



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة – عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE – ANNABA

Département Génie Industriel

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme d'INGÉNIEUR D'ETAT

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance et Fiabilité des Systèmes Industrie

Présenté par :

Abdel Hafid SALHAT

Yaakoub LAHBALI

Mohamed Haitem BELILET

Youcef MIHOUB

UN SYSTEME DE TRI BASE SUR L'INTELLIGENCE ARTIFICIEL POUR LES PRODUITS AGROALIMENTAIRE.

Encadré par :

Dr. Salim KEBIR

Dr. Faouzi BOUCHARB

ENSTI Annaba

Membres du jury :

Dr. Nour Elislem KARABADJI

Président

ENSTI Annaba

Dr. Adel DJELLAL

Examineur

ENSTI Annaba

Pr. Messaoud DJEGHABA

Examineur

ENSTI Annaba

M. Abdelali BOUZIDI

Invité

SARL Lala SALHA

Année 2025

Remerciements

Nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à nos encadrants, Monsieur Bouchareb Faouzi et Monsieur Kebir Salim, pour leur accompagnement tout au long de ce projet. Leur disponibilité, leurs conseils avisés, ainsi que leur bienveillance ont grandement contribué à l'aboutissement de ce travail. Leur rigueur scientifique et leur sens pédagogique nous ont permis d'évoluer dans un cadre stimulant, enrichissant à la fois sur le plan technique et humain.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles respectives, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leur compréhension tout au long de notre parcours. Leur présence constante à nos côtés, leurs encouragements dans les moments de doute, ainsi que les sacrifices consentis pour nous permettre d'avancer, ont été essentiels à notre réussite. Sans leur amour, leur confiance et leur motivation, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Enfin, ce projet n'aurait pas pu aboutir sans une collaboration étroite entre nous, étudiants du groupe, et nous souhaitons souligner l'esprit d'équipe, l'entraide et l'engagement dont chacun a fait preuve durant toute la réalisation de ce mémoire

Dédicaces

*Nous dédions ce travail à nos chers parents, pour leur amour
inconditionnel, leur patience, et leurs prières constantes,*

Qui ont été pour nous une source de force tout au long de ce parcours.

*À nos familles et nos amis, pour leur soutien, leurs encouragements et leur
présence précieuse à chaque étape de notre formation.*

Et

*À toutes les personnes qui nous ont guidés, soutenus ou inspirés, de près
ou de loin, dans cette aventure universitaire que nous avons menée avec
passion et détermination.*

الملخص:

يعرض هذا البحث تصميم وتنفيذ نظام فرز آلي يعتمد على الذكاء الاصطناعي في القطاع الزراعي والغذائي. يتمثل الهدف الرئيسي في تحسين إنتاجية وجودة عملية الفرز، خصوصاً بالنسبة للطماطم، من خلال الكشف التلقائي باستخدام الكاميرا ومعالجة الصور بذكاء. يعتمد النظام على خوارزميات تصنيف خاضعة للإشراف لتمييز المنتجات حسب معايير بصرية Raspberry Pi مثل اللون والشكل والحجم. تم استخدام قاعدة بيانات للصور لتدريب النموذج، الذي تم تشغيله على جهاز مزود بكاميرا. أظهرت النتائج فعالية واعدة لإمكانية دمج هذا النظام مستقبلاً في خطوط الإنتاج.

الكلمات المفتاحية:

الفرز الآلي، الذكاء الاصطناعي، الصناعات الغذائية، راسبيري باي، الرؤية الحاسوبية، التعلم الخاضع للإشراف، الطماطم

Résumé :

Ce mémoire présente la conception et la mise en œuvre d'un système de tri automatique basé sur l'intelligence artificielle, appliqué au secteur agroalimentaire. L'objectif principal est d'améliorer la productivité et la qualité du tri des produits, notamment les tomates, à travers une détection automatique par caméra et un traitement d'image intelligent. Le système utilise des algorithmes de classification supervisée pour différencier les produits selon des critères visuels (couleur, forme, taille). Une base de données d'images a été utilisée pour l'entraînement du modèle, déployé sur un Raspberry Pi équipé d'une caméra. Les résultats obtenus montrent une efficacité prometteuse pour une intégration future dans les chaînes de production.

Mots clé : Tri automatique, Intelligence artificielle, Agroalimentaire, Raspberry Pi, Vision par ordinateur, Apprentissage supervisé, Tomates.

Abstract:

This thesis presents the design and implementation of an AI-based automatic sorting system applied to the agri-food sector. The main objective is to enhance productivity and the quality of product sorting, particularly tomatoes, using automatic camera detection and intelligent image processing. The system employs supervised classification algorithms to differentiate products based on visual criteria (color, shape, size). An image database was used to train the model, which is deployed on a Raspberry Pi equipped with a camera. The results demonstrate promising efficiency for future integration into production lines.

Keywords: Automatic sorting, Artificial intelligence, Agri-food, Raspberry Pi, Computer vision, Supervised learning, Tomatoes.

Liste des abréviations

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrène (plastique technique utilisé en impression 3D)

AI : Artificial Intelligence (Intelligence Artificielle)

CFT : CFT Group (Entreprise italienne partenaire technologique)

CNN : Convolutional Neural Network (réseau de neurones convolutifs)

CSV : Comma-Separated Values (format de fichier de données tabulaires)

CVAL : Cross Validation (validation croisée)

FDB : Full Database (base de données complète)

GPIO : General Purpose Input/Output (broches d'entrée/sortie programmables)

HSV : Hue Saturation Value (espace couleur Teinte-Saturation-Valeur)

IA : Intelligence Artificielle

I²C : Inter-Integrated Circuit (protocole de communication série)

ISO : Isolation Forest (algorithme de détection d'anomalies)

NDB : New Database (nouvelle base de données)

NO : Non Optimal CNN (réseau de neurones convolutif non optimal)

NV : Métriques classiques issues de la matrice de confusion

O : Optimal CNN (réseau de neurones convolutif optimisé)

PCA9685 : Pilote PWM 16 canaux via I²C (nom du composant)

PLA : Polylactic Acid (plastique biodégradable utilisé en impression 3D)

PWM : Pulse Width Modulation (modulation de largeur d'impulsion)

RAW : Image brute (non traitée)

RGB : Red Green Blue (modèle de couleurs)

SVM : Support Vector Machine (machine à vecteurs de support)

YOLO : You Only Look Once (modèle de détection d'objets en temps réel)

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : <i>Les systèmes de tri agroalimentaire</i>	10
Tableau 2.2 : <i>Les systèmes de tri agroalimentaire intelligent</i>	11
Tableau 3.1 : <i>Bibliothèques logicielles et environnement de développement</i>	15
Tableau 3.2 : <i>Composants utiliser</i>	21
Tableau 4.1 : <i>Métrique d'évaluation des modèles CNN</i>	24
Tableau 4.2 : <i>Métriques d'évaluation des modèles SVM (images issus du CNN)</i>	25
Tableau 4.3 : <i>Métriques d'évaluation des modèles SVM (Images brutes)</i>	25
Tableau 4.4 : <i>Métriques d'évaluation des modèles Isolation Forest</i>	25
Tableau 4.5 : <i>Métriques d'évaluation des modèles Isolation Forest (images brute)</i> ..	26
Tableau 4.6 : <i>Métrique d'évaluation des modèles YOLO</i>	26
Tableau 4.7 : <i>Performance de détection et de classification des objets</i>	28
Tableau 4.8 : <i>Analyse du temps de traitement et d'exécution des actions de tri</i>	28
Tableau 4.9 : <i>Résultat de prédiction</i>	29
Tableau 4.10 : <i>Résumé statistique des résultats expérimentaux</i>	29
Tableau 4.11 : <i>Temps d'exécution de la première prédiction</i>	30

Liste des figures

Figure 3.1 : Extrait de la base de 6500 images (kaggle).....	14
Figure 3.2: Nouvelle base de données créer.....	15
Figure 3.3: Etiquettes créés avec LabelStudio.....	15
Figure 3.4: Organigramme de fonctionnement.....	18
Figure 3.5: Modélisation de prototype avec SolidWorks.....	19
Figure 3.6: Image descriptif réel de prototype finale.....	19
Figure 3.7 : Raspberry Pi5.....	20
Figure 3.8: Capteur infrarouge E18-D80NK.....	20
Figure 3.9: Caméra Raspberry Pi (CSI) Module 8 MP.....	21
Figure 3.10: PCA9685 PWM Driver.....	21
Figure 3.11: Servomoteur SG90.....	21
Figure 3.12: Schéma de câblage physique du système de tri avec Raspberry Pi.....	21
Figure 3.13: Schéma électrique détaillé	22
Figure 4.1: Matrice de confusion du modèle YOLO ré-entraîné.....	30
Figure 4.2: Matrice de confusion du modèle YOLO en conditions réelles	31

Sommaire

Introduction générale	01
Composition du manuscrit.....	01
1 Présentation de l'entreprise et problématique	
1.1 Présentation du complexe agroalimentaire CARA.....	05
1.1.1 Localisation géographique.....	05
1.1.2 Historique.....	05
1.1.3 Organisation du complexe.....	05
1.2 Problématique et motivation.....	06
1.2.1 Problématique.....	06
1.2.2 Motivation.....	07
2 État de l'art	
2.1 Le secteur agroalimentaire.....	09
2.1.1 Définition et rôle.....	09
2.1.2 Importance stratégique.....	09
2.1.3 L'évolution technologique du secteur.....	09
2.1.4 Les enjeux et difficultés du secteur.....	09
2.1.5 L'intégration de l'automatisation et de l'intelligence artificielle.....	10
2.2 Systèmes de tri agroalimentaire.....	10
2.2.1 Principaux acteurs et modèles.....	10
2.2.2 Tendances et innovations.....	11
2.3 Systèmes de tri intelligents.....	11
2.3.1 Technique d'apprentissage automatique pour la vision par ordinateur et la déttection d'anomalies.....	11
2.3.2 Les méthode d'évaluation.....	12

3 Contribution personnelle

3.1 Développement des modèles d'intelligence artificielle.....	14
3.1.1 Constitution et préparation de la base de données.....	14
3.1.2 Bibliothèques logicielles et environnement de développement.....	15
3.1.3 Modèles développés et chaîne de traitement.....	16
3.1.4 Fonctionnement global du système.....	17
3.1.5 Architecture de l'algorithme de détection et de tri des tomates.....	17
3.2 Développement d'un convoyeur pour un système de tri.....	18
3.2.1 Conception et modélisation.....	19
3.2.2 Réalisation du prototype.....	19
3.2.3 Résultats obtenus.....	20
3.3 Contribution matérielle et fonctionnelle.....	20
3.3.1 Schéma électronique global du système.....	21
4 Résultats expérimentaux et discussions	
4.1 Evaluation expérimentale des modèles IA et résultats obtenus.....	24
4.2 Evaluation en conditions réelles sur le convoyeur.....	27
4.2.1 Déroulement des tests.....	27
4.2.2 Résultats par ligne.....	27
4.2.3 Résultats statistiques globaux.....	29
4.2.4 Temps d'exécution de la première prédiction.....	30
4.2.5 Evaluation via matrice de confusion.....	30

Conclusion générale	33
----------------------------------	----

Références bibliographiques

Annexes

Introduction Générale

Introduction Générale

L'industrie agroalimentaire occupe une place stratégique dans l'économie algérienne, en assurant l'approvisionnement en denrées tout en générant emplois et richesse. Au sein du complexe agroalimentaire CARA – Echatt, la transformation de la tomate en concentré et en harissa constitue une activité majeure, reposant encore largement sur des opérations manuelles pour le tri des légumes. Or, le tri manuel présente plusieurs limites : lenteur, fatigue des opérateurs, variabilité liée à l'erreur humaine et risques matériels (corps étrangers non détectés).

Face à ces enjeux, l'intégration de l'intelligence artificielle (IA) et de la vision par ordinateur représente une voie prometteuse pour moderniser et fiabiliser les chaînes de production. Ce travail de fin d'études propose la conception et la réalisation d'un système de tri automatique des tomates, combinant :

- un module de détection IA (modèles CNN et YOLO) pour classifier les produits agroalimentaires et repérer les corps étrangers,
- un prototype mécanique (convoyeur, servomoteurs pilotés) pour l'évacuation ciblée des éléments non conformes.

L'objectif est d'améliorer la précision, la vitesse et la traçabilité du tri, tout en réduisant les coûts et les pertes. Les développements portent à la fois sur l'algorithme de classification, l'intégration matérielle et l'évaluation expérimentale en conditions réelles.

1. Composition du manuscrit

Le mémoire est structuré en quatre grandes parties, complétées par une conclusion, des références bibliographiques et des annexes :

- **Chapitre 1 : Présentation de l'entreprise et problématique :**

Ce chapitre présente l'entreprise d'accueil ainsi que la problématique industrielle à laquelle répond le développement d'un système de tri automatique basé sur l'intelligence artificielle

- **Chapitre 2: État de l'art:**

Ce chapitre propose une revue des travaux existants sur les technologies de tri automatisé et d'intelligence artificielle appliquées à l'agroalimentaire, afin de situer notre projet dans son contexte scientifique et technique.

- **Chapitre 3 : Contribution personnelle :**

Ce chapitre décrit les démarches, les choix technologiques et les réalisations concrètes que nous avons apportées au développement du système de tri au cours de notre projet.

- **Chapitre 4 : Résultats expérimentaux et discussions :**

Ce chapitre expose les résultats obtenus lors des expérimentations menées, accompagnés d'une analyse critique des performances du système et des pistes d'amélioration.

- **Conclusion Générale :**

Ce dernier chapitre résume les principales contributions du projet, en souligne les apports pour l'entreprise et ouvre sur des perspectives d'amélioration et de déploiement à plus grande échelle.

*Chapitre 1 : Présentation de
l'entreprise et problématique*

Introduction

Dans le cadre de ce mémoire, il est essentiel de comprendre l'environnement dans lequel s'inscrit notre étude. Ce chapitre vise à présenter l'entreprise d'accueil, son secteur d'activité, ses principales missions ainsi que son organisation interne. Cette mise en contexte permettra de mieux cerner les enjeux spécifiques liés à la thématique abordée. À partir de cette analyse, nous exposerons également la problématique qui justifie notre démarche, en lien direct avec les besoins et les défis rencontrés sur le terrain.

1.1 Présentation du complexe agroalimentaire CARA

1.1.1 Localisation géographique

Le complexe agroalimentaire CARA est implanté à la Cité 20 Août 1956, dans la commune de El Chatt Ben M'hidi (wilaya d'El Tarf). Son emplacement stratégique lui permet de bénéficier d'un accès facilité aux ressources agricoles locales ainsi qu'aux réseaux de distribution, aussi bien nationaux qu'internationaux.

1.1.2 Historique

Fondée en 2002 par M. Racherache Abderrazek, la société CARA (Conserverie Alimentaire Racherache Abderrazek) a d'abord lancé la production de jus de fruits sous la marque CARAJUS. En 2015, l'entreprise élargit ses activités avec la création de l'unité CARATOMATE, spécialisée dans la production de double concentré de tomate, en partenariat technologique avec la société italienne CFT.

1.1.3 Organisation du complexe

Le complexe se compose de deux unités principales :

- CARAJUS : dédiée à la production de jus de fruits.
- CARATOMATE : consacrée à la transformation des tomates et à la fabrication de harissa.

Dans cette unité, nous avons effectué notre stage afin d'observer et d'analyser de près le fonctionnement industriel d'un acteur majeur de l'agroalimentaire en Algérie. L'unité CARATOMATE, intégrée au complexe CARA, regroupe plusieurs départements essentiels tels que la production, la maintenance, le contrôle qualité et la logistique, assurant une gestion cohérente de l'ensemble de la chaîne de fabrication. Elle se spécialise dans la production de double concentré de tomate en boîtes métalliques ainsi que de harissa, des produits destinés principalement au marché national (grandes surfaces, détaillants), avec une ouverture progressive vers l'exportation. Le processus de fabrication du concentré de tomate se déroule en plusieurs étapes :

1. Réception et tri des tomates.
2. Broyage et chauffage thermique.
3. Concentration sous vide.
4. Pasteurisation.
5. Conditionnement hermétique.
6. Etiquetage et stockage.

À chaque phase, un contrôle qualité rigoureux est appliqué, incluant des analyses physico-chimiques (pH, Brix, acidité), microbiologiques (absence de germes pathogènes) et organoleptiques (couleur, goût, texture), garantissant ainsi des produits conformes aux exigences du marché.

Grâce à cette organisation bien structurée et au respect strict des normes de qualité, l'unité CARATOMATE joue aujourd'hui un rôle central dans le développement de l'industrie agroalimentaire algérienne.

1.2 Problématique et motivation

Lors de notre stage au sein de l'entreprise agroalimentaire CARA Echatt, nous avons constaté que le tri des légumes, notamment celui des tomates, était toujours effectué manuellement. Bien que courante, cette méthode présente plusieurs limites :

- Elle est lente,
- Elle implique une forte charge physique pour les opérateurs,
- Elle est sujette à des erreurs humaines, en particulier pour repérer les produits non conformes ou les corps étrangers.

Un incident survenu durant ce stage a renforcé la prise de conscience : un morceau de métal non détecté dans une caisse de tomates a provoqué une détérioration importante d'un tamis. Ce type de problème met en lumière les failles du tri manuel et la nécessité d'une solution plus fiable.

1.2.1 Problématique

Comment automatiser le tri des légumes de manière intelligente pour améliorer la précision, la vitesse et la sécurité, tout en réduisant les pertes et les coûts dans les chaînes de production agroalimentaire ?

Face à cette réalité, le projet vise à concevoir un système de tri automatisé capable de :

- Évaluer la qualité des tomates (taille, couleur, défauts),
- Détecter et éliminer automatiquement les éléments indésirables (corps étrangers, légumes abîmés ou non conformes),
- Renforcer la sécurité des équipements,
- Moderniser le processus industriel.

1.2.2 Motivation

Animés par la volonté de contribuer activement à l'amélioration des performances industrielles, nous avons choisi de développer une solution innovante reposant sur les technologies d'intelligence artificielle, en particulier la vision par ordinateur et la classification automatique. Ce projet s'inscrit dans une démarche résolument tournée vers l'innovation, avec pour objectif d'optimiser la qualité et l'efficacité des lignes de tri dans l'industrie agroalimentaire. En combinant technologie avancée et exigences de productivité, cette initiative vise à répondre aux nouveaux défis de l'automatisation, tout en apportant une réelle valeur ajoutée en termes de précision, de rapidité et de fiabilité du processus de tri.

Conclusion

La présentation de l'entreprise a permis de mieux comprendre son organisation, ses produits et les défis auxquels elle fait face, notamment en matière de performance et de qualité dans ses processus de production. Ces constats ont permis de définir une problématique claire autour du tri, un enjeu majeur pour améliorer l'efficacité et la compétitivité dans l'industrie agroalimentaire.

Le prochain chapitre sera consacré à l'état de l'art, afin de présenter les concepts, technologies et solutions existantes en matière de tri automatisé et d'intelligence artificielle, qui serviront de base à notre démarche de développement.

Chapitre 2 : État de l'art

Introduction

Dans un monde en constante évolution, où la demande alimentaire mondiale ne cesse de croître, l'industrie agroalimentaire se retrouve au cœur de nombreux enjeux technologiques, économiques et environnementaux. Ce chapitre se propose d'explorer l'état actuel des connaissances liées à ce secteur stratégique, en mettant l'accent sur les transformations apportées par l'automatisation, l'intelligence artificielle et les systèmes de tri intelligents. En parcourant les différentes avancées technologiques et les défis qui en découlent, nous chercherons à mieux comprendre comment ces innovations transforment les pratiques industrielles et ouvrent la voie à une production plus efficace, plus sûre et plus durable.

2.1 Le secteur agroalimentaire

2.1.1 Définition et rôle du secteur agroalimentaire

Le secteur agroalimentaire est un domaine très vaste qui concerne toutes les étapes allant de la production agricole jusqu'à la consommation finale. Il comprend donc la transformation, le conditionnement, le stockage et la distribution des produits alimentaires. En résumé, c'est le lien entre les agriculteurs et les consommateurs. C'est un secteur essentiel, car il permet de nourrir la population, tout en générant de nombreux emplois et de la richesse.

2.1.2 Un secteur stratégique pour l'économie

Dans de nombreux pays, surtout ceux en développement, l'agroalimentaire joue un rôle très important. D'après *FAO (2020)*, ce secteur représente une part importante du produit intérieur brut (PIB) et de l'emploi. En Afrique du Nord, par exemple, l'agroalimentaire contribue à la sécurité alimentaire et à la stabilité des territoires, car il concerne aussi bien les zones rurales que les villes. Il aide aussi à développer les exportations, surtout quand la qualité des produits est bien contrôlée.

2.1.3 L'évolution technologique du secteur

Depuis quelques années, de nombreuses technologies sont arrivées dans le monde de l'agroalimentaire. On parle ici d'automatisation, de capteurs intelligents, de robots et surtout de l'intelligence artificielle (IA). Ces technologies sont utilisées pour rendre le travail plus rapide, plus précis, et pour améliorer la qualité des produits.

Par exemple, selon *Wang et al. (2020)*, l'IA permet aujourd'hui de mieux gérer les chaînes de production en détectant les produits défectueux, en optimisant les processus, et en réduisant les pertes. Des caméras intelligentes sont capables de reconnaître un fruit abîmé, trop petit ou pas assez mûr. Cela aide à faire un tri automatique sans intervention humaine.

2.1.4 Les enjeux et difficultés du secteur

Même avec toutes ces avancées, le secteur agroalimentaire doit faire face à plusieurs défis :

- La pression pour produire plus avec moins de ressources (eau, énergie, etc.).
- Le respect des normes de qualité et de sécurité alimentaire.

- La gestion des déchets et la pollution liée aux activités agroalimentaires.
- Le besoin d'une main-d'œuvre formée pour utiliser les nouvelles technologies. Rahman et al. (2019) soulignent que l'un des grands enjeux est aussi de rendre les systèmes de production plus durables, c'est-à-dire qu'ils doivent respecter l'environnement tout en restant efficaces économiquement.

2.1.5 L'intégration de l'automatisation et de l'intelligence artificielle

Aujourd'hui, de plus en plus d'entreprises agroalimentaires investissent dans l'automatisation. Cela signifie remplacer certaines tâches manuelles par des machines. Quand on ajoute l'intelligence artificielle, on obtient des systèmes encore plus avancés, capables d'analyser des données en temps réel et de prendre des décisions.

