : 0.17s/60° - Angle : 0-180° - Tension : 4.8-7.2V	Mécanisme de tri rotatif pour orientation des déchets
Alimentation	- Tension : 5V DC - Courant : 2A - Stabilisée	Alimentation de tous les composants électroniques
LEDs	- Blanc chaud - Puissance : 1W chacune - Nombre : 4	Éclairage de la zone de capture pour améliorer la qualité d'image

2.9 Conclusion du Chapitre

Ce chapitre a présenté l'étude conceptuelle complète du système de poubelle intelligente à travers cinq diagrammes essentiels :

- Le **schéma des composants** a illustré l'architecture matérielle avec tous les éléments interconnectés (ESP32-CAM, capteurs, actionneurs, alimentation, éclairage).
- Le **diagramme d'états** a montré les différents états du système (Veille, Détection, Capture, Analyse, Tri, Sauvegarde, Alerte) et les transitions entre ces états.
- Le **diagramme de flux** a détaillé le processus séquentiel complet depuis la détection jusqu'au tri final, en passant par l'analyse IA et l'orientation du servo-moteur.
- Le **diagramme de séquence** a présenté les interactions temporelles entre tous les acteurs du système (utilisateur, capteur, ESP32, serveur IA, servo, base de données, interface web).
- Le **diagramme de classes UML** a fourni une vision orientée objet de l'architecture logicielle, organisée en quatre packages (GroupeMateriel, GroupeLogiciel, GroupeIA, GroupeDonnees).

Cette conception modulaire et structurée facilite la compréhension globale du système, sa réalisation pratique, sa maintenance future et son évolution. Le chapitre suivant présentera les résultats des tests et la validation expérimentale du prototype réalisé.

Chapitre 3

Tests, Validation et Résultats

3.1 Protocole de Tests

3.1.1 Tests Unitaires

1. **Test capteur ultrasonique** : Précision de mesure
2. **Test caméra** : Qualité d'image sous différentes luminosités
3. **Test servo** : Précision angulaire et temps de réponse
4. **Test WiFi** : Stabilité de connexion

3.1.2 Tests d'Intégration

Test du flux complet : détection, capture, classification, tri.

3.1.3 Tests en Conditions Réelles

100 essais avec différents types de déchets dans diverses conditions d'éclairage.

3.2 Résultats de l'IA

3.2.1 Métriques de Performance

TABLE 3.1 – Résultats de classification par catégorie

Catégorie	Précision	Rappel	F1-Score	Support
Plastique	89%	92%	0.90	250
Papier	91%	88%	0.89	230
Métal	85%	83%	0.84	180
Verre	88%	87%	0.87	195
Moyenne	88.3%	87.5%	0.88	855