Un exemple concret est le tri automatisé des fruits et légumes. Grâce à des caméras et à des algorithmes de vision par ordinateur, il est possible de trier les produits selon leur couleur, leur taille ou leur aspect visuel, ce qui améliore la qualité des produits vendus. Banaeian et al. (2021) montrent dans leur étude que cela permet aussi de réduire le gaspillage et d'augmenter la productivité.

2.2 Les systèmes de tri agroalimentaire

Dans l'industrie agroalimentaire, les systèmes de tri combinent aujourd'hui plusieurs technologies pour garantir qualité, sécurité et rendement (*adapté de Denis, 2020 ; Veret, 2022 ; Legrand, 2021 ; Vrignat, Montmain, & Lamouri, 2009*)

Technologie	Principe / Fonction	Applications typiques
Vision couleur & multi spectrale	Caméras RGB pour détecter défauts visibles ; capteurs VIS/NIR pour composition et maturité	Tomates, fruits à peau sensible, légumes variés
Tri pondéral & volumétrique	Pesée au gramme près (cellules de charge) ; évaluation de la forme via scanner 3D ou laser	Asperges, haricots, fruits calibrés
Tri par induction / magnétisme	Séparation des métaux ferreux et non ferreux en amont des lignes optiques	Tous types de fruits/légumes en vrac
Calibration & pré tri mécanique	Triuses à chaînes, tambours ou goulottes pour un premier tri grossier	Graines, tubercules, légumes racines

Tableau 2.1 : Les systèmes de tri agroalimentaire

2.2.1 Principaux acteurs & modèles

- **Sormac B.V. (AS Chain Sorter)** : 1–150 t/h, calibration multiple. (*Sormac, n.d.*)
- **Cabinplant A/S** : vision haute cadence (320 p/min) pour filetage et filets de poisson. (*Cabinplant, n.d.*)
- **SpanTech** : tri à bras pivotant intégré aux convoyeurs. (*SpanTech, n.d.*)

- **Ryco (Série 843)** : tri par poids, taille, compte ; largeurs 4"–16". (*Rexnord, n.d.*)
- **Yongming Machinery (Série M/R)** : optique couleur pour moisi et corps étrangers. (*Yongming Machinery, n.d.*)
- **Multiscan Systems (i5 Olive Plus)** : tri olives par couleur, forme et taille. (*Multiscan Systems, n.d.*)

2.2.2 Tendances & innovations

- **Fusion de capteurs** : VIS/NIR + laser + induction sur une même machine. (*Denis, 2020*)

- **Modularité & compacité** : solutions rapides à installer et reconfigurer. (*Veret, 2022*)

- **Robots & SAE** : robots pour prélèvement, systèmes avancés d'aide à l'exploitation. (*Legrand, 2021*)

Synthèse : Les systèmes de tri agroalimentaire allient vision optique, pesée, induction et robotique, pilotés par l'IA et connectés en IoT, pour atteindre haute cadence, précision et flexibilité tout en optimisant maintenance et intégration.

2.3 Systèmes de tri intelligents

Les systèmes de tri intelligents combinent robotique et intelligence artificielle pour automatiser le tri et l'adapter aux caractéristiques des produits. Le tableau suivant résume les principales technologies, leurs fonctions et leurs applications.

Technologie	Principe / Fonction	Applications typiques
Automatisation & robotique	Bras robotisés pour saisie/rejet ; modules interchangeables pour reconfiguration rapide	Lignes de tri flexibles et automatisées
IA	Deep Learning pour tri adaptatif	Tri en temps réel

Tableau 2.2 : Les systèmes de tri agroalimentaire

2.3.1 Techniques d'Apprentissage Automatique pour la Vision par Ordinateur et la Détection d'Anomalies

CNN : Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont largement utilisés dans la reconnaissance d'images. Ils reposent sur des couches de convolution capables de détecter des motifs visuels tels que des bords, textures ou formes, et extraient des représentations hiérarchiques de l'image utiles pour la classification (Goodfellow, Bengio, & Courville, 2016).

One-Class SVM : Parmi les approches de détection d'anomalies, le One-Class SVM constitue une méthode supervisée qui modélise une seule classe dite "normale" afin d'identifier les instances atypiques. Il repose sur une transformation implicite des données vers un espace de caractéristiques de grande dimension à l'aide d'un noyau, permettant de définir une frontière de décision autour des données normales (Cohen, Hilario, & Pellegrini, 2004).

Isolation forest : L'Isolation Forest est une méthode non supervisée qui détecte les anomalies en isolant les observations à l'aide d'arbres de décision aléatoires. Les points rapidement isolables, c'est-à-dire nécessitant peu de divisions dans les arbres, sont considérés comme des anomalies (Liu, Ting, & Zhou, 2008).

Yolo : Pour la détection d'objets multiples en temps réel, le modèle YOLO (You Only Look Once) permet la localisation et la classification simultanées d'objets dans une seule passe du réseau. Cette architecture se distingue par sa rapidité et son efficacité, en particulier dans les environnements à contraintes temporelles fortes (Redmon, Divvala, Girshick, & Farhadi, 2016).

Cette approche est cohérente avec des travaux récents dans le domaine agroalimentaire, comme celui de Mukhiddinov, Muminov et Cho (2022), où un modèle YOLOv4 optimisé est utilisé pour classifier automatiquement la fraîcheur de plusieurs fruits et légumes, y compris les tomates, dans des environnements complexes.

2.3.2 Les méthodes d'évaluation

L'évaluation des performances des modèles de classification repose sur plusieurs métriques issues de la matrice de confusion : la précision (proportion de prédictions positives correctes), le rappel (capacité à identifier les instances positives), le F1-score (moyenne harmonique entre précision et rappel), et l'exactitude (proportion d'exemples correctement classés). La validation croisée est une méthode couramment utilisée pour estimer la robustesse et la capacité de généralisation d'un modèle. Elle est particulièrement adaptée aux jeux de données de taille limitée, car elle maximise l'utilisation des exemples disponibles tout en réduisant les risques de sur-apprentissage (Kohavi, 1995).

Conclusion

À travers cette revue de la littérature, nous avons pu constater à quel point le secteur agroalimentaire est aujourd'hui influencé par les nouvelles technologies, en particulier celles liées à la vision par ordinateur, à l'automatisation et à l'intelligence artificielle. Ces outils, loin d'être de simples gadgets, représentent de véritables leviers d'amélioration pour la qualité des produits, la productivité des chaînes de production, et la maîtrise des coûts. Toutefois, leur mise en œuvre soulève également des défis humains, économiques et techniques, notamment en matière de formation, d'intégration et de maintenance. En somme, ce chapitre montre que l'alliance entre savoir-faire traditionnel et innovation technologique est devenue une nécessité pour répondre aux exigences actuelles de l'industrie agroalimentaire.

Chapitre 3 : Contribution

Introduction

Le développement logiciel du système de tri de tomates a nécessité la combinaison de plusieurs modules de traitement d'image, d'apprentissage automatique et d'interfaçage matériel. Cette section présente l'ensemble du travail réalisé : la constitution des bases de données, les bibliothèques utilisées, les modèles testés, la sélection du modèle final, ainsi que les performances observées. Elle inclut également les difficultés rencontrées lors de l'implémentation sur Raspberry Pi et les solutions apportées.

3.1 Développement et implémentation des modèles d'intelligence artificielle

3.1.1 Constitution et préparation de la base de données

La première base de données utilisée a été extraite d'une source publique disponible sur Kaggle, contenant plus de 6 500 images de tomates dans différents états (mûres, non mûres, abîmées, vieilles). Après une phase de filtrage manuel, seules les images claires, nettes et contenant un seul objet ont été conservées, réduisant le jeu de données à environ 400 images.

Ce sous-ensemble a été utilisé pour entraîner un modèle CNN destiné à la classification de la qualité des tomates, ainsi que pour extraire des vecteurs de caractéristiques à des fins de détection d'anomalies

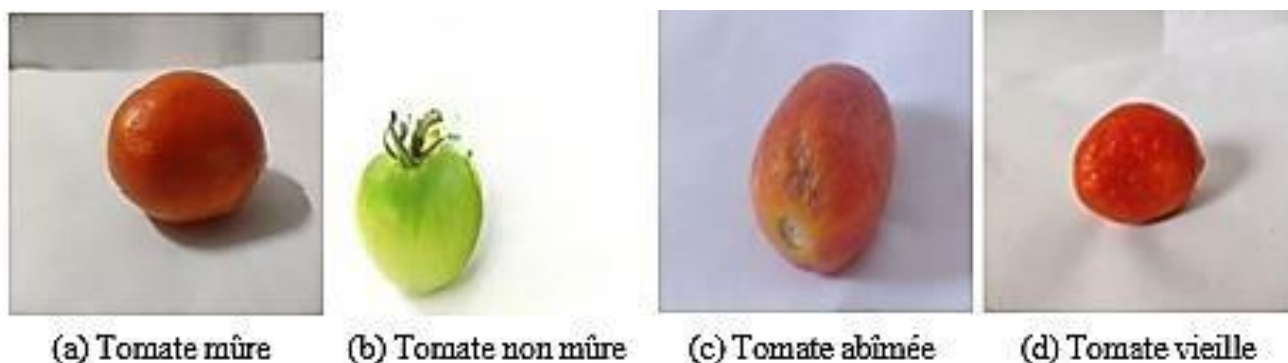


Figure 3.1 : Extrait de la base de 6500 images (Kaggle)

Une seconde base de données a été créée manuellement pour entraîner un modèle YOLO personnalisé. Cette base contient des images capturées par nos soins, représentant deux classes; Tomates, Objets non-tomates

<https://www.kaggle.com/datasets/enalis/tomatoes-dataset>

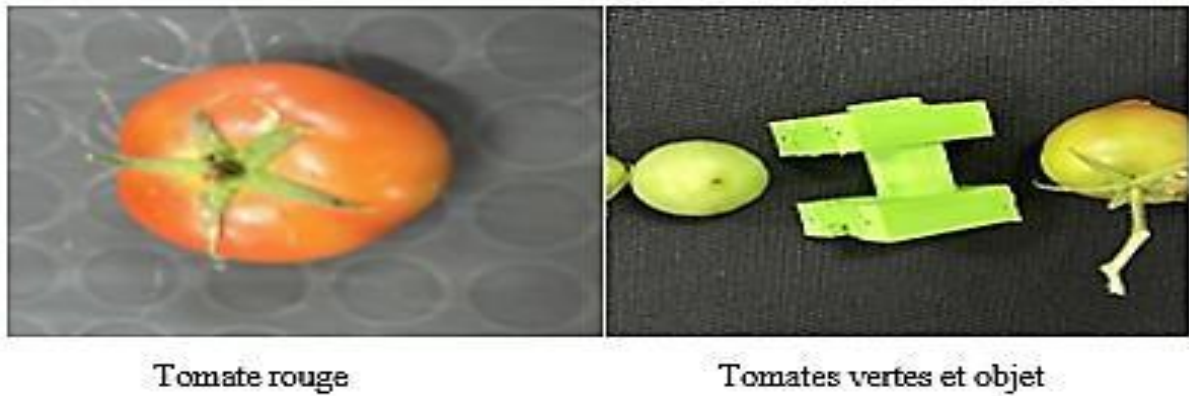


Figure 3.2 : Nouvelle base de données créée

Les images ont été étiquetées avec Label Studio, puis utilisées pour le réentraînement du modèle YOLO.

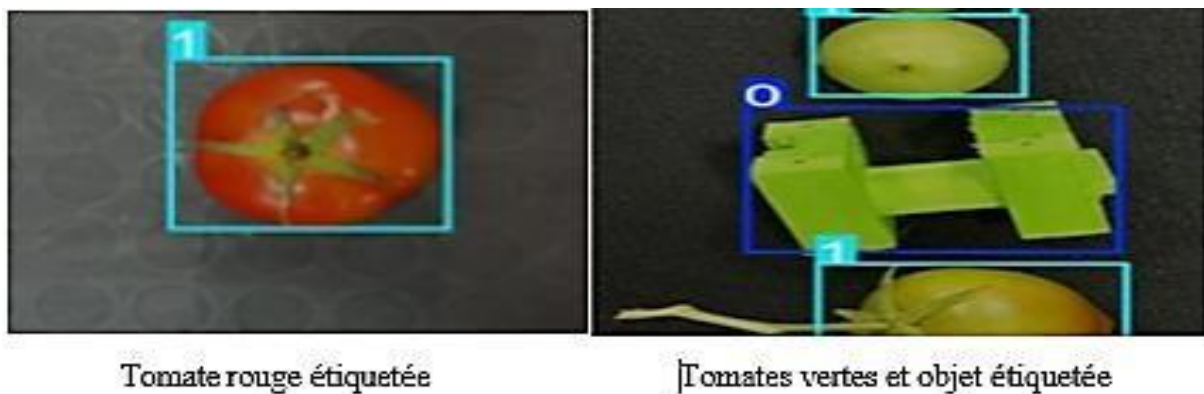


Figure 3.3 : Étiquettes créées avec LabelStudio

3.1.2 Bibliothèques logicielles et environnement de développement

Le projet a été développé en Python, avec les bibliothèques suivantes :

Bibliothèque	Fonction principal
PyTorch	Entraînement des modèles CNN et YOLO
scikit-learn	Implémentation des modèles One-Class SVM et Isolation Forest
OpenCV	Traitement d'images : conversion HSV, détection de contours, affichage
Ultralytics	Détection d'objets en temps réel (YOLOv5)
NumPy & Pandas	Manipulation de données et analyse statistique

Matplotlib & Seaborn	Visualisation graphique des résultats et des performances
----------------------	---

Tableau 3.1 : Bibliothèques logicielles et environnement de développement

Sur Raspberry Pi, la capture d'images a été réalisée via la Bibliothèque PiCamera, car OpenCV ne fonctionnait pas correctement avec la caméra connectée. OpenCV a toutefois été conservé pour le traitement en aval des images. Les tests ont été réalisés sur PC via Jupyter Notebook, puis transférés en scripts Python (.py) pour exécution sur Raspberry Pi. Le modèle final a été optimisé pour tourner en temps réel sur le Raspberry Pi 5.

3.1.3 Modèles développés et chaîne de traitement

Classification CNN :

- Trois classes retenues : tomate mûre, tomate non mûre, et une classe fusionnée "abîmée + vieille"
- Utilisé pour la classification directe et l'extraction de caractéristiques visuelles

Détection d'anomalies :

- Modèles testés : One-Class SVM et Isolation Forest
- Entrées testées : images brutes et vecteurs issus du CNN
- Résultats mitigés, surtout sur les objets très différents des tomates

Filtrage couleur (OpenCV) :

- Détection des tomates rouges ou vertes via conversion en HSV et masquage de plages de teintes
- Utilisé uniquement après détection positive comme "tomate"

Détection YOLO personnalisée :

- Entraîné sur deux classes : tomate et objet non-tomate
- Permet une détection et extraction individuelle d'objets dans chaque frame
- Meilleure précision que les modèles d'anomalie, surtout pour les pièces industrielles

Automatisation matérielle :

-Lorsque l'image capturée est identifiée comme non-tomate ou tomate verte, le Raspberry Pi active ses broches GPIO

Cela envoie un signal vers un mécanisme physique (non détaillé ici) pour éjecter ou rediriger les éléments non conformes

3.1.4 Fonctionnement global du système

Le système de tri automatique repose sur une chaîne d'actions coordonnées, allant de la détection initiale à l'évacuation des éléments non conformes, selon les étapes suivantes :

a) Détection préliminaire

Un capteur infrarouge (IR) détecte l'arrivée d'une tomate sur le convoyeur. Lors de cette détection, la sortie du capteur bascule à l'état bas, ce qui déclenche automatiquement la caméra CSI connectée au Raspberry Pi 5.

b) Acquisition et classification

L'image capturée par la caméra est traitée par un réseau de neurones embarqué sur le Raspberry Pi. Ce module de traitement permet de déterminer si la tomate est verte ou si la présence d'un corps étranger est détectée sur le convoyeur.

c) Commande des servomoteurs

En fonction du résultat de la classification, le Raspberry Pi envoie une commande via le bus I²C au module PCA9685, qui génère quatre signaux PWM pour contrôler les quatre servomoteurs. Chaque servo agit en conséquence pour évacuer les tomates vertes ou les objets indésirables hors du convoyeur, laissant uniquement passer les tomates rouges en bon état.

d) Évacuation et journalisation

Chaque servomoteur positionne son bras à l'angle approprié pour orienter correctement l'élément détecté

3.1.5 Architecture de l'algorithme de détection et de tri des tomates

Le schéma suivant décrit l'architecture de l'algorithme de détection et de tri des tomates. Le capteur **CP1** détecte la présence du ligne des tomates à la **position de la caméra**. Une fois détectée, une **image est capturée**, suivie d'un processus de **détection d'objets** pour identifier si l'objet est une tomate ou non. Si c'est le cas, le système vérifie sa **couleur**. Si elle est rouge, aucune action n'est requise ; sinon, le **centre de gravité** de l'objet ou de la tomate vert est calculé afin de préparer le tri. Ces données sont ensuite **stockées dans la variable X**. Le capteur **CP2**, placé à la **position de traitement**, détecte à son tour la présence de la tomate. Si CP2 est activé, le système lit la variable X et exécute le traitement associé (tri ou rejet). Après, X est remis à zéro. Ce fonctionnement permet un tri précis, automatisé et en temps réel.

Détermination de la zone d'activation pour le tri mécanique

Pour permettre le tri automatique des tomates vertes ou des objets indésirables sur le convoyeur, un système a été mis en place pour associer chaque objet repéré à un servomoteur. Cette association est basée sur la position de l'objet dans l'image, déterminée par son centre de masse.

Deux fonctions principales sont utilisées dans ce processus :

- **Servo_calc(num_servo)** : Cette fonction découpe la largeur du convoyeur en plusieurs zones égales, correspondant chacune à un servomoteur. Elle calcule la position centrale de chaque zone et les stocke dans une liste.
- **Servo_activation(Servo_list, mass_center)** : Lorsqu'un objet est détecté, cette fonction calcule la différence absolue entre la position réelle de l'objet (**mass_center**) et chaque position centrale des servomoteurs (**Servo_list**). Elle identifie ensuite la zone la plus proche de l'objet en trouvant la plus petite différence, et retourne l'index du servomoteur correspondant, qui sera alors activé pour effectuer l'action de tri

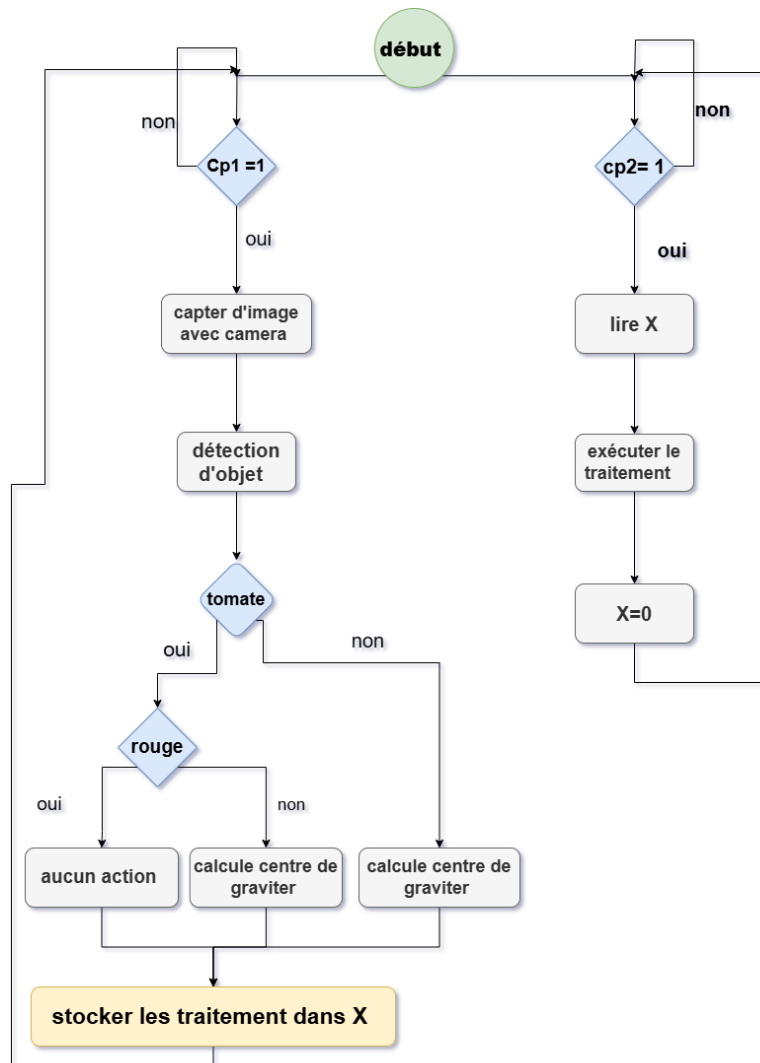


Figure 3.4 : organigramme de fonctionnement

3.2 Développement d'un convoyeur pour un système de tri

Cette partie consistée en la conception, la modélisation et la réalisation d'un convoyeur motorisé destiné à être intégré dans un système de tri automatique de produits agroalimentaires, en l'occurrence des tomates. Cette contribution s'inscrit dans une démarche de prototypage fonctionnel visant à valider une solution de tri intelligente, modulable et adaptée à un contexte industriel.

L'objectif principal de cette contribution était de :

- Concevoir un convoyeur stable, modulaire et fonctionnel pour le transport continu de produits.
- Intégrer les éléments mécaniques nécessaires à la détection et au tri automatique.
- Modéliser toutes les pièces en 3D à l'aide du logiciel **SolidWorks**.
- Réaliser un prototype physique à faible coût mais opérationnel, en exploitant les ressources disponibles localement.

3.2.1 Conception et modélisation

La conception mécanique a été effectuée à l'aide de SolidWorks (version 2013), en exploitant les modules de **modélisation de pièces**, **assemblage** et **mise en plan**. Les composants suivants ont été modélisés avec précision, puis validés en phase de simulation d'assemblage :

- **Cadre du convoyeur** (matériau : bois) : élément principal de support et d'intégration.
- **Éléments tendeurs** (résine ABS) : pièces assurant la tension correcte de la bande transporteuse,
- **Glisseurs** (PLA) : facilitant le mouvement de l'axe de rotation.
- **Bagues support roulement** (résine basique) : permettant une rotation fluide des arbres.
- **Support du servomoteur SG90** et **pièce de triage** : servant à fixer le servomoteur et à orienter les produits en fin de convoyeur pour le tri.

Cette phase de modélisation a permis de générer des plans techniques précis et d'anticiper les contraintes d'assemblage et de fonctionnement.

3.2.2 Réalisation du prototype

Le prototype a été assemblé à l'aide de matériaux simples, avec les étapes suivantes :

- **Construction de la structure** en bois, offrant rigidité et facilité de montage.
- **Installation du système de transmission**.
- **Mise en place d'un support caméra** pour la détection visuelle.
- **Intégration d'un servomoteur SG90**, placé en sortie du convoyeur, chargé d'orienter une pièce mobile de tri en fonction des données de détection.

Le résultat est un système modulaire et fonctionnel, comme illustré dans la figure ci-dessous :

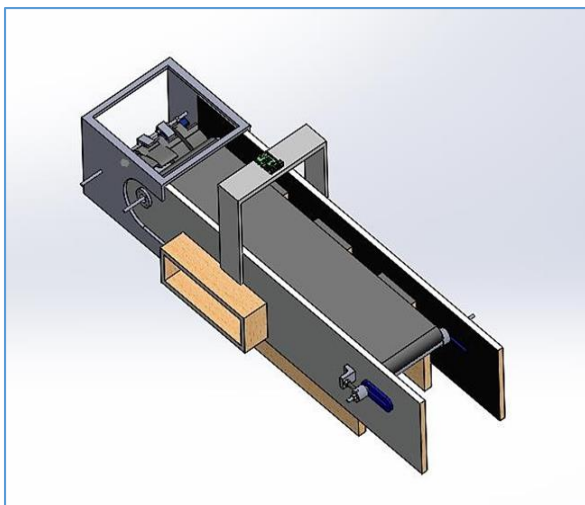


Figure 3.5 : modélisation de prototype avec SOLIDWORKS

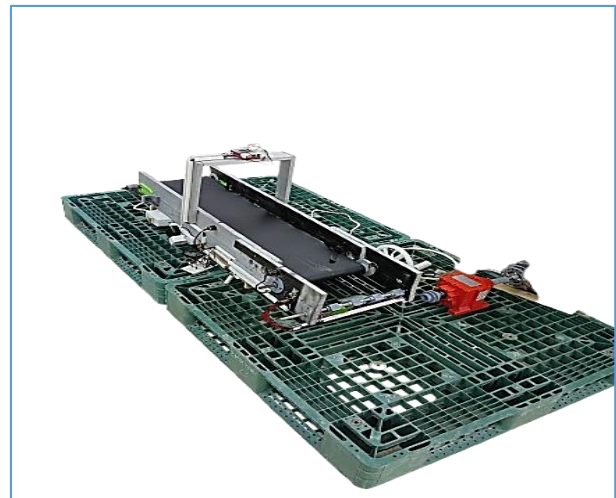


Figure 3.6 : Image descriptif réel de prototype finale




3.2.3 Résultats obtenus

- Le convoyeur assure un transport linéaire fluide et constant.
- Les pièces modélisées ont pu être fabriquées et intégrées sans difficultés majeures.
- L'assemblage mécanique est compatible avec un système de détection par IA.
- Le prototype représente une preuve de concept réussie d'un convoyeur pour système de tri automatique à faible coût.

Cette réalisation a mobilisé des compétences en conception mécanique, modélisation 3D, fabrication manuelle et intégration mécatronique. Le convoyeur développé représente une base technique stable et fonctionnelle pour le développement de futurs systèmes d'automatisation industrielle, en particulier dans le domaine du tri de produits agroalimentaires. Il est également conçu pour permettre des améliorations ultérieures telles que l'ajout de capteurs, l'intégration d'un système de traitement d'image en temps réel ou la mise en place d'actionneurs de tri automatisé.

3.3 Contribution matérielle et fonctionnelle du système de tri intelligente

Ce tableau détaille tous les appareils utilisés :

Nom de la pièce	Image	Fonction
Raspberry Pi 5	 <p>Figure 3.7 : Raspberry Pi 5</p>	Micro-ordinateur mono carte basé sur un processeur ARM quad-core, doté de ports GPIO et d'une interface CSI. Il exécute les algorithmes de vision par ordinateur, pilote les capteurs et commande le driver PWM
Capteur infrarouge E18-D80NK	 <p>Figure 3.8 : Capteur infrarouge E18-D80NK</p>	Module IR avec phototransistor détectant la présence d'objets à 10–80 cm. Sa sortie numérique se commute à l'état bas lorsqu'un objet est détecté, d'enclenchant la capture d'image
Caméra Raspberry Pi (CSI) Module 8 MP	 <p>Figure 3.9 : Caméra Raspberry Pi (CSI) Module 8 MP</p>	connecté via CSI. Il capture en temps réel les images des tomates pour une analyse IA (couleur, forme, défauts).



<p>PCA9685 PWM Driver</p>	 <p>Figure 3.10 : PCA9685 PWM Driver</p>	<p>Driver Pilote PWM 16 canaux via I²C. Il génère des signaux 50 Hz 12 bits pour commander précisément les servomoteurs SG90</p>
<p>Servomoteur SG90 à 180°</p>	 <p>Figure 3.11 : Servomoteur SG90</p>	<p>Micro-servo de 9 g. Il reçoit un signal PWM (1–2 ms) pour se positionner entre 0° et 180 ° et orienter les tomates ou écarter les corps étrangers.</p>

Tableau 3.2 : composants utiliser

3.3.1 Schéma électronique global du système

Les deux figures suivantes illustrent le montage électronique du système de tri. La première (Figure 12) présente les connexions physiques entre les composants principaux comme le Raspberry Pi, les capteurs et les servomoteurs. La seconde (Figure 13) détaille le schéma électrique avec le module PCA9685, utilisé pour gérer plusieurs servomoteurs en simultanément.

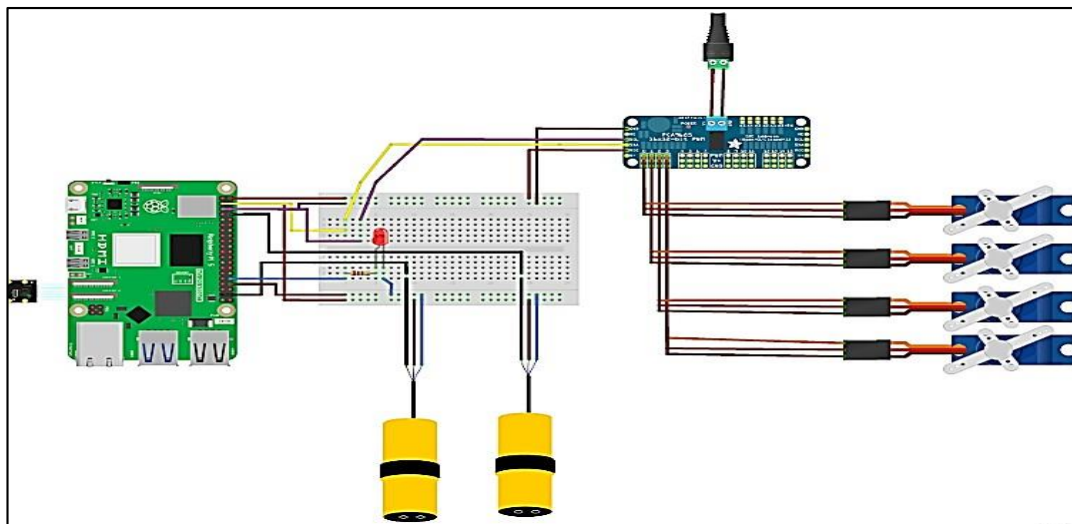


Figure 3.12 : Schéma de câblage physique du système de tri avec Raspberry Pi

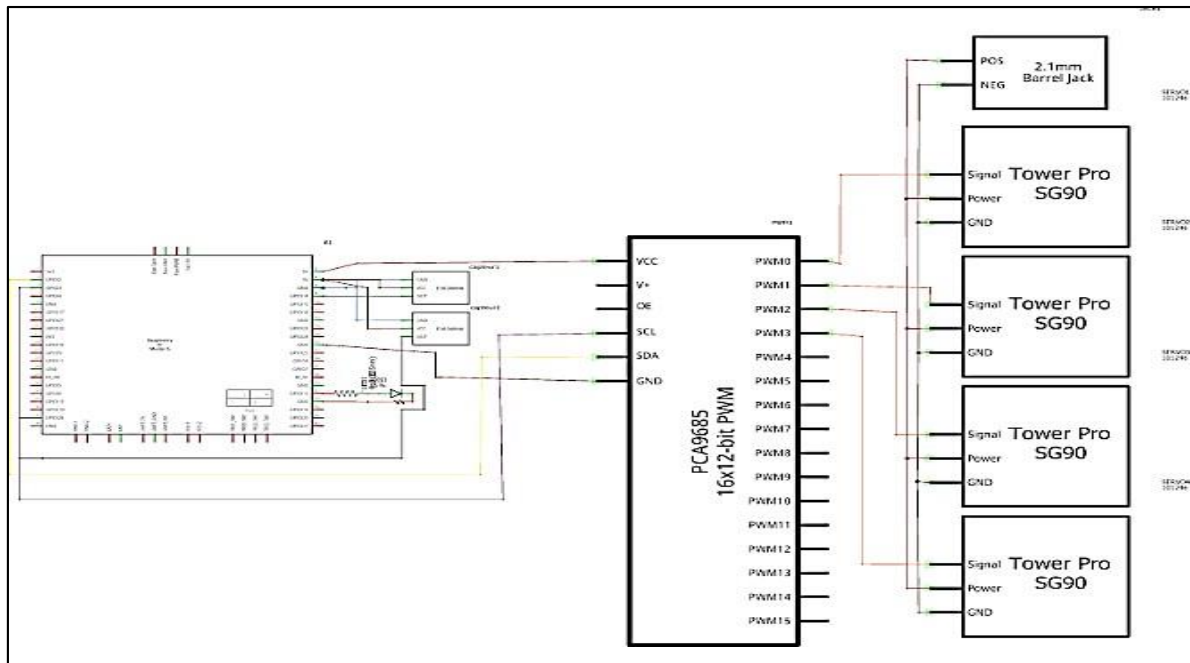


Figure 3.13 : Schéma électrique détaillé avec le module d'extension PWM PCA9685 et les servomoteurs

Conclusion

Ce chapitre a mis en lumière l'ensemble des travaux pratiques réalisés pour développer un système intelligent de tri de tomates. De la constitution des bases de données à l'implémentation des modèles d'intelligence artificielle, en passant par la conception d'un convoyeur motorisé et l'intégration des composants électroniques, chaque étape a été pensée pour répondre à un objectif concret : créer un prototype fonctionnel, adaptable et à faible coût.

Malgré certaines contraintes techniques, notamment liées à l'intégration sur Raspberry Pi, des solutions efficaces ont été trouvées, permettant un fonctionnement global satisfaisant en conditions réelles. Le système développé démontre ainsi la faisabilité d'un tri automatisé basé sur la vision par ordinateur, capable de distinguer les tomates en fonction de leur état ou de détecter des éléments indésirables.

Ce travail constitue une base solide pour de futures améliorations, qu'il s'agisse d'optimisation logicielle, d'extension des capacités de détection, ou d'intégration dans une chaîne de production plus large.

Chapitre 4 :
Résultats Expérimentaux

Introduction

Ce chapitre présente l'évaluation des modèles développés dans le cadre du projet, en deux phases complémentaires. La première section est consacrée à l'analyse des performances des modèles d'intelligence artificielle en environnement contrôlé sur PC. Différentes configurations ont été testées en combinant plusieurs jeux de données, niveaux d'optimisation, et méthodes de validation. Les résultats sont mesurés à l'aide de métriques classiques issues de la matrice de confusion, telles que la précision, le rappel ou le F1-score. La seconde partie du chapitre porte sur l'évaluation du système final en conditions réelles, lors de tests effectués sur un convoyeur simulant l'environnement industriel ciblé. Plusieurs séries de mesures ont été réalisées afin de suivre le comportement du système dans son ensemble, en incluant les performances de détection, la fiabilité du mécanisme de filtrage, ainsi que les temps de traitement. Des statistiques globales ainsi qu'une évaluation finale par matrice de confusion viennent compléter cette analyse.

4.1 Évaluation expérimentale des modèles IA et résultats obtenus

Cette partie présente les résultats expérimentaux obtenus lors de l'évaluation des différents modèles développés au cours du projet. Plusieurs configurations ont été testées afin de comparer les performances selon les données utilisées, les paramètres d'entraînement, les méthodes de validation, ainsi que les types de modèles. Les résultats sont organisés sous forme de tableaux comparatifs, accompagnés des principales métriques issues de la matrice de confusion.

Afin d'évaluer l'impact de l'optimisation des paramètres et de l'amélioration de la base de données d'apprentissage, deux modèles CNN ont été comparés. Le premier a été entraîné sur la base de données initiale (FDB) avec des paramètres non optimisés (NO) et une validation classique (NV). Le second utilise une base de données filtrée (NDB), des paramètres optimisés (O) et une validation croisée (CAL). Le tableau suivant présente les principales métriques obtenues pour chacun des deux modèles:

Métrique	CNN (FDB NO NV)	CNN (O NDB CVAL)
F1 score (Weighted)	0.89	0.96
Accuracy	0.90	-
Recall (Weighted)	0.90	-
Precision (Weighted)	0.91	-

Tableau 4.1 : Métriques d'évaluation des modèles CNN

Trois modèles SVM ont été évalués afin d'analyser l'effet de la qualité des données d'entrée, de l'optimisation du CNN utilisé en amont, et de la méthode de validation. Tous les modèles ont été entraînés à partir des vecteurs de caractéristiques extraits des couches convolutionnelles d'un CNN. Le premier modèle utilise la base de données complète avec un CNN non optimisé et une validation classique. Le second utilise une base de données filtrée, toujours avec un CNN non optimisé et une validation classique. Le troisième, quant à lui, repose sur une base filtrée, un CNN optimisé, et une validation croisée. Le tableau suivant présente les résultats obtenus:

Métrique	SVM CNN (FDB NO NV)	SVM CNN (NDB NO NV)	SVM CNN (O NDB CVAL)
F1 score (Weighted)	0.94	0.71	0.51
Accuracy	0.89	0.54	0.58
Recall (Weighted)	0.89	0.54	0.65
Precision (Weighted)	1.00	1.00	0.84

Tableau 4.2 : Métriques d'évaluation des modèles SVM (Images issus du CNN)

Cette comparaison porte sur trois modèles SVM entraînés directement à partir des images brutes, sans passage par un CNN pour l'extraction de caractéristiques. Comme précédemment, les configurations varient selon la base de données utilisée, et la méthode de validation. Le tableau suivant synthétise les performances obtenues pour chaque configuration:

Métrique	SVM RAW (FDB NV)	SVM RAW (NDB NV)	SVM RAW (NDB CVAL)
F1 score (Weighted)	0.81	0.59	0.67
Accuracy	0.69	0.42	0.69
Recall (Weighted)	0.69	0.42	0.69
Precision (Weighted)	1.00	1.00	0.74

Tableau 4.3 : Métriques d'évaluation des modèles SVM (Images brutes)

Trois modèles Isolation Forest ont été évalués à partir des vecteurs de caractéristiques extraits des couches convolutionnelles d'un CNN. Les configurations testées reprennent les mêmes conditions que pour les modèles SVM précédents : base de données complète ou filtrée, CNN non optimisé ou optimisé, et validation classique ou croisée. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour chaque configuration:

Métrique	ISO CNN (FDB NO NV)	ISO CNN (NDB NO NV)	ISO CNN (O NDB CVAL)
F1 score (Weighted)	1.00	0.71	0.48
Accuracy	1.00	0.55	0.55
Recall (Weighted)	1.00	0.55	0.55
Precision (Weighted)	1.00	1.00	0.62

Tableau 4.4 : Métriques d'évaluation des modèles Isolation Forest (Images issus du CNN)

Deux modèles Isolation Forest ont été entraînés directement à partir des images brutes, sans extraction préalable de caractéristiques par un CNN. Le premier utilise la base de données complète, tandis que le second repose sur une version filtrée. Les deux modèles ont été évalués avec un CNN non optimisé et une validation classique. Le tableau suivant résume les performances obtenues:

Métrique	ISO RAW (FDB NO NV)	ISO RAW (NDB NO NV)
F1 score (Weighted)	0.50	0.56
Accuracy	0.33	0.39
Recall (Weighted)	0.33	0.39
Precision (Weighted)	1.00	1.00

Tableau 4.5 : Métriques d'évaluation des modèles Isolation forest (Images brutes)

Le modèle YOLO a été réentraîné à l'aide d'une nouvelle base de données construite spécifiquement pour améliorer la détection des tomates et des objets non-tomates. L'évaluation a été réalisée à l'aide d'une validation classique. Le tableau suivant présente les résultats obtenus pour ce modèle réentraîné:

Métrique	YOLO
F1 score (Weighted)	0.98
Accuracy	0.96
Recall (Weighted)	1.00
Precision (Weighted)	0.96

Tableau 4.6 : Métriques d'évaluation du modèle YOLO

Afin de compléter cette évaluation, une matrice de confusion a été générée à partir des prédictions du modèle YOLO réentraîné.

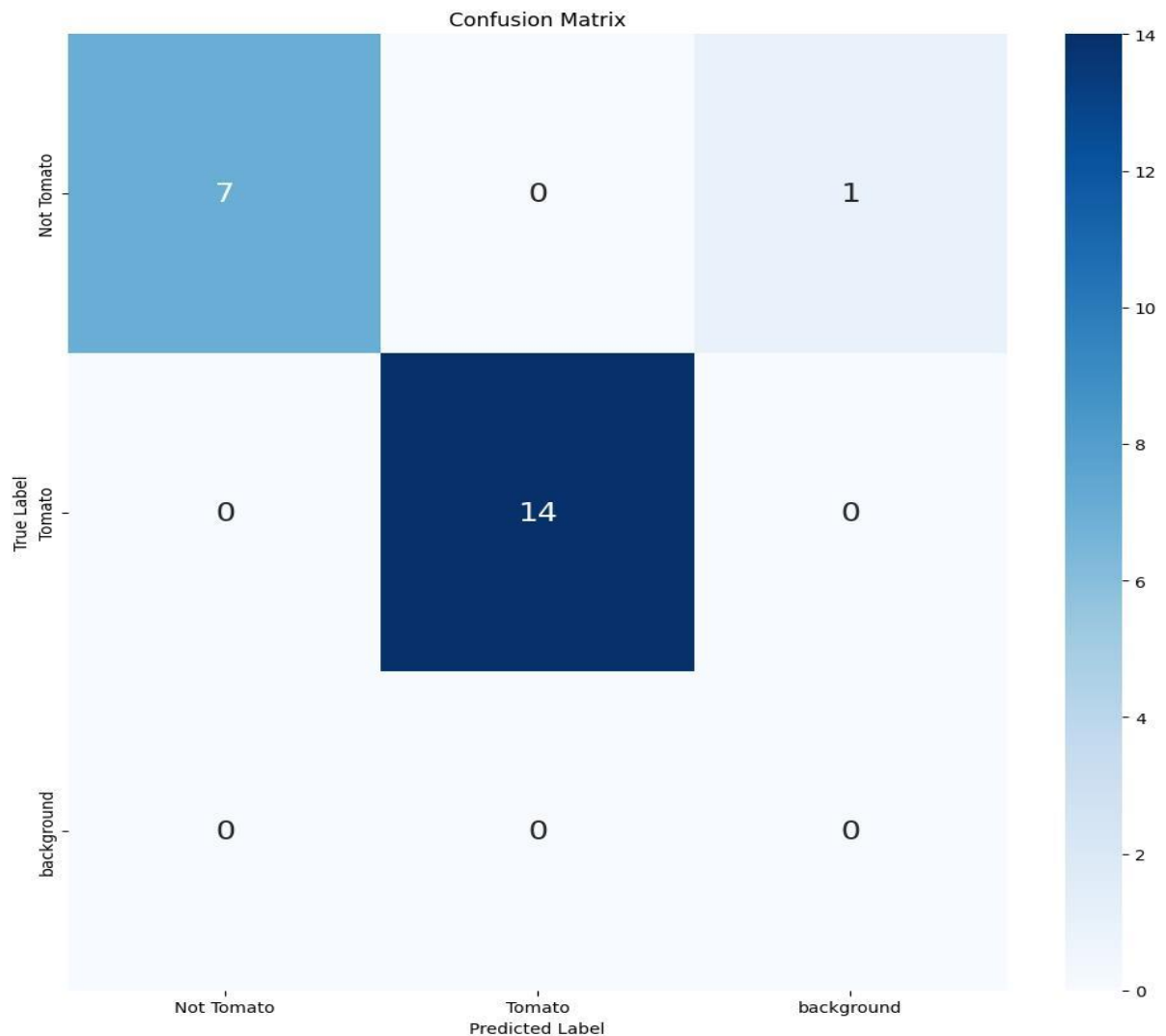


Figure 4.1 : Matrice de confusion du modèle YOLO réentraîné

Les tests ont montré que :

- Le CNN seul était précis en conditions propres, mais sensible aux perturbations (objets multiples, éclairage variable)
- L'Isolation Forest + CNN offrait de bonnes performances mais généralement mal dans les cas complexes
- Le modèle YOLO personnalisé s'est révélé le plus stable et fiable pour la détection d'objets divers, avec un temps de traitement compatible avec le Raspberry Pi 5.

Ces conclusions ont été établies à l'issue d'expérimentations en conditions réelles, à la fois avec une caméra connectée à un ordinateur portable et avec la caméra du Raspberry Pi. Elles ne proviennent donc pas uniquement des résultats sur des images fixes utilisées pour la validation, mais bien d'un usage terrain du système.

Des matrices de confusion et courbes de performance ont été générées pour comparer ces approches (incluses en annexe).