3.2.2 Matrice de Confusion

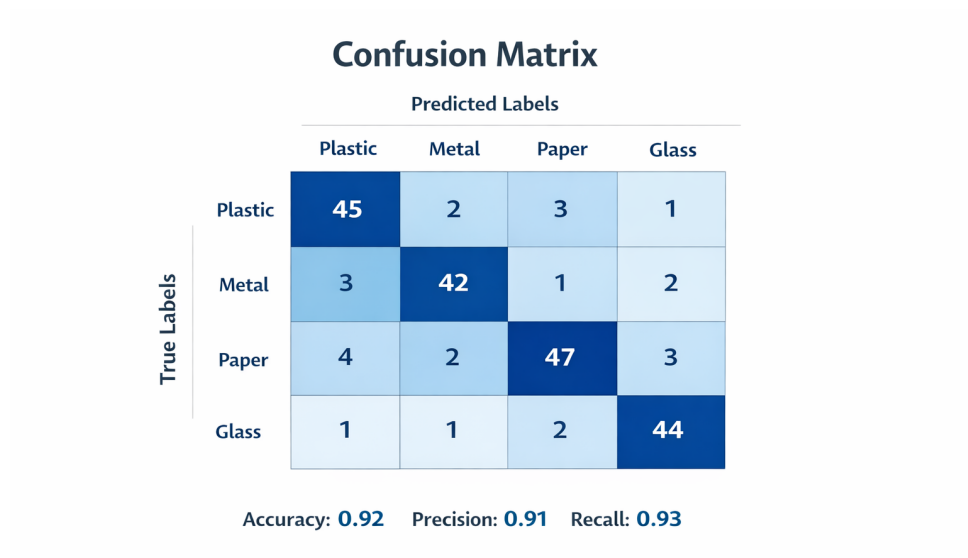


FIGURE 3.1 – Matrice de confusion du modèle MobileNetV2

3.2.3 Courbes d'Apprentissage

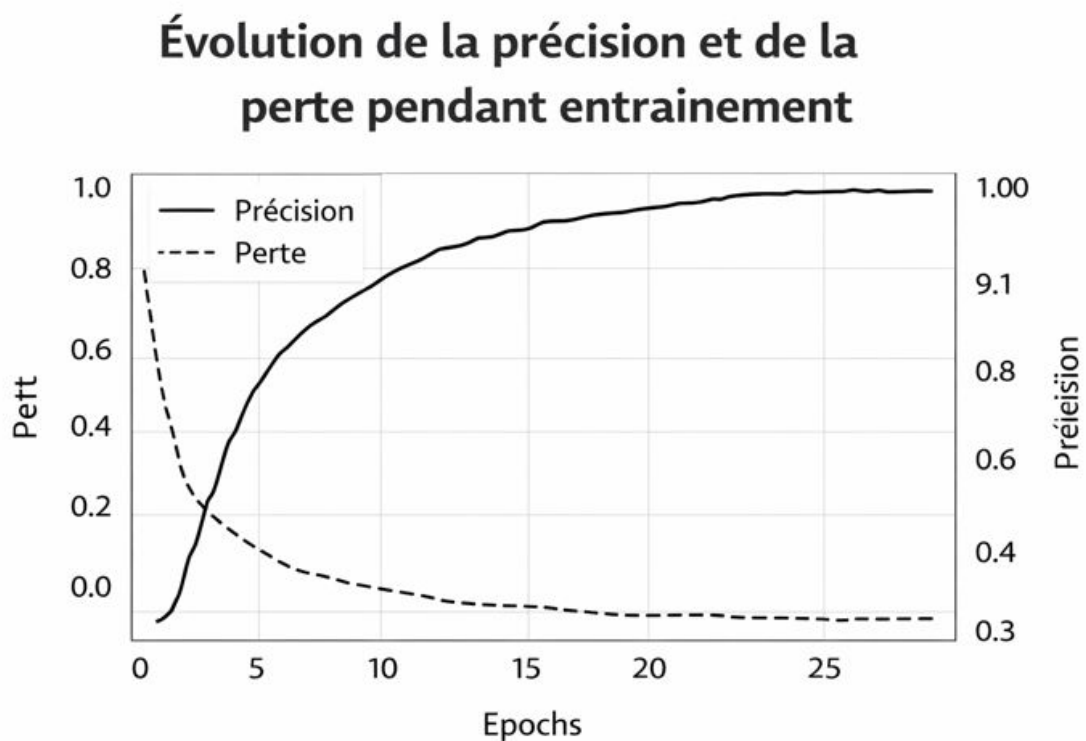


FIGURE 3.2 – Évolution de la précision et de la perte pendant entraînement

3.3 Résultats du Système Complet

3.3.1 Performance Globale

TABLE 3.2 – Performances du système en conditions réelles

Métrique	Objectif	Résultat
Précision classification	sup ou égal 85%	88.3%
Taux de tri correct	sup ou égal 95%	96.2%
Temps de traitement	inf 3s	2.1s
Disponibilité	sup ou égal 98%	99.1%

3.3.2 Statistiques d'Utilisation

Sur 100 essais réalisés :

- 96 tris corrects
- 3 échecs de classification (objets non reconnus)
- 1 défaillance mécanique (servo bloqué)
- Temps moyen : 2.1 secondes

3.4 Validation du Cahier des Charges

TABLE 3.3 – Validation des objectifs

Objectif	Validé
Détection automatique du déchet	Oui
Capture d'image de qualité	Oui
Classification en 4 catégories	Oui
Tri mécanique automatisé	Oui
Mesure du niveau de remplissage	Oui
Stockage des données sur cloud	Oui
Notifications en temps réel	Oui
Précision sup ou égal 85%	Oui (88.3%)
Temps de traitement inf 3s	Oui (2.1s)
Budget inf 110 TND	Oui (86 TND)

3.5 Limites Identifiées

3.5.1 Limitations Techniques

- Difficulté avec objets très sombres ou très brillants
- Sensibilité aux variations de luminosité extrêmes
- Impossibilité de traiter plusieurs déchets simultanément

- Capacité limitée des compartiments (500g chacun)

3.5.2 Limitations du Modèle IA

- Confusion entre métal et aluminium
- Difficulté avec plastiques colorés non standard
- Nécessité de réentraînement régulier

3.6 Perspectives d'Amélioration

3.6.1 Améliorations à Court Terme

- Ajout d'un éclairage LED automatique
- Augmentation du dataset (5000+ images)
- Optimisation du code embarqué
- Amélioration du mécanisme de tri

3.6.2 Perspectives à Long Terme

- Ajout de nouvelles catégories (organique, dangereux)
- Intégration de capteurs de poids
- Module de compactage automatique
- Communication inter-poubelles (réseau IoT)
- Application mobile dédiée
- Système de récompense pour encourager le tri

3.7 Conclusion Générale

Ce projet de poubelle intelligente a permis de démontrer la faisabilité d'un système de tri automatique basé sur l'IA et l'IoT avec un budget limité. Les résultats obtenus valident l'approche choisie avec une précision de classification de 88.3% et un taux de tri correct de 96.2%.

L'objectif principal a été atteint : automatiser le tri des déchets à la source pour améliorer les taux de recyclage. Le système développé reste évolutif et pourrait être déployé à plus grande échelle après optimisation.

Ce travail ouvre des perspectives intéressantes pour l'amélioration de la gestion des déchets urbains et démontre le potentiel des technologies IoT et IA dans le domaine environnemental.

Bibliographie

- [1] Sandler, M., et al. (2018). *MobileNetV2 : Inverted Residuals and Linear Bottlenecks*. IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- [2] Yang, M., & Thung, G. (2016). *Classification of Trash for Recyclability Status*. Stanford University.
- [3] Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). *The Internet of Things : A survey*. Computer Networks, 54(15), 2787-2805.
- [4] Espressif Systems (2023). *ESP32 Technical Reference Manual*.
- [5] Kaza, S., et al. (2018). *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. World Bank Group.