4.2 Évaluation en conditions réelles sur le convoyeur

4.2.1 Déroulement des tests

Les tests en conditions réelles ont été réalisés en plaçant les objets sur le convoyeur, une ligne à la fois. À chaque exécution, une série d'objets — comprenant des tomates et des objets non-tomates — était introduite manuellement. Le système assurait la détection en temps réel à l'aide du modèle YOLO réentraîné, tandis que plusieurs paramètres étaient enregistrés pour chaque passage. Les éléments suivis comprenaient : le nombre total d'objets par ligne, le nombre de tomates, le nombre d'objets non-tomates non détectés par le modèle, le nombre de tomates non détectées, le temps de traitement du modèle YOLO (incluant un délai fixe de 0,1 s), et le temps de filtrage mécanique (incluant un délai de 2 s lié à l'action du système). D'autres paramètres opérationnels ont également été enregistrés : le nombre d'actions prévues et réellement effectuées par le système, ainsi que les décomptes réels et prédits de tomates rouges et vertes. Ces données ont permis de calculer diverses statistiques de performance détaillées dans les sections suivantes.

4.2.2 Résultats par ligne

Les résultats bruts obtenus lors de chaque ligne de test sont présentés dans le tableau ci-dessous. Il comprend les mesures suivies en temps réel, ainsi que plusieurs colonnes calculées a posteriori, telles que le nombre d'objets non-tomates détectés, le nombre de tomates détectées, le nombre d'actions non effectuées par le système, ainsi que les taux de détection correspondants:

Ligne	Nombre d'objets	Tomates	Objets non-tomates	Objets non-tomates non détectés	Objets non-tomates détectés	Tomates non détectées	Tomates détectées
1	2	2	0	0	0	0	2
2	4	4	0	0	0	0	4
3	4	3	1	0	1	0	3
4	4	4	0	0	0	1	3
5	3	2	1	0	1	0	2
6	4	2	2	2	0	0	2
7	3	1	2	1	1	0	1
8	3	3	0	0	0	0	3
9	3	2	1	0	1	0	2
10	4	3	1	1	0	0	3
11	4	0	4	0	4	0	0

Tableau 4.7 : performance de détection et de classification des objets (tomates et non-tomates)

Ligne	Temps de traitement (s)	Temps de filtrage mécanique (s)	Actions prévues	Actions effectuées	Actions non effectuées
1	1,09045	0	0	0	0
2	1,71704	2,00552	2	2	0
3	1,46641	2,00769	1	1	0
4	1,01718	2,0061	2	1	1
5	1,52329	2,00367	3	3	0
6	1,52371	2,00419	3	1	2
7	1,20958	2,00355	2	1	1
8	1,13806	0	0	0	0
9	1,49917	2,00439	2	2	0
10	0,79707	2,00486	2	1	1
11	1,57888	2,00552	4	4	0

Tableau 4.8 : analyse du temps de traitement et d'exécution des actions de tri

Ligne	Tomates rouges réels	Tomates rouges prédits	Tomates vertes réels	Tomates vertes prédits
1	2	2	0	0
2	2	2	2	2
3	3	3	0	0
4	2	2	2	1
5	0	0	2	2
6	1	1	1	1
7	1	1	0	0
8	3	3	0	0
9	1	1	1	1
10	2	2	1	1
11	0	0	0	0

Tableau 4.9 : résultat de prédiction

4.2.3 Résultats statistiques globaux

Cette section permet de résumer les performances globales du système sur les aspects de détection, classification, actions mécaniques et temps d'exécution:

Métrique	Taux	Moyenne	Écart type
Taux d'objets détectés	86,84%	/	/
Taux d'objets non détectés	13,16%	/	/
Taux de tomates détectées	96,15%	/	/
Taux de tomates non détectées	3,85%	/	/
Taux de tomates rouges détectées	100,00%	/	/
Taux de tomates rouges non détectées	0,00%	/	/
Taux de tomates vertes détectées	88,89%	/	/
Taux de tomates vertes non détectées	11,11%	/	/
Taux d'objets non-tomates détectés	66,67%	/	/
Taux d'objets non-tomates non détectés	33,33%	/	/
Taux de réussite du Mécanisme de filtrage	76,19%	/	/
Taux d'échec du Mécanisme de filtrage (lié à une erreur de détection)	23,81%	/	/
Temps de traitement (s)	/	1,323712727	0,2870564462
Temps de filtrage mécanique (s)	/	2,005054444	0,00131716657

Tableau 4.10 : Résumé statistique des résultats expérimentaux

Remarque : Le temps de traitement inclut un délai fixe de 0,1 seconde appliqué pour chaque objet non-tomate, correspondant à l'attente nécessaire au déclenchement de la prédiction. Le temps de filtrage, quant à lui, inclut un délai de 2 secondes, ajouté afin de s'adapter à la vitesse du convoyeur utilisée lors des tests.

4.2.4 Temps d'exécution de la première prédiction

En raison de l'utilisation du multithreading, la première prédiction du modèle YOLO est plus lente que les suivantes. Le tableau suivant présente les temps enregistrés pour cette première exécution, ainsi que les statistiques correspondantes:

Exécution	Temps (s)
1	35,35646
2	34,45997
3	36,47085
4	34,42092
5	38,46238
6	36,49758
7	35,20537
Moyenne	35,83907571
Écart type	1,429574009

Tableau 4.11 : Temps d'exécution de la première prédiction

4.2.5 Évaluation via matrice de confusion

À partir des détections finales (tomates rouges et vertes, objets non-tomates), une matrice de confusion a été construite. Celle-ci permet de calculer des métriques classiques d'évaluation du modèle. Pour cela, une série de tests distincts de ceux présentés précédemment a été réalisée pour la génération de la matrice de confusion:

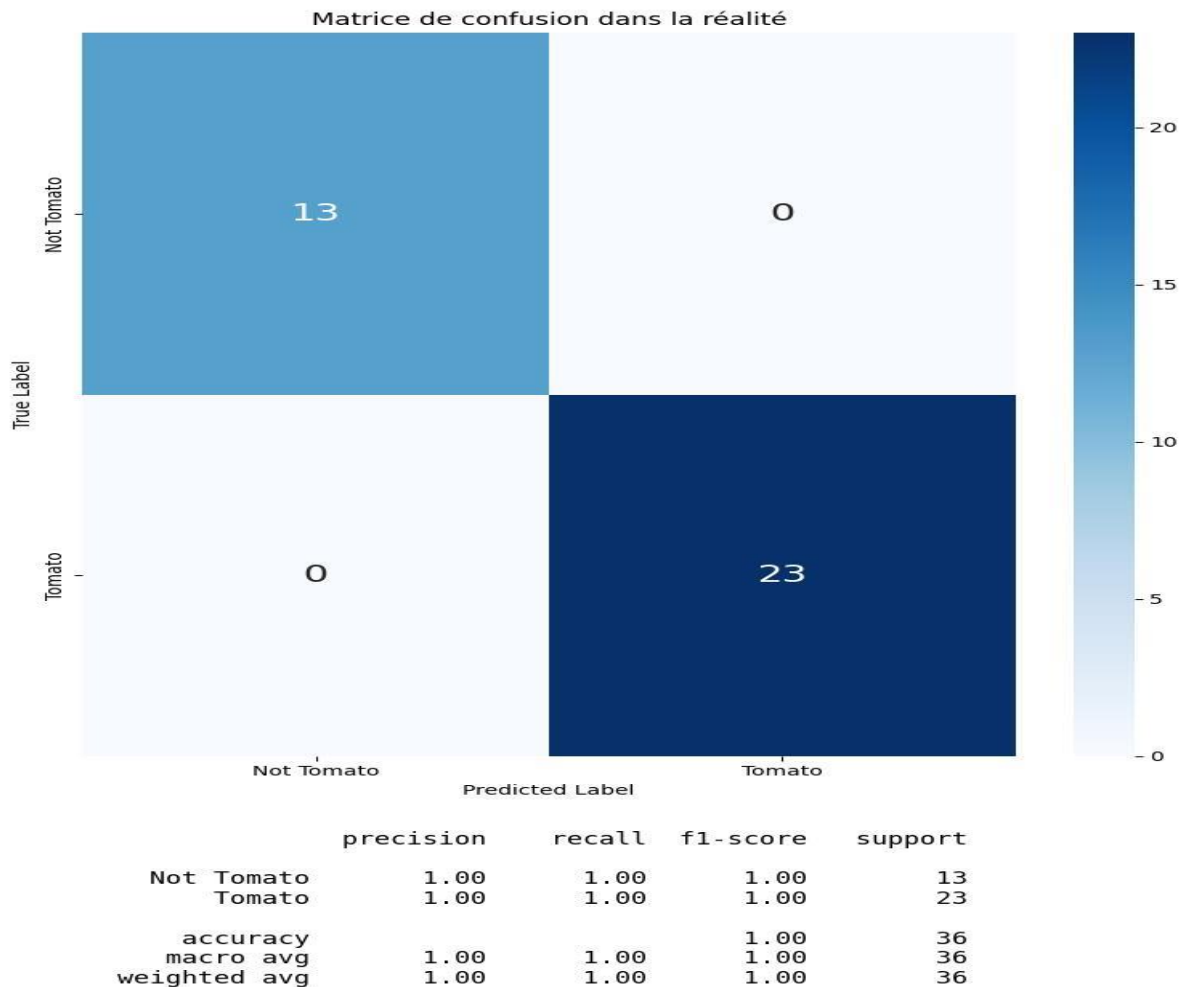


Figure 4.2 : Matrice de confusion du modèle YOLO en conditions réelles

Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre permettent d'évaluer de manière approfondie les performances des différents modèles développés, aussi bien en environnement contrôlé que dans des conditions réelles sur convoyeur. Les tests sur PC ont montré que l'optimisation des paramètres, le choix du jeu de données, et la méthode de validation influencent fortement les performances des modèles, notamment pour les approches SVM et Isolation Forest. Le modèle YOLO réentraîné s'est distingué par sa robustesse et sa capacité à détecter avec précision des objets multiples en temps réel.

Les expérimentations sur convoyeur ont permis de valider l'efficacité du système dans un contexte proche de l'application industrielle. Le suivi des objets, la précision de la détection,

les temps d'exécution, ainsi que la coordination avec le mécanisme de filtrage ont été mesurés et analysés. Les résultats obtenus confirment la faisabilité de la solution mise en œuvre, avec des taux de détection élevés, en particulier pour les tomates rouges, et un comportement stable du système dans son ensemble. La matrice de confusion finale permet de consolider ces observations et de mesurer objectivement les performances du modèle YOLO en conditions réelles.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous pouvons affirmer que ce projet a représenté bien plus qu'une simple application technique. Il a été une aventure humaine, intellectuelle et professionnelle qui nous a permis de mettre en pratique nos connaissances, de relever des défis concrets et de proposer une solution innovante à une problématique réelle de l'industrie agroalimentaire.

La conception d'un système de tri intelligent pour les tomates, alliant intelligence artificielle et automatisation, s'est révélée être une expérience enrichissante, à la fois sur le plan technologique et personnel. Nous avons pu mesurer l'impact qu'une innovation bien pensée peut avoir sur la qualité, la sécurité et l'efficacité des processus industriels. Les résultats expérimentaux obtenus, aussi bien en environnement contrôlé qu'en conditions réelles, confirment la pertinence de l'approche adoptée et ouvrent des perspectives prometteuses pour des déploiements à plus grande échelle.

Mais au-delà des chiffres et des performances, ce projet nous a surtout appris l'importance de la rigueur, de la collaboration et de l'adaptation face aux imprévus. Chaque obstacle rencontré a été une opportunité d'apprentissage. Et si nous avons pu apporter une réponse concrète à une problématique industrielle, c'est aussi grâce à l'encadrement, au soutien et à l'ouverture d'esprit que nous avons trouvés tout au long de cette aventure.

En guise d'ouverture, nous espérons que ce travail pourra inspirer d'autres initiatives dans le secteur agroalimentaire, où l'alliance entre tradition et modernité devient un levier essentiel pour bâtir une industrie plus performante, plus durable et plus humaine.

- Banaeian, N., Mobli, H., Omid, M., & Keyhani, A. (2021). *Application of artificial intelligence and computer vision in postharvest processes of agricultural products: A review*. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 5, 10–25.
<https://doi.org/10.1016/j.aiia.2021.02.001>
- Cabinplant. (n.d.). *Products*. <https://www.cabinplant.com/products/> (Consulté le 7 juin 2025)
- Cohen, G., Hilario, M., & Pellegrini, C. (2004). One-Class Support Vector Machines with a Conformal Kernel. A Case Study in Handling Class Imbalance. In *SSPR/SPR 2004* (Vol. 3138, pp. 850–858). Springer.
- Denis, B. (2020). *Les technologies de tri optique au service de la qualité agroalimentaire*. *Industries Alimentaires et Agricoles*, (1373), 36–40.
- FAO. (2020). *The state of food and agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
<https://doi.org/10.4060/cb1447en>
- Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep learning*. MIT Press.
- Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. In *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 2, pp. 1137–1143).
- Legrand, J. (2021). *La robotique agroalimentaire en pleine croissance*. *Robot Magazine*, (45), 28–33
- Liu, F. T., Ting, K. M., & Zhou, Z.-H. (2008). Isolation Forest. In *2008 Eighth IEEE International Conference on Data Mining* (pp. 413–422).

- Mukhiddinov, M., Muminov, A., & Cho, J. (2022). *Improved Classification Approach for Fruits and Vegetables Freshness Based on Deep Learning*. *Sensors*, 22(21), 8192. <https://doi.org/10.3390/s22218192>
- Multiscan Systems. (n.d.). *Trieuse pour l'industrie agroalimentaire - i5 Olive Plus*. <https://www.directindustry.fr/prod/multiscan-systems/product-218790-2547061.html> (Consulté le 7 juin 2025)
- Rahman, M., Akter, S., & Frick, V. (2019). Sustainability challenges in food supply chain: A literature review and framework. *Journal of Cleaner Production*, 228, 721–732. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.250>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. In *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (pp. 779–788).
- Rexnord. (n.d.). *Rexnord 843 Straight Running Solid Top*. <https://www.rexnord.com/products/conveying-solutions/mattop-and-tabletop-chains/straight-running/843> (Consulté le 7 juin 2025)
- Sormac. (n.d.). *Diverging chain grader AS*. <https://sormac.com/en-us/machines/diverging-chain-grader-as> (Consulté le 7 juin 2025)
- SpanTech. (n.d.). *Système de tri pour l'industrie agroalimentaire*. <https://www.directindustry.fr/prod/spantech/product-61512-1991186.html> (Consulté le 7 juin 2025)
- Veret, L. (2022). *Pesage et détection : vers des solutions modulaires et compactes*. *Emballage Digest*, (669), 34–37.
- Wang, D., Zhang, Z., & Zhang, M. (2020). Artificial intelligence in agricultural products processing: A review. *Journal of Food Engineering*, 283, 110036. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110036>

Rapport de modélisation des pièces sous SolidWorks

Introduction

Dans le cadre du projet de fin d'études intitulé Système de tri automatique basé sur l'IA pour le secteur agroalimentaire plusieurs pièces ont été modélisées en 3D à l'aide du logiciel SolidWorks.

Ce rapport présente les différentes pièces réalisées, leurs fonctions dans l'assemblage global, ainsi que les choix de conception adoptés.

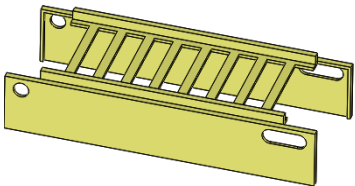

1. Objectifs de la modélisation

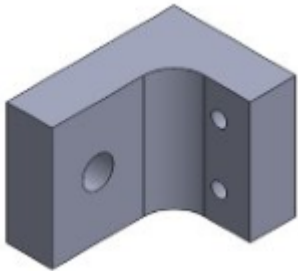




- Représenter de manière précise les pièces du projet.
- Permettre une simulation d'assemblage et de fonctionnement.
- Générer des mises en plan pour la fabrication.

2. Logiciel utilisé

- **Nom** : SolidWorks
- **Version** : [SolidWorks 2013]
- **Modules utilisés** : Part Design, Assembly, Drawing.

3. Liste des pièces modélisées

N°	Nom de la pièce	Description	Matière prévue	Fonctions principales
1	Cadre convoyeur 	Assemblage démontable de plusieurs plaques	Bois Blanc	Assurer les connexions des différentes pièces de convoyeur
2	Élément Tendeur à vise 1 	Pièce de fixation de la tige	Résine ABS	Assurer le montage de tendeur

3	<p>Élément Tendeur à vise 2</p> 	Pièce fixé sur le cadre de convoyeur	Résine ABS	Transmission du mouvement
4	<p>Glisseur</p> 	Pièce fixé sur le cadre de convoyeur	PLA	Assurer le glissement fluide de la tige
5	<p>Bague (support roulement)</p> 	Entre le cadre de convoyeur et les roulements	Résine Basique	Éliminer les frottements
6	<p>Bague (support roulement)</p> 	Entre les roulements et le cylindre	Résine Basique	Assurer la fixation de roulement sur le cylindre
7		Entre l'axe de rotation et le cylindre	Résine Basique	Assurer la rotation sur le même axe



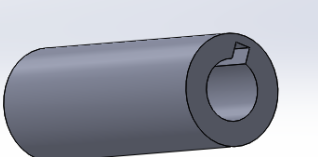
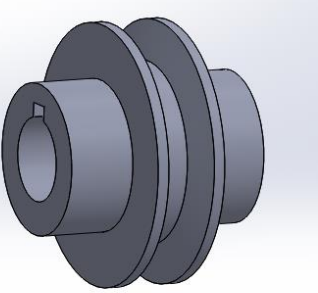
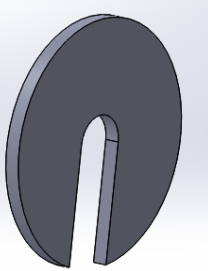





8	<p>Porte servomoteur sg90</p> 	Pièce entre l'axe et le servo	Résine Basique	Assurer la fixation de servomoteur
9	<p>Pièce de triage</p> 	Pièce assemblé avec le rotor de servo	PLA	Assurer la fonction de triage intelligent
10	<p>Manchon d'accouplement</p> 	Pièce entre le rotor de moteur et le réducteur mécanique	PLA	Assurer la liaison mécanique entre deux arbres tournants
11	<p>Poulie de transmission</p> 	Pièce entre la sortie de réducteur et une courroie trapézoïdale	Résine ABS	Transmettre un mouvement de rotation au convoyeur
12		Pièce assemblé sur les deux cylindres de convoyeur	PLA	Assurer le bon guidage de la bande

Tableau d'analogie :

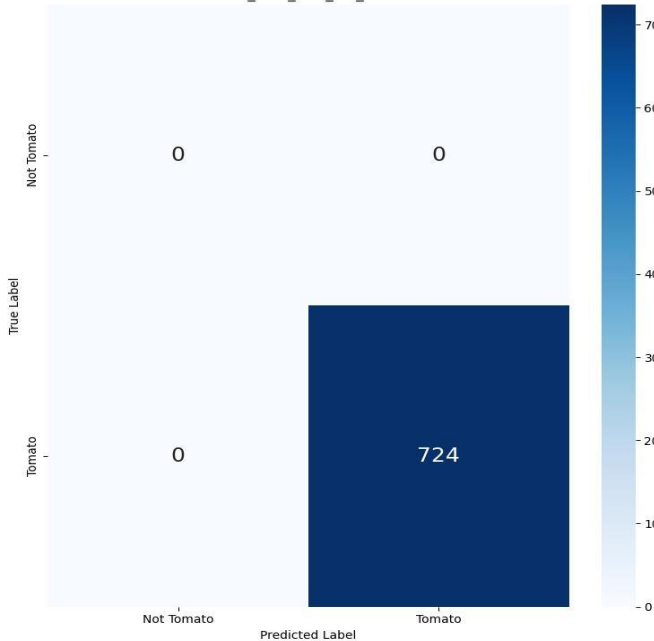
Fonction	prototype	Système industriel inspiré	Sorma Hyper Vision (industriel commercialisé)
Détection de présence	Capteur IR E18-D80NK 	Barrière optique ou cellule laser industrielle 	Capteurs de position intégrés aux convoyeurs
Capture d'image	Caméra CSI 8 MP (Raspberry Pi Camera) 	Caméras industrielles GigE 5–12 MP RGB 	3 caméras RGB haute vitesse par ligne
Analyse spectrale	Aucune (image couleur uniquement)	Ajout de caméras NIR ou multispectrales industrielles	Caméras NIR (6 par ligne), analyse hyperspectrale
Traitement de l'image	YOLOv5 / CNN sur Raspberry Pi 5 	Serveur GPU ou Jetson AGX Orin, modèle optimisé et calibré 	Plateforme Linux avec traitement temps réel sur PC industriel
Automatisation du tri	4 servomoteurs SG90 via PCA9685 	Vérins pneumatiques ou bras motorisés pilotés par automate industriel (API) 	Éjecteurs pneumatiques rapides, orientés par IA
Structure du convoyeur	Structure bois + pièces 3D (ABS, PLA)	Convoyeur inox à chaînes modulaires, conforme normes agroalimentaires (IP65, HACCP)	Convoyeur à rouleaux rotatifs synchronisés

Logiciel de supervision	Scripts Python (sans interface graphique avancée)	SCADA ou IHM industrielle avec enregistrement des données et visualisation temps réel 	Interface tactile complète avec tableaux de bord et statistiques détaillées
Cadence de tri	1 ligne /1 seconde	5 à 10 tomates/sec (selon l'architecture multi-voie)	Jusqu'à 15 fruits/sec/ligne
Traçabilité des lots	Base de données local sur Raspberry Pi	Base de données centralisée (SQL/NoSQL) + connexion au MES	Système de traçabilité complet, exportable et connectable à l'ERP
Coût estimé	< 150 € (30000 DZD)	~3 000 € à 10 000 € selon automatisation et capteurs (400.000 – 1.500.000)DZD	> 30 000 € (machine industrielle haut de gamme)
Flexibilité / reconfigurabilité	Très haute (prototypage rapide, code modifiable)	Moyenne à haute selon architecture modulaire choisie	Moyenne (logiciel propriétaire, reconfiguration possible mais complexe)
Public cible	Recherche, éducation, petites unités artisanales	PME, coopératives agricoles, lignes semi-industrielles	Grandes exploitations, unités de production agroalimentaires exportatrices

Matrices de confusion et courbes YOLO

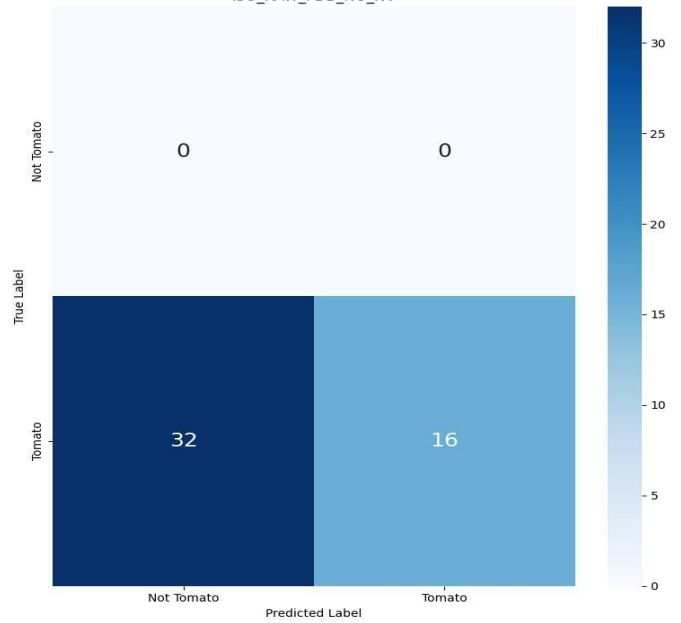
Voici les matrices de confusion des modèles entraînés sur l'ensemble des données, en utilisant un CNN non optimisé. Les performances sont globalement faibles, avec des cas de surapprentissage et de mauvaises prédictions.

ISO_CNN_FDB_NO_NV0



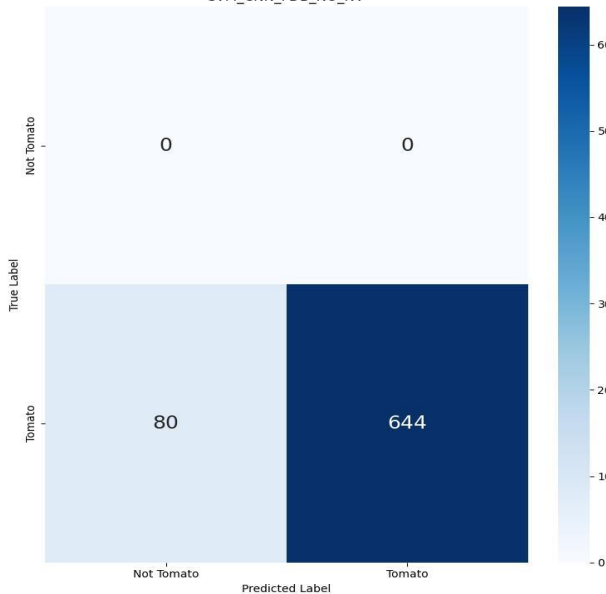
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	1.00	1.00	724
accuracy			1.00	724
macro avg	0.50	0.50	0.50	724
weighted avg	1.00	1.00	1.00	724

ISO_RAW_FDB_NO_NV



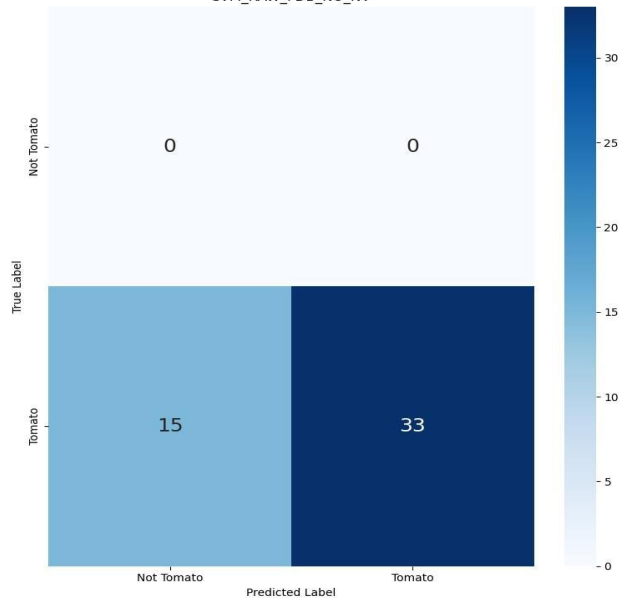
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.33	0.50	48
accuracy			0.33	48
macro avg	0.50	0.17	0.25	48
weighted avg	1.00	0.33	0.50	48

SVM_CNN_FDB_NO_NV



	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.89	0.94	724
accuracy			0.89	724
macro avg	0.50	0.44	0.47	724
weighted avg	1.00	0.89	0.94	724

SVM_RAW_FDB_NO_NV

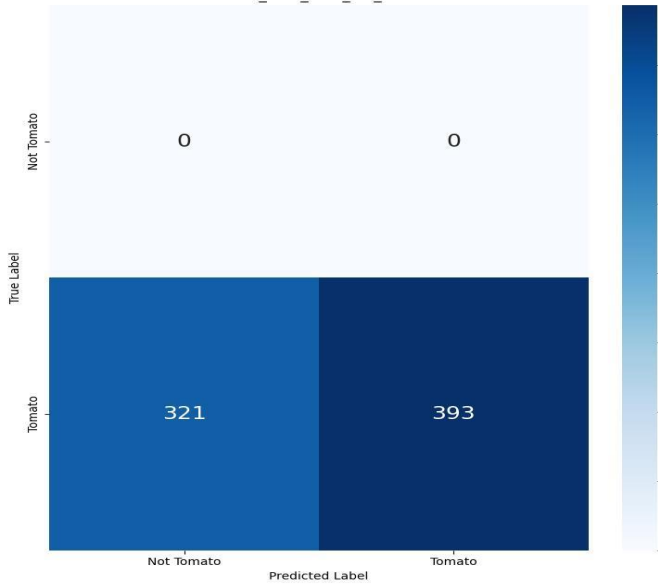


	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.69	0.81	48
accuracy			0.69	48
macro avg	0.50	0.34	0.41	48
weighted avg	1.00	0.69	0.81	48

Annexes

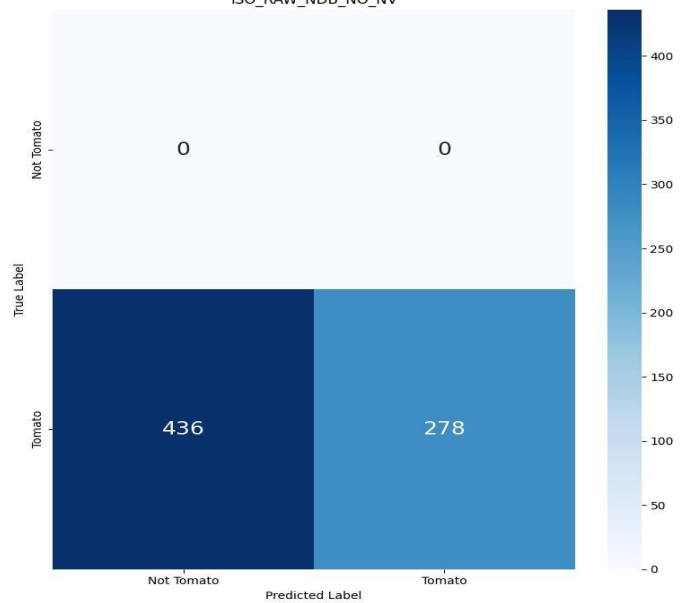
Voici les matrices de confusion obtenues après entraînement sur une base de données filtrée. Le surapprentissage a été réduit, mais les performances restent faibles en raison du CNN non optimisé.

ISO_CNN_NDB_NO_NV



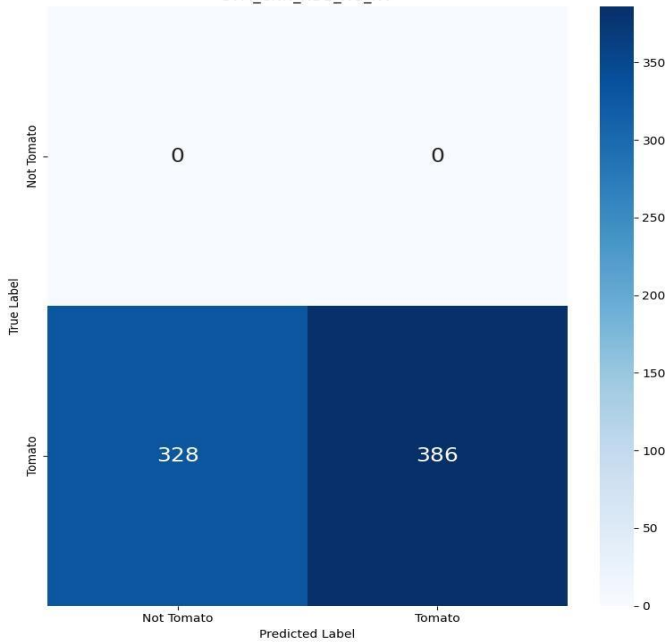
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.55	0.71	714
accuracy			0.55	714
macro avg	0.50	0.28	0.36	714
weighted avg	1.00	0.55	0.71	714

ISO_RAW_NDB_NO_NV



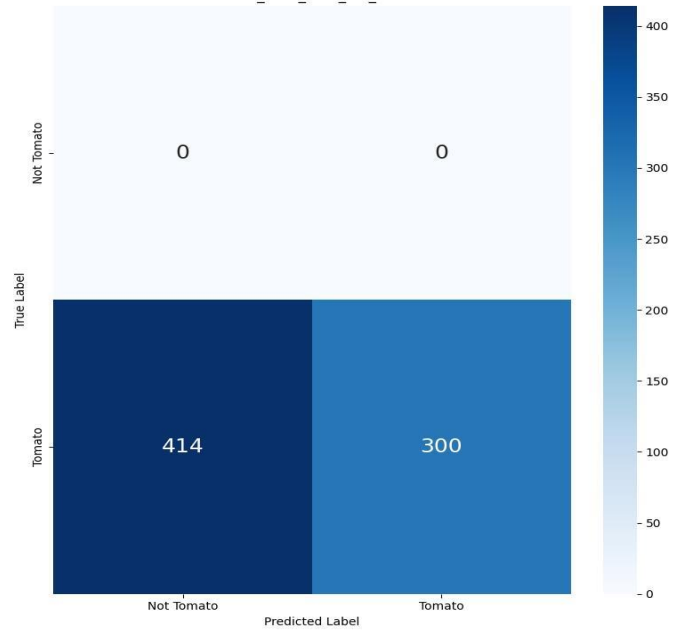
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.39	0.56	714
accuracy			0.39	714
macro avg	0.50	0.19	0.28	714
weighted avg	1.00	0.39	0.56	714

SVM_CNN_NDB_NO_NV



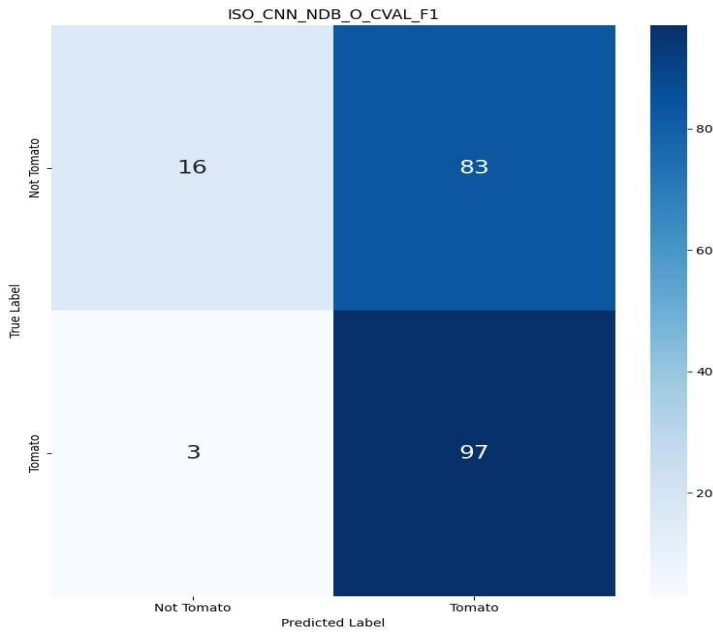
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.54	0.70	714
accuracy			0.54	714
macro avg	0.50	0.27	0.35	714
weighted avg	1.00	0.54	0.70	714

SVM_RAW_NDB_NO_NV

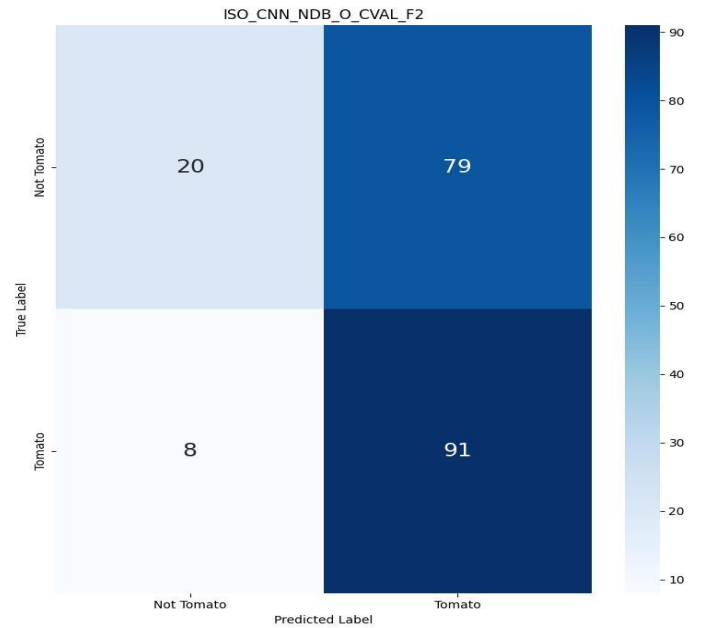


	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.00	0.00	0.00	0
Tomato	1.00	0.42	0.59	714
accuracy			0.42	714
macro avg	0.50	0.21	0.30	714
weighted avg	1.00	0.42	0.59	714

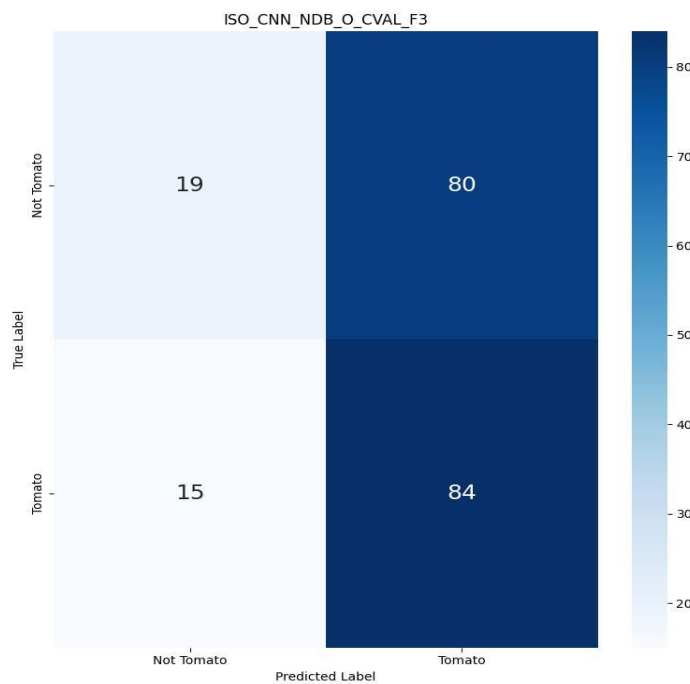
Voici les matrices de confusion des modèles entraînés sur la base filtrée avec un CNN optimisé et validés par cross-validation. Les performances sont nettement améliorées, avec une meilleure généralisation.



	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.84	0.16	0.27	99
Tomato	0.54	0.97	0.69	100
accuracy			0.57	199
macro avg	0.69	0.57	0.48	199
weighted avg	0.69	0.57	0.48	199



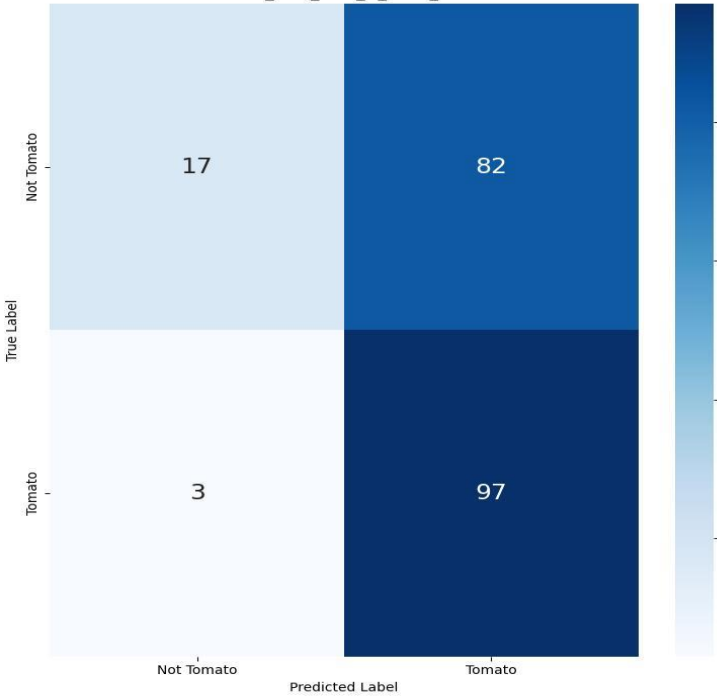
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.71	0.20	0.31	99
Tomato	0.54	0.92	0.68	99
accuracy			0.56	198
macro avg	0.62	0.56	0.50	198
weighted avg	0.62	0.56	0.50	198



	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.56	0.19	0.29	99
Tomato	0.51	0.85	0.64	99
accuracy			0.52	198
macro avg	0.54	0.52	0.46	198
weighted avg	0.54	0.52	0.46	198

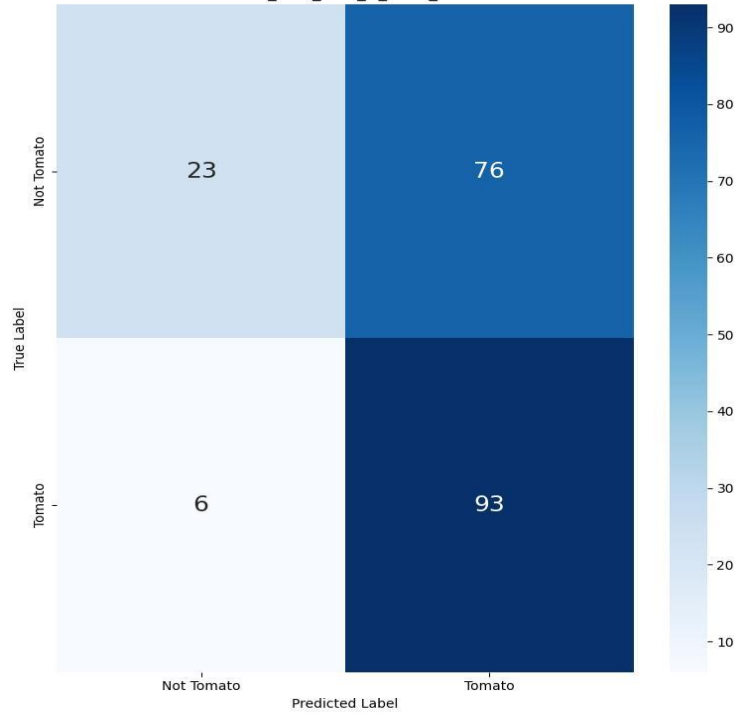
Annexes

SVM_CNN_NDB_O_CVAL_F1



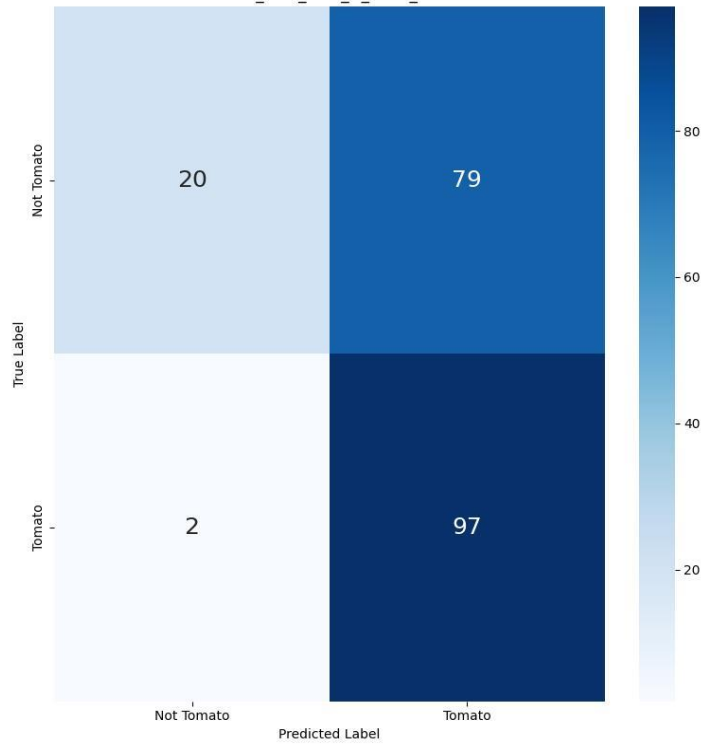
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.85	0.17	0.29	99
Tomato	0.54	0.97	0.70	100
accuracy			0.57	199
macro avg	0.70	0.57	0.49	199
weighted avg	0.70	0.57	0.49	199

SVM_CNN_NDB_O_CVAL_F2



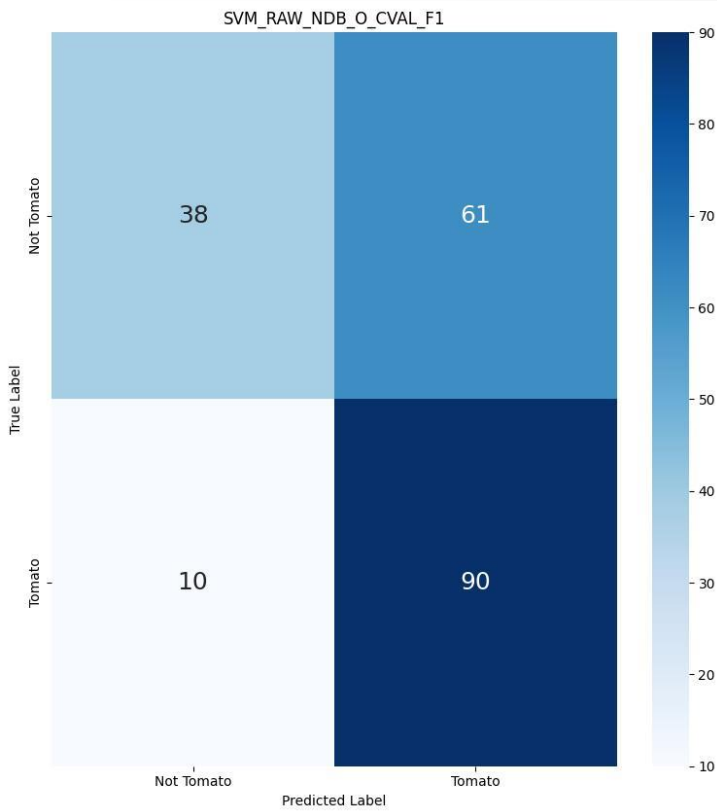
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.79	0.23	0.36	99
Tomato	0.55	0.94	0.69	99
accuracy			0.59	198
macro avg	0.67	0.59	0.53	198
weighted avg	0.67	0.59	0.53	198

SVM_CNN_NDB_O_CVAL_F3

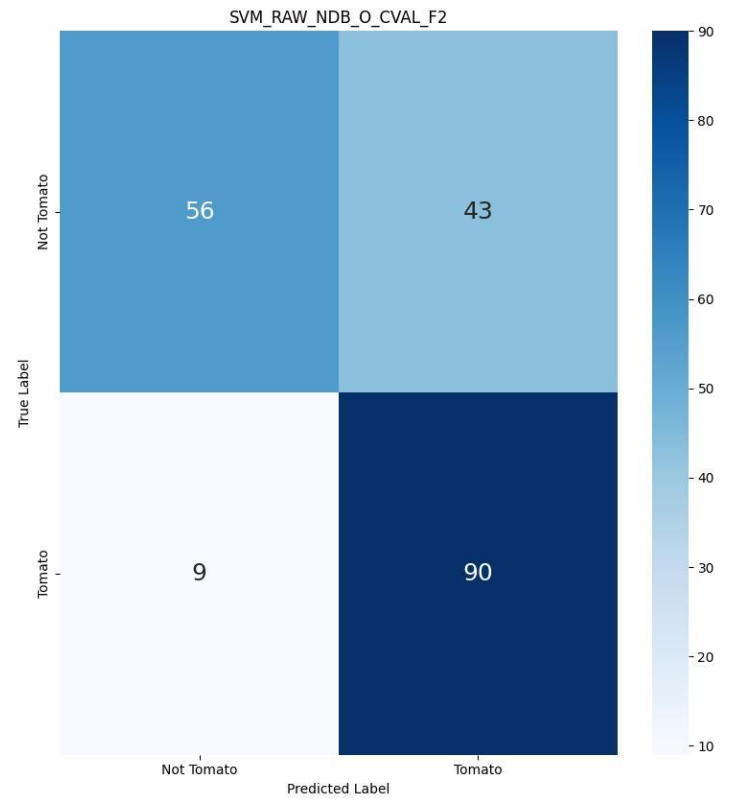


	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.91	0.20	0.33	99
Tomato	0.55	0.98	0.71	99
accuracy			0.59	198
macro avg	0.73	0.59	0.52	198
weighted avg	0.73	0.59	0.52	198

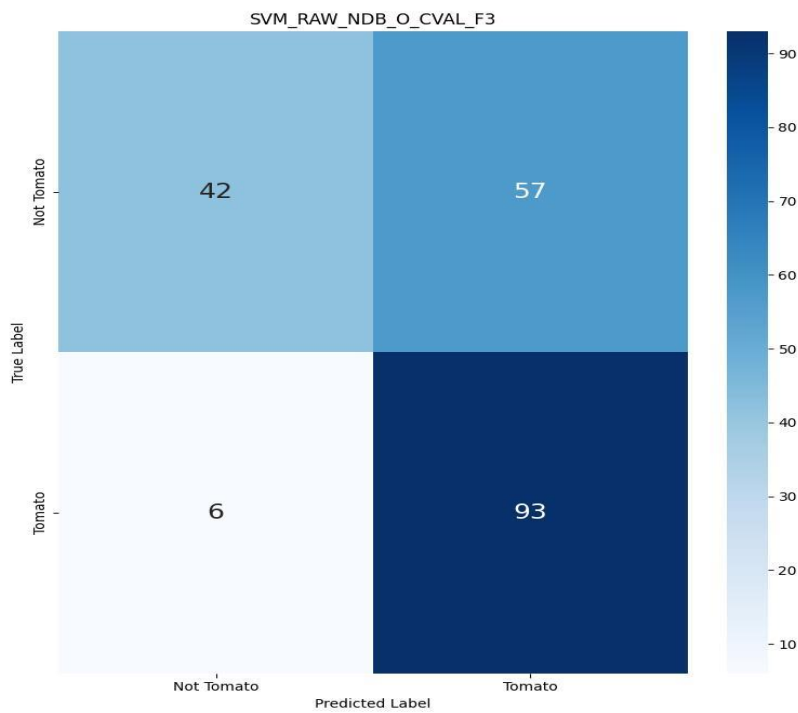
Annexes



	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.79	0.38	0.52	99
Tomato	0.60	0.90	0.72	100
accuracy			0.64	199
macro avg	0.69	0.64	0.62	199
weighted avg	0.69	0.64	0.62	199

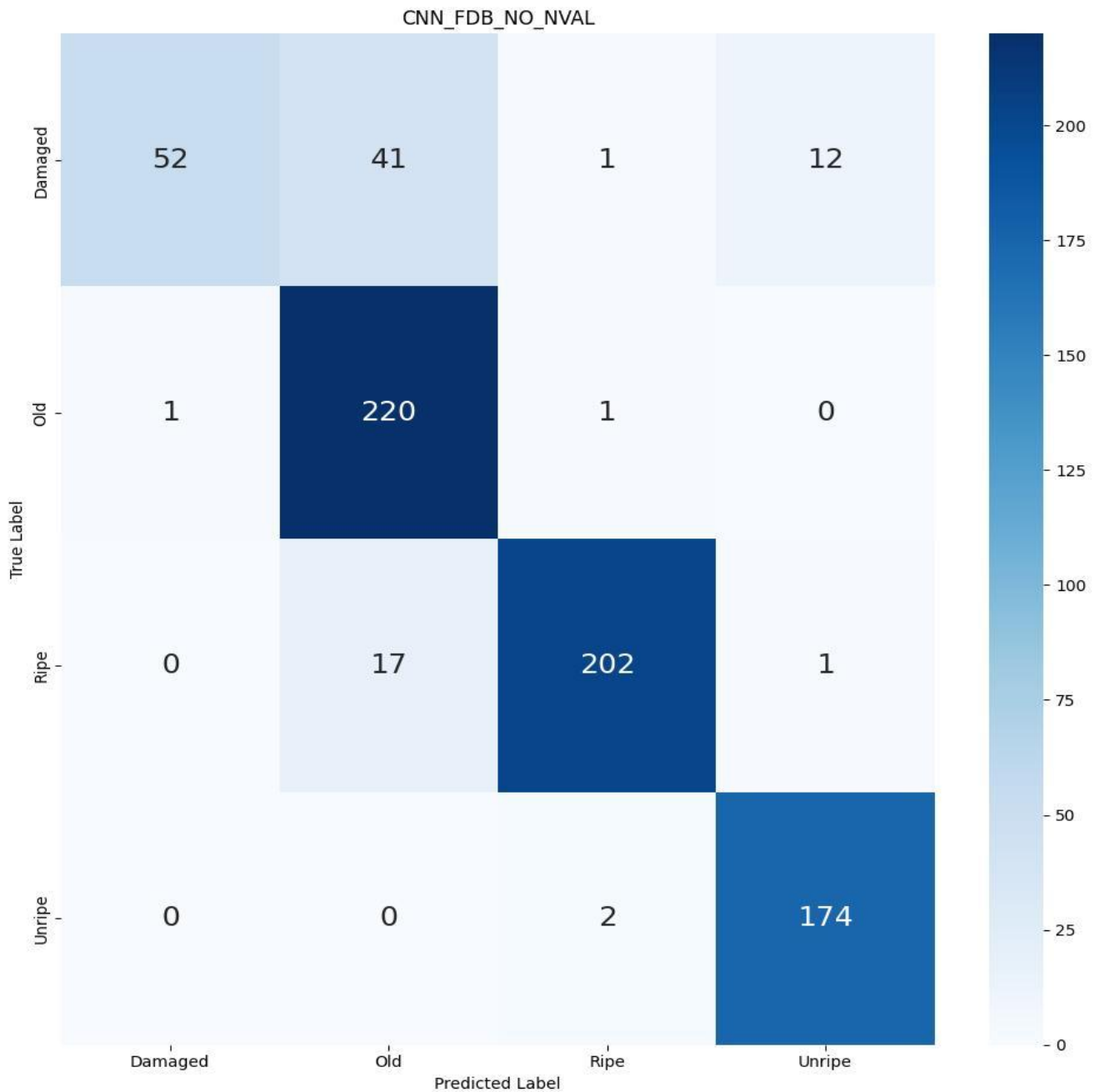


	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.86	0.57	0.68	99
Tomato	0.68	0.91	0.78	99
accuracy			0.74	198
macro avg	0.77	0.74	0.73	198
weighted avg	0.77	0.74	0.73	198



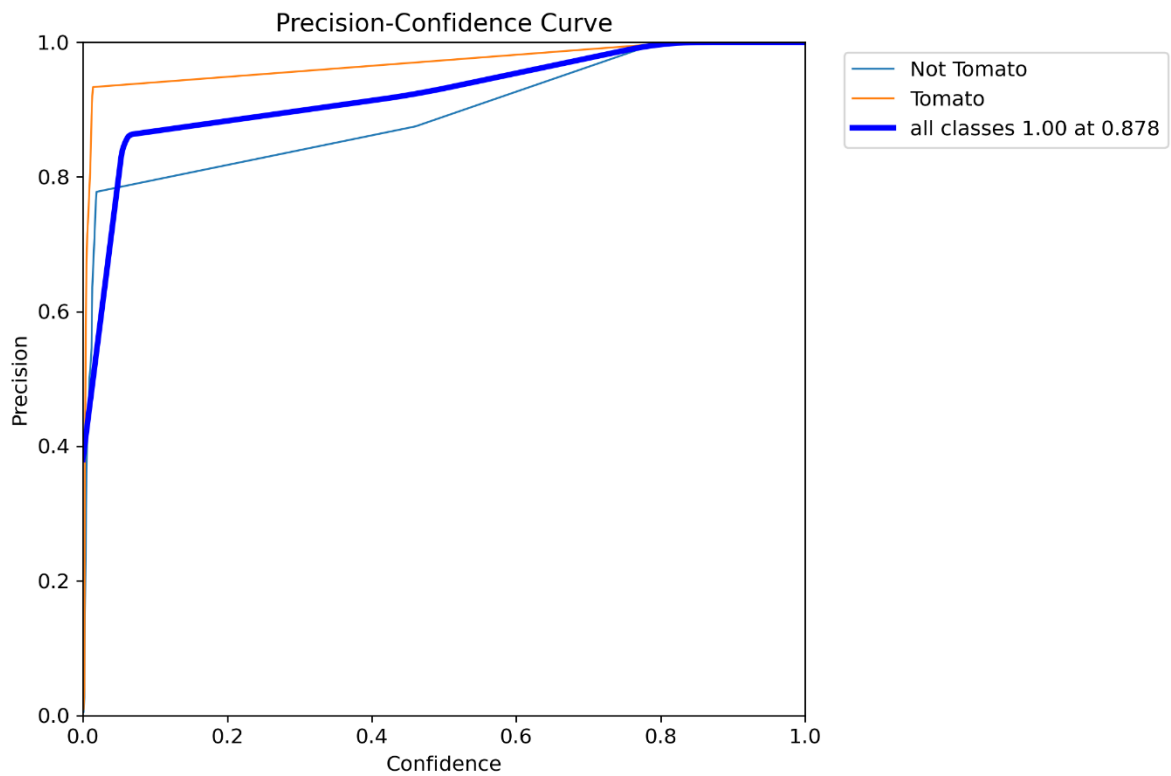
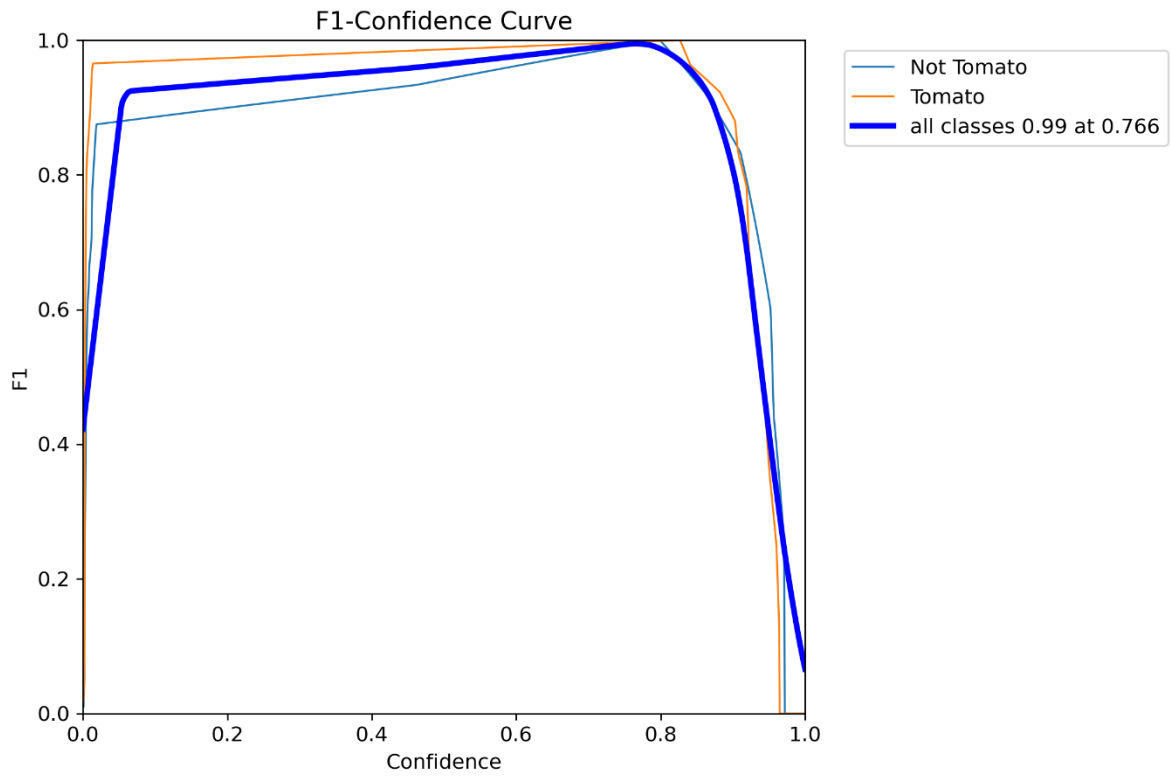
	precision	recall	f1-score	support
Not Tomato	0.88	0.42	0.57	99
Tomato	0.62	0.94	0.75	99
accuracy			0.68	198
macro avg	0.75	0.68	0.66	198
weighted avg	0.75	0.68	0.66	198

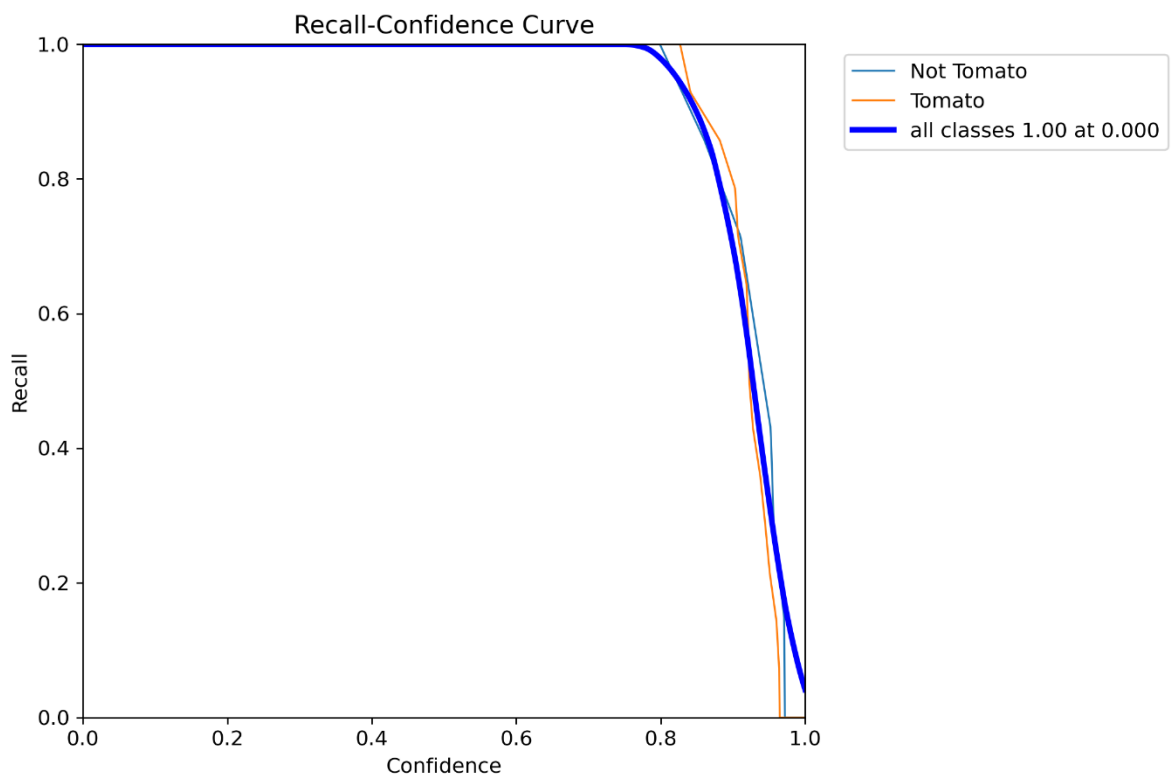
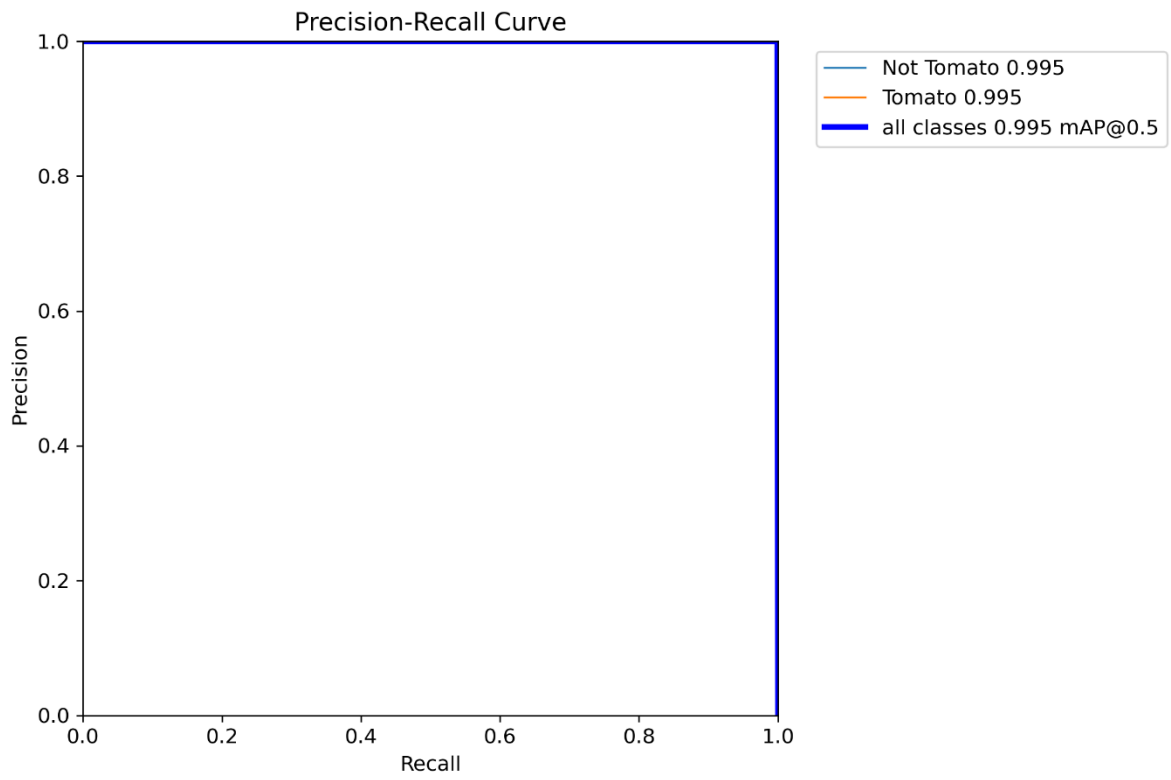
Voici la matrice de confusion du premier CNN entraîné sur l'ensemble de la base de données. Le modèle affiche de bonnes performances globales, mais confond fréquemment les tomates abîmées avec les tomates mûres.

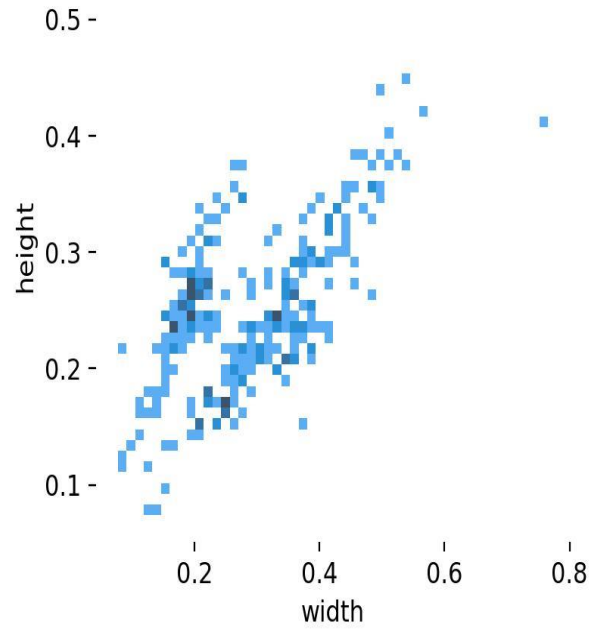
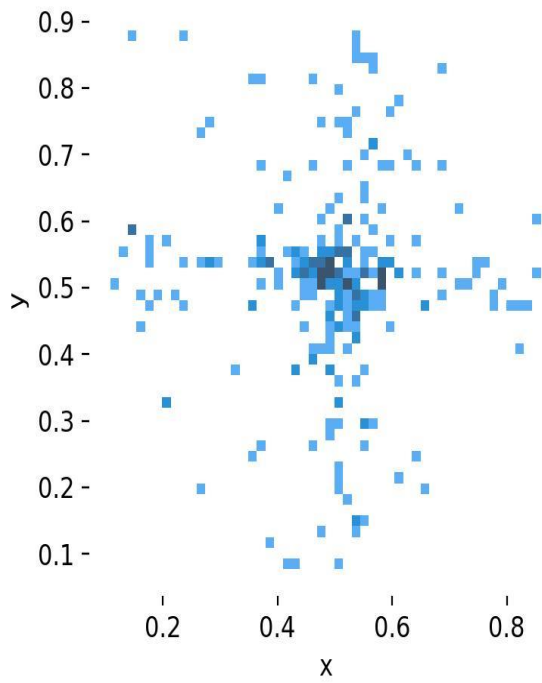
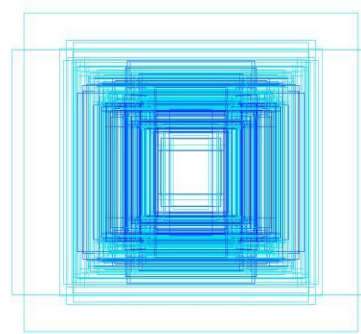
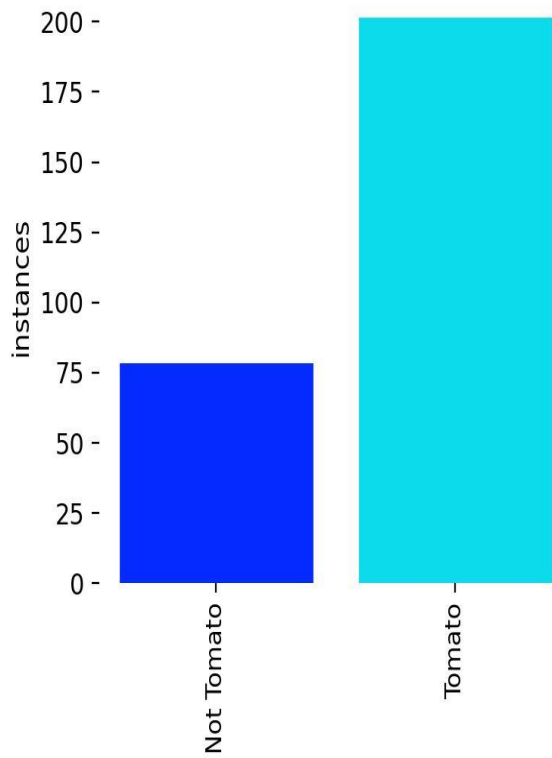


	precision	recall	f1-score	support
Damaged	0.98	0.49	0.65	106
Old	0.79	0.99	0.88	222
Ripe	0.98	0.92	0.95	220
Unripe	0.93	0.99	0.96	176
accuracy			0.90	724
macro avg	0.92	0.85	0.86	724
weighted avg	0.91	0.90	0.89	724

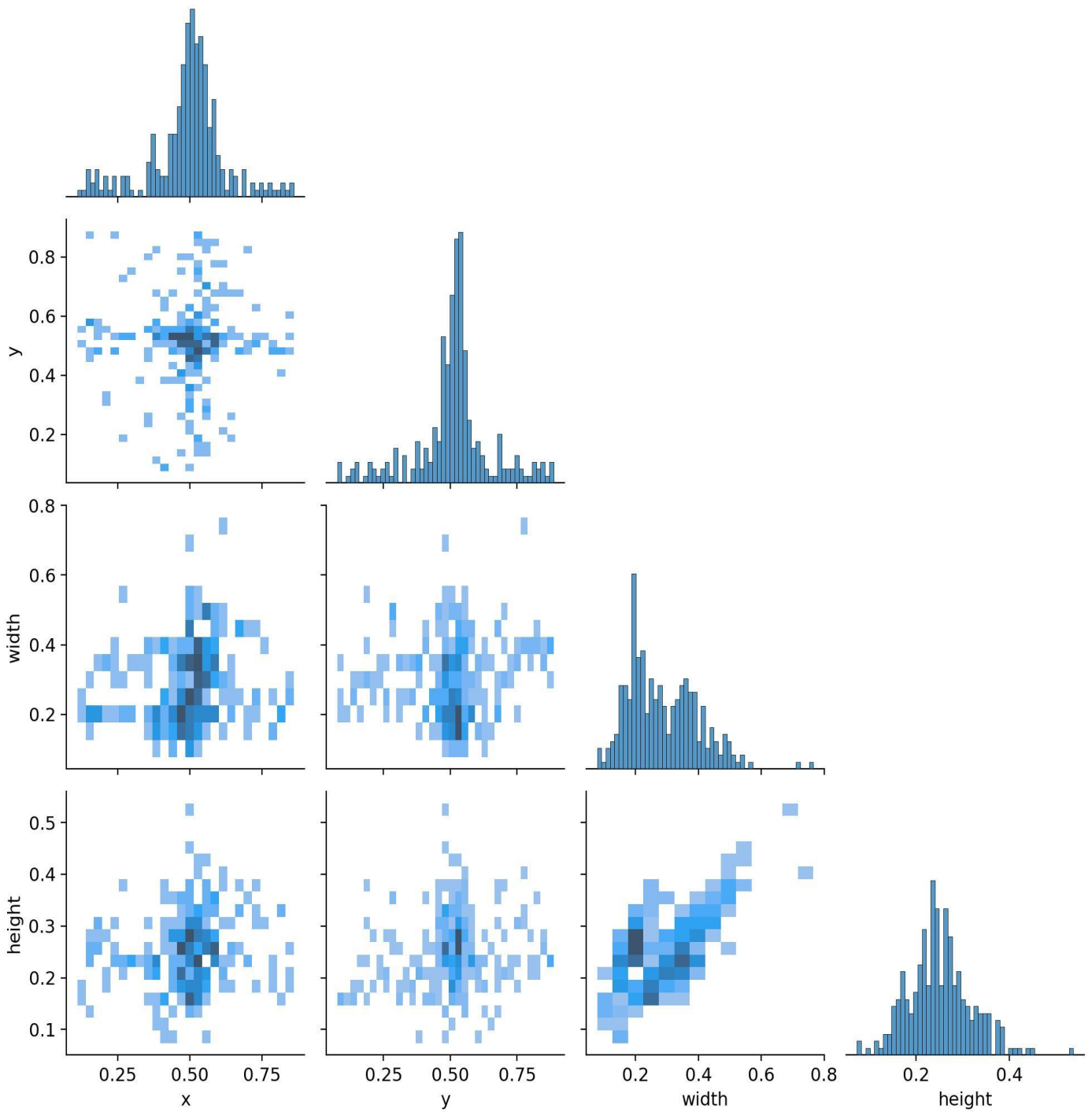
Voici les graphiques générés automatiquement lors de l'entraînement du modèle YOLO. Ils permettent de visualiser l'évolution des métriques de performance.



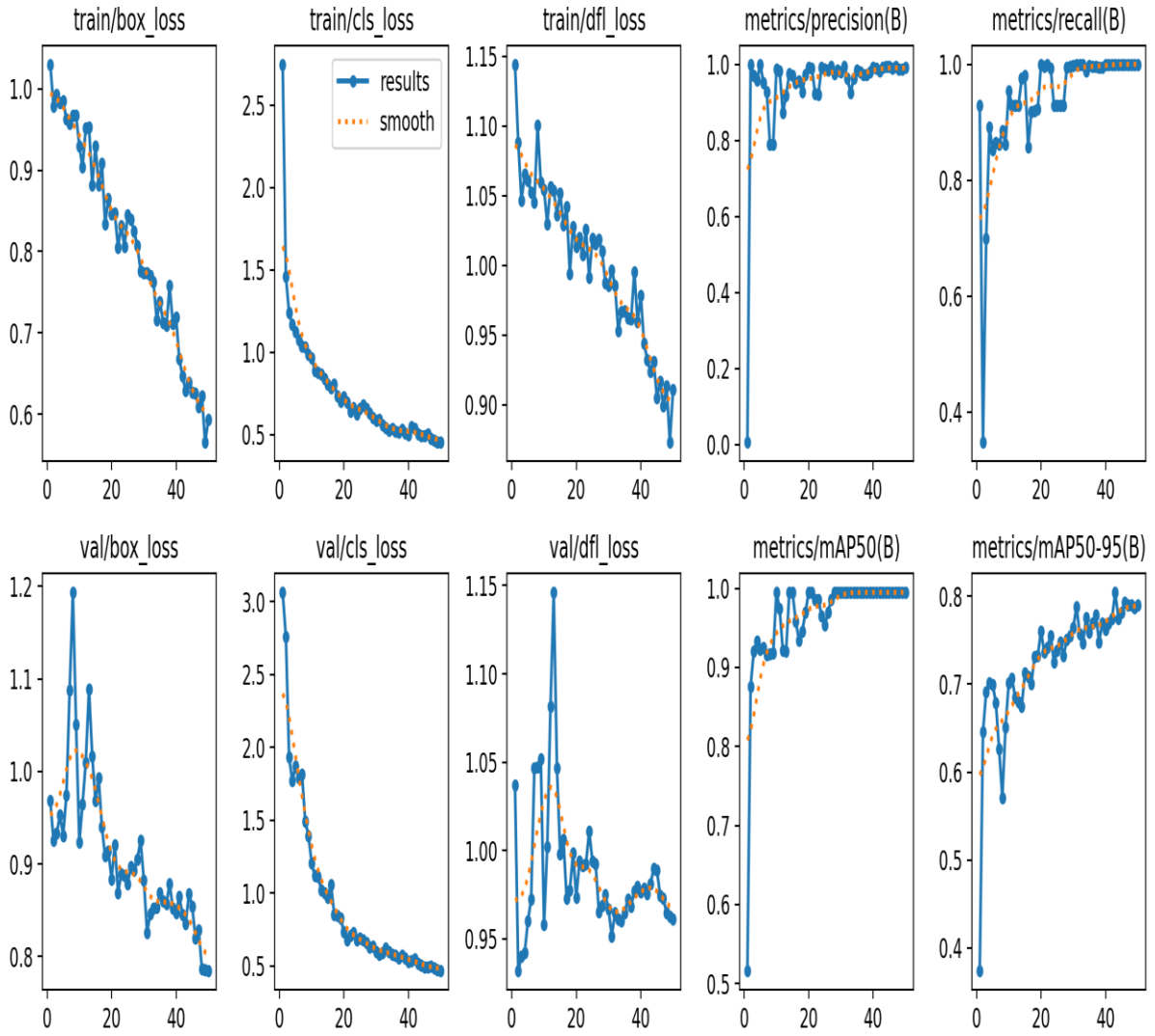




Répartition des étiquettes



Corrélogramme des étiquettes



Évolution des performances du modèle YOLO durant l'entraînement (50 epochs)



LE BUSINESS MODEL CANVAS

Projet : Système de tri automatique basé sur l'intelligence artificielle pour le secteur agroalimentaire **Date : 11/06/2025** **Version : finale**

<u>PARTENAIRES CLES</u>	<u>ACTIVITÉS CLÉS</u>	<u>PROPOSITION DE VALEUR</u>	<u>RELATION CLIENT</u>	<u>SEGMENTS CLIENTS</u>
<ul style="list-style-type: none"> - Entreprises agroalimentaires traitant des matières premières. - Fournisseurs de composants électroniques (caméras, moteurs, capteurs, Raspberry Pi) - Universités ou centres de recherche (collaboration IA, essais terrain) - Partenaires agricoles pour les tests en conditions réelles - Développeurs IA et intégrateurs mécatroniques - Incubateurs ou programmes de financement de l'innovation 	<ul style="list-style-type: none"> - Recherche et Développement (hardware et software) - Optimisation de l'algorithme IA et réentraînement du modèle - Installation du système chez le client - Maintenance du matériel et du logiciel - Tests de validation qualité et calibrage du système 	<ul style="list-style-type: none"> - Système de tri intelligent adapté à les besoin de l'entreprise - Solution adaptée à différentes cultures (tomates, pommes, abricot etc.) - Automatisation du tri des matières premières - Réduction des coûts de maintenance liés aux erreurs de tri - Réduction de l'effectif humain dédié à la tâche de filtration - Amélioration de la qualité finale des produits triés 	<ul style="list-style-type: none"> - Vente directe - Installation sur site - Personnalisation en fonction du type de matière à filtrer - Service de maintenance régulier et support technique - Mises à jour régulières du logiciel IA - Formation initiale et documentation complète - Suivi personnalisé pour les grands comptes (coopératives, industries) 	<ul style="list-style-type: none"> - Producteurs agricoles (individuels et regroupés) - Coopératives agricoles - Entreprises agroalimentaires (tri avant transformation) - Plateformes de conditionnement ou d'exportation - Marché B2B → segmenté, avec des besoins spécifiques
	<p style="text-align: center;"><u>RESSOURCES CLÉS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Algorithme propriétaire pour la détection et la classification des matières - Base de données sur les matières premières acceptables et inacceptables - Infrastructures pour le prototypage/fabrication - Actionneurs pour l'éjection physique des éléments indésirables 		<p style="text-align: center;"><u>CANAUX</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Prospection directe auprès des usines agroalimentaires - Participation à des salons professionnels agro-industriels 	
<p style="text-align: center;"><u>STRUCTURE DE COÛTS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Achat de composants matériels (capteurs, caméras, actionneurs) - Coûts de développement logiciel et IA - Frais de personnel technique (développement, installation, support) - Dépenses liées à la collecte et au traitement des données - Frais liés à la maintenance post-installation 		<p style="text-align: center;"><u>REVENUS</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Vente directe du système - Contrats de maintenance annuels - Services d'installation et de personnalisation - Option d'abonnement pour les mises à jour logicielles 		



BUSINESS PLAN

Premier axe : Présentation du projet

L'idée de projet

Nous proposons de développer un système de tri de tomates entièrement automatique, alliant vision par ordinateur et intelligence artificielle embarquée. Concrètement, un modèle léger de type YOLO/CNN analyse en temps réel les images captées sur le convoyeur, identifie chaque fruit et détecte les intrus (corps étrangers, déchets, fruits abîmés). Grâce à des servomoteurs pilotés via un Raspberry Pi et une carte PCA9685, les éléments non conformes sont éjectés de façon ciblée, garantissant un tri rapide, précis et traçable.

Les valeurs que nous défendons

- Efficacité** : en multipliant le débit de tri et en éliminant les ralentissements causés par l'intervention humaine.
- Fiabilité** : en réduisant drastiquement les erreurs et en assurant une détection constante, même après des heures d'utilisation.
- Qualité** : en offrant une classification rigoureuse (couleur, taille, forme) pour uniformiser chaque lot.
- Sécurité** : en limitant les contacts directs avec les machines et en préservant à la fois les opérateurs et les équipements.
- Accessibilité** : en misant sur une architecture modulaire et peu coûteuse, facilement reproductible pour les petites et moyennes structures.

Équipe de travail

Étudiants-ingénieurs : Abdel Hafid Salhat, Yaakoub Lahbali, Mohamed Haitem Belilet et Youcef Mihoub, responsables du développement logiciel et mécanique.

Encadrants : Dr. Salim Kebir et Dr. Faouzi Bouchareb (ENSTI-Annaba), apportant expertise technique et pédagogique.

Organisation du travail

Abdel Hafid Salhat et **Mohamed Haytem Belilet** forment le duo logiciel : ils collectent et annotent le jeu de données, entraînent les réseaux de neurones (CNN, YOLO) et élaborent les modèles d'anomalie à base d'Isolation Forest.

Yaakoub Lahbali prend en charge toute la partie mécanique : il conçoit et modélise chaque composant du prototype sous SolidWorks, puis pilote la fabrication qu'elle soit soustractive (usinage) ou additive (impression 3D).

Youcef Mihoub est responsable de l'intégration sur le terrain : il assemble le prototype sur Raspberry Pi 5, réalise le câblage via la carte PCA9685 et ajuste la précision des servomoteurs SG90

Modes d'interaction et de communication

Réunions hebdomadaires avec les encadrants pour faire le point sur l'avancement et ajuster les objectifs techniques.

Partage de code et de données via un dépôt Google drive (gestion des versions, issues, revues de code).

Comptes rendus de tests et journaux d'expérimentation consignés sous forme de rapports structurés (tableaux de métriques, scripts d'analyse).

Communication interne via messagerie instantanée Gmail (planification des tâches, suivi des responsabilités).

Objectifs du projet

Objectifs à court terme (0 – 1 an)

Développer un prototype fonctionnel de convoyeur modulaire et d'algorithme IA embarqué.

Valider la détection en temps réel des tomates et des corps étrangers sur Raspberry Pi 5.

Atteindre un taux de détection $\geq 90\%$ pour les tomates et $\geq 70\%$ pour les objets non-tomates lors des tests en conditions réelles.

Objectifs à moyen terme (1 – 3 ans)

Optimiser les modèles pour réduire la latence et la consommation énergétique.

Intégrer un système de pilotage à distance et d'interface utilisateur (dashboard web) pour le suivi temps réel.

Étendre la solution à d'autres produits agroalimentaires (fruits, légumes variés) et accroître la robustesse en environnements industriels.

Objectifs à long terme (3 – 5 ans)

Déployer une version industrielle du système sur chaîne de production à grande échelle (> 1 t/h).

Mettre en place un **service après-vente** et un contrat de maintenance prédictive (IoT + analytics).

Commercialiser la solution auprès des acteurs du secteur agroalimentaire en Algérie et à l'export, et l'adapter à des marchés internationaux.

Calendrier de réalisation du projet :

Pour assurer le succès de notre start-up nous avons divisé l'objectif final en plusieurs tâches partielles, chacune avec des délais spécifiques et des résultats clés. Voici le diagramme de Gantt qui exprime le calendrier détaillé de notre projet sur 14 semaines

Phase / Tâche	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14
Phase 0 – Préparation	X	X												
Revue bibliographique & étude de faisabilité	X	X												
Spécifications fonctionnelles et techniques	X	X												
Phase 1 – Conception mécanique et électronique			X	X	X									
Modélisation SolidWorks du convoyeur			X	X										
Sélection capteurs & actionneurs (caméras, servos, PCA9685)				X	X									
Phase 2 – Développement logiciel & IA						X	X	X						
Constitution base d'images & annotation						X								
Entraînement et tuning des modèles CNN, YOLO et anomalie						X	X							
optimisation sur Raspberry Pi							X	X						
Phase 3 – Intégration & prototypage									X	X	X			
Implémentation hardware sur Raspberry Pi et câblage									X					
Intégration du code IA et pilotage servos										X				
Première série de tests en conditions contrôlées											X			
Phase 4 – Tests réels & itérations												X	X	X
Validation du taux de détection (tomates & corps étrangers)												X		
Ajustements mécaniques, algorithmiques													X	
Rédaction du rapport final														X

Figure 1: Diagramme de Gantt

Deuxième axe : Aspects innovants

Nature des innovations

Notre projet se distingue d'abord par l'intégration inédite de l'intelligence artificielle directement embarquée sur un micro-contrôleur accessible (Raspberry Pi 5), garantissant un traitement en temps réel sans recourir à des serveurs distants. Nous fusionnons plusieurs approches d'apprentissage automatique : un modèle de détection YOLO léger pour repérer et classer chaque fruit, associé à un algorithme d'anomalie basé sur Isolation Forest pour traquer les défauts ou corps étrangers invisibles à un simple CNN.

Domaines d'innovation

L'innovation s'étend sur deux fronts :

Agroalimentaire & automatisation : nous réinventons les procédés de tri en proposant un système modulaire, capable de s'adapter à différents produits (tomates, fruits à coque, légumes délicats) et à des cadences variables, depuis la petite exploitation agricole jusqu'à la chaîne industrielle.

Maintenance prédictive & IoT : grâce à l'exploitation des données de performance (temps de réponse, consommation de courant des servomoteurs, taux d'erreur), nous préparons les fondations d'un service de maintenance prédictive. Cette couche logicielle future analysera en continu la santé de chaque composant (capteurs, actionneurs, carte PCA9685), avant qu'une usure n'impacte le rendement global, ouvrant la voie à une supervision à distance via un tableau de bord web.

Troisième axe : Analyse stratégique du marché

Le segment du marché

Le marché potentiel:

Le système de tri automatique basé sur l'intelligence artificielle vise le secteur agroalimentaire, un domaine en pleine transformation numérique. Le marché potentiel regroupe :

- Les producteurs agricoles (exploitations de taille moyenne ou grande),
- Les unités de transformation agroalimentaire,
- Les plateformes de conditionnement et d'exportation.

Ces acteurs sont situés majoritairement dans les zones rurales et périurbaines à forte activité agricole. En Algérie, plusieurs centaines de coopératives et dizaines d'unités de transformation sont concernées. Ces acteurs cherchent à :

- Automatiser le tri manuel, souvent coûteux et peu fiable,
- Améliorer la qualité du produit trié pour respecter les normes du marché,
- Réduire les pertes et le gaspillage en repérant les anomalies dès l'entrée.

- **Le marché cible (le segment) :**

Notre solution cible en priorité :

- Les producteurs agricoles,
- Les PME agroalimentaires,
- Les plateformes de conditionnement locales.

Ce segment est pertinent car ces structures disposent d'un volume de production suffisant pour justifier un système automatique, mais n'ont pas toujours accès aux solutions importées coûteuses.

Pourquoi avons-nous choisi ce marché cible ?

Ce marché combine :

- Un besoin réel et urgent d'automatisation,
- Une volonté d'adopter des innovations locales,
- Et une capacité d'adaptation à notre solution personnalisable, accessible et évolutive. En ciblant les structures de taille moyenne, nous évitons la concurrence directe des grandes marques internationales et répondons à un vide technologique.

Possibilité de conclure des contrats avec des clients importants :

Dans notre région, nous avons déjà entamé des discussions avec deux entreprises agroalimentaires locales : CARA-Echatt et Lala Salha, toutes deux intéressées par notre

solution de tri automatique intelligent. Ces premiers échanges ont permis de confirmer **la pertinence de notre technologie**, d'envisager des **tests sur site dans des conditions réelles**, et de poser les bases de **futures collaborations à moyen terme**.

Cependant, **aucune démarche concrète n'a encore été engagée auprès des entreprises situées dans d'autres wilayas**. Cela constitue notre **prochaine étape stratégique : étendre notre prospection au niveau national**, en visant particulièrement les zones à forte activité agricole et industrielle.

Parmi les entreprises que nous envisageons de contacter figurent :

- **NCA Rouiba** (Boissons et jus),
- **Numidia Agroalimentaire**,
- **Sarl El Khabia Agro** (Blida),
- **Algerian Fruits Company**,
- **Agrodiv** (ex-Onalait),
- **Sarl Frutti Natura** (Skikda).

Ces structures représentent des **acteurs majeurs ou intermédiaires** de l'industrie agroalimentaire algérienne. Elles disposent des moyens logistiques et techniques pour adopter notre solution, et constituent des **cibles stratégiques** pour le déploiement de notre système de tri à l'échelle nationale.

Mesure de l'intensité de la concurrence :

Concurrents directs et indirects :

Concurrents directs :

Les concurrents directs de notre solution sont les fabricants de machines de tri automatisé utilisant la vision optique ou l'intelligence artificielle. Voici quelques acteurs majeurs :

- **TOMRA** (Norvège) : leader mondial dans le tri optique de fruits et légumes, céréales et produits alimentaires. Leurs machines utilisent des capteurs haute précision pour classer les produits selon la couleur, la taille, la forme et même les défauts internes.
- **Satake** (Japon) : spécialisée dans le tri optique de grains, riz, légumes et produits secs. Leurs systèmes utilisent des caméras RGB et NIR pour détecter les défauts visuels ou de texture.
- **Bühler Group** (Suisse) : propose des machines de tri optique de haute performance avec IA intégrée, principalement destinées aux grandes industries de transformation alimentaire (ex : noix, grains, fruits secs).
- **Key Technology** (États-Unis) : conçoit des solutions de tri numérique pour l'industrie alimentaire, en particulier dans les produits coupés, transformés ou congelés.
- **Sortop (Chine)** : acteur émergent avec des solutions optiques plus accessibles pour les marchés en développement, orientées vers les fruits et légumes frais.

Ces entreprises offrent des systèmes **très performants mais à des prix élevés**, souvent **inaccessibles pour les PME ou coopératives agricoles locales**. Elles visent **principalement les grands groupes industriels**, avec peu de personnalisation et un support technique limité dans des pays comme l'Algérie.

Concurrents indirects :

Les concurrents indirects sont :

- Les méthodes manuelles traditionnelles : opérateurs humains qui trient les produits visuellement, souvent sur des tapis roulants ou dans des ateliers rudimentaires.
- Les systèmes semi-automatiques : convoyeurs simples avec tri mécanique par calibre ou poids, sans technologie d'analyse visuelle ou décisionnelle.

Ces méthodes sont très répandues dans les coopératives et petites entreprises agroalimentaires en Algérie, car elles sont peu coûteuses à l'achat. Cependant, elles présentent de nombreuses limites : erreurs humaines, lenteur, fatigue, manque de standardisation, difficulté à respecter les normes export.

Leur nombre et parts de marché :

Les fabricants internationaux sont peu présents directement sur le marché local, en raison des coûts élevés et du manque de personnalisation. Leur part de marché en Algérie reste marginale, limitée aux grandes unités disposant d'un budget important. En revanche, le tri manuel domine largement (près de 90 % des petites et moyennes structures).

Forces et faiblesses :

<i>Méthode / Concurrents</i>	<i>Forces</i>	<i>Faiblesses</i>
Concurrents internationaux (TOMRA, Satake, Bühler, Key Technology, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> • Fiabilité éprouvée sur le marché mondial • Haute précision grâce à la vision optique avancée et capteurs intelligents • Large gamme de produits adaptés à divers types de cultures • Capacité à traiter de très gros volumes en milieu industriel 	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'acquisition très élevé (souvent > 50 000 €), inabordable pour les PME • Solutions rigides et peu adaptables • SAV et pièces détachées peu disponibles en Algérie • Délais d'importation longs, obstacles logistiques (douanes, change, adaptation électrique)
Méthodes manuelles traditionnelles ou semi-automatisées	<ul style="list-style-type: none"> • Coût d'investissement initial très faible • Main-d'œuvre disponible et souvent expérimentée • Mise en œuvre simple, sans technologie complexe 	<ul style="list-style-type: none"> • Erreurs humaines fréquentes (fatigue, surcharge) • Manque de rapidité et de constance • Qualité non standardisée, frein à l'export • Difficile conformité aux normes internationales • Dépendance à la main-d'œuvre saisonnière

Notre système IA de tri automatique

Notre solution s'intercale **entre ces deux extrêmes**, en réunissant leurs avantages tout en **corrigeant leurs principales limites** :

- **Intelligent** : algorithme IA entraîné localement sur des images réelles de produits agricoles algériens.
- **Accessible** : prix largement inférieur aux machines étrangères, adapté aux budgets des structures agricoles locales.
- **Flexible** : possibilité de personnaliser le tri selon les produits (tomates, pommes, abricots...) et les critères visuels souhaités.
- **Local** : développement, installation, support technique et maintenance assurés en Algérie, avec présence physique ou à distance.
- **Évolutif** : mises à jour régulières de l'algorithme, calibrage intelligent, système adaptable à d'autres cultures ou marchés.

Ce positionnement unique nous permet de **combler le vide technologique** entre les solutions traditionnelles locales et les solutions industrielles importées, tout en **répondant spécifiquement aux besoins de notre marché cible**.

La stratégie marketing :

Stratégie adaptée à nos moyens financiers :

En tant que startup innovante avec un budget limité, notre stratégie marketing se base sur des actions ciblées, peu coûteuses mais à fort impact, afin de maximiser la visibilité de notre système IA de tri tout en conservant une maîtrise rigoureuse des dépenses. L'objectif est d'acquérir nos premiers clients, de valider notre offre sur le terrain, et de bâtir une image professionnelle et crédible dans le secteur agroalimentaire algérien.

Prospection directe et personnalisée

Nous privilégions un contact humain, ciblé et qualitatif avec des acteurs identifiés comme pertinents (coopératives agricoles, PME agroalimentaires, exportateurs de fruits et légumes, etc.).

Nos actions comprennent :

- Des visites sur site dans les wilayas agricoles stratégiques (Skikda, Biskra, El Oued, Mostaganem, Blida),
- L'envoi de présentations techniques par mail ou en format papier,
- Des rendez-vous B2B personnalisés, avec explication technique et bénéfices chiffrés pour le client (gains de temps, réduction des pertes, qualité de tri...).

Coût faible, impact élevé : un déplacement ciblé peut générer plusieurs leads qualifiés.

Présence dans les salons professionnels

Nous planifions de participer à des salons spécialisés à fort trafic comme :

- **DJAZAGRO** (Alger),
- **SIPSA-FILAHA** (Alger),
- **Salons régionaux agricoles (Skikda, Biskra, Sétif, etc.)**.

Nous viserons des stands modestes mais bien présentés, avec un petit prototype de démonstration, des vidéos de fonctionnement et du matériel de communication (brochures, kakémono, carte de visite, etc.).

Objectif : générer des contacts professionnels, créer de la notoriété, et établir notre légitimité technologique.

Installations pilotes gratuites chez des partenaires sélectionnés

Afin de prouver la valeur ajoutée de notre solution sur le terrain, nous mettrons en place 2 à 3 installations pilotes gratuites ou fortement subventionnées, chez :

- Des coopératives agricoles partenaires,
- Des unités de transformation locales intéressées (ex. Lala Salha, CARA-Echatt).

Cela nous permettra de :

- Obtenir des retours d'expérience réels pour affiner notre produit,
- Créer des références clients solides,
- Réaliser des vidéos de démonstration dans des conditions de production.

Création d'un site web vitrine professionnel

Le site internet sera simple, moderne, et en plusieurs langues (FR, AR, éventuellement EN), avec :

- Une présentation claire du système et de ses avantages,
- Des photos et vidéos du système en fonctionnement,
- Une FAQ technique, une page contact / devis rapide, et un espace actualités.

Ce site sera optimisé pour le référencement SEO local, et sera accompagné d'une présence sur :

- **Facebook** (communication terrain, vidéos, photos d'installations),
- **LinkedIn** (visibilité B2B, crédibilité auprès des décideurs),
- **YouTube** (vidéos de démonstration).

Un site web est une vitrine ouverte 24h/24 : il rassure, informe et génère des leads automatiquement.

Stratégie de contenu à coût zéro (marketing d'expertise)

Nous prévoyons de publier régulièrement :

- Des mini-articles ou posts techniques (ex. "Pourquoi le tri IA augmente la qualité d'exportation ?"),
- Des témoignages clients en vidéo,
- Des cas d'usage concrets avec chiffres à l'appui.

Cela nous positionne comme un acteur sérieux et expert dans notre domaine, même avec un budget modeste.

QUATRIÈME AXE : PLAN DE PRODUCTION ET ORGANISATION

Le processus de production :

Le processus de production du système de tri se décompose en plusieurs étapes :

Étape 1 : Achat de composants

- Acquisition des capteurs, caméras, mini-ordinateur, actionneurs, composants mécaniques.

Étape 2 : Fabrication et assemblage

- Intégration des éléments matériels,
- Programmation du logiciel IA et calibration selon la matière première.

Étape 3 : Conditionnement

- Tests de bon fonctionnement, validation de la reconnaissance IA,
- Préparation du système pour transport (support, boîtier...).

Étape 4 : Emballage et livraison

- Emballage sécurisé de la machine,
- Livraison et installation sur site client.

L'approvisionnement :

L'approvisionnement constitue un pilier stratégique dans la réussite de notre projet, dans la mesure où la performance du système de tri automatique dépend directement de la qualité, de la disponibilité et de la compatibilité des composants électroniques et mécaniques utilisés.

Politique d'achat :

Notre politique d'achat repose sur les principes de flexibilité, fiabilité et optimisation des coûts. Étant en phase de lancement, nous adoptons une démarche pragmatique et progressive :

- Priorité donnée à des composants standards et faciles à approvisionner localement ou via des plateformes internationales fiables (capteurs optiques, Raspberry Pi, caméras industrielles, moteurs pas à pas, etc.). Cela réduit notre dépendance aux pièces sur mesure difficiles à remplacer, tout en simplifiant la maintenance et le remplacement.
- Préférence pour les composants modulaires et interchangeables, afin de faciliter la personnalisation du système selon le type de produit trié (tomates, pommes, dattes...).
- Achat en petits lots au démarrage, pour limiter le besoin en capital immobilisé et éviter les stocks inutiles. Cette stratégie permet aussi d'évaluer la fiabilité des fournisseurs sur les premières livraisons avant de s'engager sur de plus gros volumes.

- Dans les phases suivantes (croissance), nous prévoyons de passer à une commande planifiée en flux tendu, notamment pour les composants critiques (caméras, modules IA, actionneurs).

Fournisseurs les plus importants :

Nos principaux fournisseurs se répartissent en deux catégories :

Fournisseurs électroniques spécialisés

Ce sont eux qui fournissent les composants de base indispensables au système :

- Capteurs d'image / caméras industrielles (USB ou CSI compatibles IA),
- Microcontrôleurs / Raspberry Pi 4 ou 5, intégrés au cœur du système IA,
- Moteurs pas à pas / servo-moteurs pour l'éjection physique,
- Cartes de commande, relais, et composants électroniques de base.

Fournisseurs cibles :

- RS Components, DigiKey, Farnell : plateformes reconnues pour leur fiabilité, délais courts, fiches techniques claires.
- AliExpress (catégories professionnelles) ou Amazon Pro : pour les commandes ponctuelles ou pièces génériques à coût réduit.

Fournisseurs locaux et distributeurs nationaux

- Électro-DZ (Alger), Mekatronik DZ, ou ProTech Algérie : distributeurs locaux de composants, boîtiers, câbles et connectiques.
- Sarl MegaTronic ou Technoplus : fournisseurs pour l'assemblage mécanique, supports, châssis, et éléments de structure.

Nous prévoyons de créer des relations durables avec les fournisseurs stratégiques, en privilégiant les entreprises ayant déjà de l'expérience dans le secteur industriel ou les projets en R&D.

Politique de paiement et délais :

Nous adopterons une politique d'achat basée sur la négociation progressive avec les fournisseurs, selon notre volume de commandes et la confiance mutuelle. Nos principes sont :

- Paiement partiel à la commande (généralement entre 30 % et 50 %) et solde à la réception après contrôle de conformité et test de fonctionnement. Cette méthode limite les risques financiers et garantit la qualité à la livraison.
 - Utilisation d'un planning d'achat prévisionnel pour les composants critiques, afin de synchroniser les approvisionnements avec les dates de production et d'installation chez les clients.
- Les délais d'approvisionnement estimés sont les suivants :

- Composants importés standard (via RS, DigiKey...) : entre 7 et 15 jours ouvrés,
- Composants personnalisés ou en rupture : jusqu'à 3 à 4 semaines,
- Pièces locales ou génériques : généralement disponibles en 24 à 72 heures.

Nous comptons également intégrer un stock de sécurité pour les composants sensibles (caméras, actionneurs), afin d'éviter tout arrêt de production ou report d'installation chez le client.

La main-d'œuvre :

Nombre de postes :

Le projet peut créer 4 à 6 postes directs à court terme (prototype + premiers clients), extensibles à 10 personnes et plus à mesure que les ventes augmentent.

De plus, lorsque le système sera déployé dans plusieurs wilayas, et que la production et l'installation s'étendront à l'échelle nationale, le nombre de postes pourra croître de manière significative, dépassant largement les 10 employés, avec des équipes locales pour l'installation, la formation et la maintenance.

Types et profils requis :

- Développeurs IA et informaticiens (analyse d'image, maintenance logicielle),
- Ingénieurs mécatroniques (assemblage, calibration, installation),
- Techniciens pour l'assistance client, le SAV et la logistique.

Recours à la manutention :

Oui, lors du transport et de l'installation chez le client. La manutention sera gérée en interne ou sous-traitée localement.

Les principaux partenaires :

Nos partenaires jouent un rôle crucial dans la réussite du projet. Ils sont regroupés selon leur type :

- Fournisseurs technologiques : pour les composants matériels (capteurs, Raspberry Pi...),
- Universités et laboratoires : collaboration pour l'optimisation de l'IA et les tests,
- Incubateurs et structures d'accompagnement : soutien au financement, à la visibilité et au réseau,
- Coopératives agricoles pilotes : pour les tests sur le terrain, les retours d'expérience, et comme vitrine commerciale,
- Banques et investisseurs : pour le financement de la phase de production à plus grande échelle.

Cinquième axe : Plan financier

Coût et Charges

Estimation des ventes annuelles

Le tableau ci-dessous présente l'évolution estimée des ventes de systèmes sur les cinq prochaines années. Cette projection constitue la base de calcul pour les coûts de production liés aux composants électroniques.

Année	Ventes estimées	Coût unitaire composant estimé
2026	2 unités	160,000 DZD
2027	8 unités	640,000 DZD/unité
2028	18 unités	1,440,000 DZD/unité
2029	30 unités	2,400,000 DZD/unité
2030	45 unités	3,600,000 DZD/unité

Détail des charges et coûts sur 5 ans

En nous basant sur l'évolution des ventes et des besoins du projet, nous avons établi une estimation des charges récurrentes et des coûts d'exploitation pour les cinq années à venir. Ces coûts incluent les achats de composants, les frais de communication, le service après-vente, la R&D et les éventuelles rémunérations

Poste de coût (DZD)	2026	2027	2028	2029	2030
Composants électroniques (par unité)	160.000	640.000	1.440.000	2.400.000	3.600.000
Salaires / Indemnités	0	240.000	480.000	720.000	960.000
Marketing / Communication	20.000	50.000	80.000	100.000	150.000
SAV / Maintenance / Support	5.000	20.000	40.000	60.000	90.000
Frais administratifs	15.000	20.000	25.000	30.000	35.000
R&D (Améliorations produits / IA)	10.000	30.000	60.000	90.000	120.000
Somme	210.000	1.000.000	2.125.000	3.400.000	4.955.000

Modes et sources d'obtention de financement

Le lancement de notre projet nécessite un investissement initial modeste, destiné à financer la fabrication des premiers systèmes de tri, et initier les premières actions de communication. Pour cela, plusieurs sources de financement ont été envisagées :

Fonds propres : Apport personnel des membres fondateurs pour financer la phase de prototypage et les premières démonstrations client.

Crédit à taux bonifié : Prêt de 500 000 DZD sur 5 ans pour financer :

- l'achat des composants initiaux,
- les déplacements pour installation sur site,
- les premières actions de prospection commerciale.

Soutien familial ou informel : Prêt sans intérêt issu du cercle proche, pour pallier les besoins de trésorerie en cas d'imprévus.

Concours et appels à projets : Participation à des initiatives locales (incubateurs, institutions, concours) pour obtenir un appui financier ou technique en vue de l'industrialisation.

Mode de remboursement

Le prêt envisagé pour le lancement du projet, d'un montant de 5 000 000 DZD, sera remboursé sur une durée de 5 ans, selon le principe des annuités constantes. Ce mode de remboursement permet de garantir une gestion budgétaire stable, avec des échéances fixes à verser chaque année.

Le remboursement débutera dès la première année, et les annuités seront prélevées sur les bénéfices générés par l'activité commerciale, notamment à partir de la deuxième vente prévue au cours de l'année 1. Cette approche offre une bonne visibilité financière et permet de conserver une trésorerie positive sur l'ensemble de la période de remboursement.

Le taux d'intérêt appliqué est estimé à 5 %, en cohérence avec les dispositifs publics de soutien à l'entrepreneuriat. Le tableau ci-dessous détaille le plan de remboursement du capital et des intérêts sur les cinq années.

Année	Capital restant dû début d'année	Annuité à payer	Intérêts (5%)	Amortissement du capital	Capital restant dû fin d'année
2026	5,000,000 DZD	1,155,280 DZD	250,000 DZD	905,280 DZD	4,094,720 DZD
2027	4,094,720 DZD	1,155,280 DZD	204,740 DZD	950,540 DZD	3,144,180 DZD
2028	3,144,180 DZD	1,155,280 DZD	157,210 DZD	998,070 DZD	2,146,110 DZD
2029	2,146,110 DZD	1,155,280 DZD	107,310 DZD	1,047,970 DZD	1,098,140 DZD
2030	1,098,140 DZD	1,155,280 DZD	54,910 DZD	1,100,370 DZD	0 DZD

Le Chiffre d'Affaires

Le chiffre d'affaires prévisionnel a été estimé en fonction du nombre d'unités que nous prévoyons de vendre chaque année, ainsi que d'un prix de vente unitaire adapté à notre marché cible. Deux scénarios ont été élaborés : un scénario optimiste, basé sur une croissance soutenue et une valorisation maximale du produit, et un scénario pessimiste, tenant compte de marges réduites et d'un rythme de vente plus prudent.

Année	Nombre d'unités vendues	Scénario pessimiste (140,000 DZD/unité)	Scénario optimiste (180,000 DZD/unité)
2026	2	280000	360000
2027	8	1120000	1440000
2028	18	2520000	3240000
2029	30	4200000	5400000
2030	45	6300000	8100000
Somme		14420000	18540000

Les Comptes de Résultats Escomptés

En croisant les prévisions de chiffre d'affaires avec les charges estimées sur cinq ans, nous avons établi un compte de résultat prévisionnel permettant d'évaluer la rentabilité du projet. Deux versions sont présentées : l'une dans un scénario pessimiste avec des marges réduites, l'autre dans un scénario optimiste reflétant une dynamique de vente favorable. Ces tableaux permettent d'anticiper les bénéfices nets annuels et de démontrer la viabilité économique.

Scénario Optimiste

Année	Chiffre d'affaires (CA) DZD	Coûts totaux annuels DZD	Résultat net DZD
2026	360000	210000	150000
2027	1440000	1000000	440000
2028	3240000	2125000	1115000
2029	5400000	3400000	2000000
2030	8100000	4955000	3145000
Somme	18540000	11690000	6850000

Scénario Pessimiste

Année	Chiffre d'affaires (CA) DZD	Coûts totaux annuels DZD	Résultat net DZD
2026	280000	210000	70000
2027	1120000	1000000	120000
2028	2520000	2125000	395000
2029	4200000	3400000	800000
2030	6300000	4955000	1345000
Somme	14420000	11690000	2730000

Le Plan de Trésorerie

Le plan de trésorerie prévisionnel présente mois par mois l'évolution des entrées et sorties financières durant la première année d'activité. Il permet de suivre le solde de trésorerie et de s'assurer que l'entreprise dispose en permanence des liquidités nécessaires pour fonctionner, honorer ses engagements et financer sa croissance progressive.

Mois	Entrées (recettes) DZD	Sorties (dépenses) DZD	Solde mensuel DZD	Trésorerie cumulée DZD
Janvier	500,000 (prêt)	30,000 (R&D + admin)	470000	470000
Février	0	20,000 (marketing)	-20000	450000
Mars	0	30,000 (achat composants)	-30000	420000
Avril	180,000 (1 ^{ère} vente)	20,000 (support)	160000	580000
Mai	0	30,000 (matériel 2 ^e unité)	-30000	550000
Juin	0	25,000 (admin + comm)	-25000	525000
Juillet	180,000 (2 ^e vente)	20,000 (SAV + R&D)	160000	685000
Août	0	15,000 (SAV + admin)	-15000	670000
Septembre	0	20,000 (communication)	-20000	650000
Octobre	0	30,000 (R&D + marketing)	-30000	620000
Novembre	0	20,000 (frais divers)	-20000	600000
Décembre	0	30,000 (remboursement prêt)	-30000	570000