

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Oran 1, Ahmed Ben Bella
Institut des Sciences et Techniques Appliquées

Thème

An Innovation Fish Disease Detection in Aquaculture Environments using Deep Learning

Par

CHOUCHAOU Ferdaous

Mémoire présenté à l'institut des sciences et techniques appliquées
En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnelle IM

Soutenu le 16 juin devant le jury composé de

Pr. Iles Nadia	Université Oran 1	Présidente
Dr. Amine Dahane	Université Oran1	Encadrant
Dr. RABAIE Benameur	Université Oran1	Co-Encadrant
Dr. SOUIHI Sami	Université Paris-Est Créteil	Examineur
Pr. Mohammed Kamal Benhaoua	Université Mustapha Stambouli, Mascara	Examineur
Me. Guerri Houaria	Institut des pêches et des technologies De l'aquaculture (ITPA)	Partenaire Socio-économique

16 Juin 2025

Table des matières

Résumé.....	v
Liste des abréviations.....	vi
Remerciements.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Introduction.....	2
1.1. INTRODUCTION	2
1.1. Définition de l'aquaculture.....	3
1.2. Internet des objets (IOT)	3
1.3. L'importance de l'Internet des objets (IoT)	4
1.4. La technologie de l'IoT.....	4
1.5. Définition de l'IoT pour l'aquaculture.....	5
1.6. L'aquaculture intelligente grâce aux technologies IoT	5
1.8. Les technologies de communication en aquaculture	6
1.9. La technologie de localisation	6
1.10. System Architecture.....	7
1.11. Conclusion	8
Chapitre 2 : Les maladies des poissons et l'apport du Deep Learning dans leur détection.....	9
2.1. Introduction.....	9

2.2. Les maladies des poissons	9
2.3. L'apprentissage profond (Deep Learning)	17
2.4. Travaux antérieurs	19
2.5. Conclusion	35
Chapitre 03 : Implémentation et Résultats.....	36
3.1 Introduction.....	36
3.2 Outils de développement	36
3.3Environnement logiciel (Software).....	36
3.4. Matériels (Hardware).....	64
3.5. Conclusion	65
Chapitre 04 : Étude technico-économique.....	66
Tableau 1 : Coûts du local et installation.....	76
Tableau 2 : Coûts d'équipements	77
Tableau 3 : Coûts de matériels.....	78
Tableau 4 : Coûts des frais et services divers	79
Tableau 6 : coûts des salaires.....	80
Tableau 7 : Budget marketing.....	81
Tableau 8 : Bilan Final.....	82
Conclusion générale.....	84
Bibliographie.....	86

Résumé

L'aquaculture représente l'une des principales sources de production alimentaire mondiale. La surveillance de ce domaine nécessite des solutions automatisées, précises et abordables afin d'en assurer la durabilité. Cette thèse propose une architecture IoT associée à l'Intelligence Artificielle afin d'améliorer le suivi des maladies des poissons. L'étude s'est concentrée sur la classification de sept pathologies, en utilisant un jeu de données de 1 747 images. Quatre modèles de réseaux neuronaux convolutifs (AlexNet, VGG, ResNet et MobileNet) ont été comparés afin d'évaluer leur pertinence. Les résultats mettent en valeur les performances d'AlexNet et de VGG, qui atteignent une précision de 99,86 %, tandis que ResNet et MobileNet obtiennent respectivement 87,71 % et 76,86 %. Cette approche souligne l'efficacité des méthodes d'apprentissage profond dans la détection automatisée des maladies en aquaculture, et leur pertinence en tant qu'outil d'aide à la gestion des exploitations.

Mots clés : Surveillance aquacole, Caméras sous-marines intelligentes, Détection d'anomalies, Détection des maladies, Apprentissage profond, Réseaux neuronaux convolutifs (CNN), AlexNet, VGG, ResNet, MobileNet, IA, IoT.

Liste des abréviations

IoT	Internet of Things.
CNN	Conventional Neural Network
DL	Deep Learning
AI	Artificiel Intelligence
AlexNet	Alex Krizhevsky Network
VGG	Visual Geometry Group
ResNet	Residue Network
MobileNet	Mobile network

Remerciements

Je remercie **ALLAH le Tout-Puissant** de m'avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de mener à terme ce mémoire.

J'adresse mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Ce mémoire n'aurait jamais vu le jour sans le soutien actif des membres de ma famille — mes parents (Chouchaoui Abdelrahmen et Hor Fatoum), qui m'ont toujours encouragé moralement et financièrement, et mes frères (Mimouna, Ahmed, Ayoub).

Je tiens à remercier tout particulièrement mon encadrant, Docteur **Amine Dahane**, et mon co-encadrant, Docteur **Rabaie Benameur**, de m'avoir suivi, soutenu et conseillé tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements au jury, le Professeur **Iles Nadia**, le Docteur **Souihi Sami** et le Professeur **Benhaoua Mohammed Kamal**, d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

L'occasion m'est donnée, enfin, de remercier mes amis de promotion (Abbès, Fatima, Manar, Manel, Warda, Fatima Mhd, Sara) pour leur esprit de cohésion, de partage et d'entraide, qui ont contribué à rendre cette année universitaire brillante et enrichissante.

Pour conclure, je tiens à exprimer mes vifs remerciements, avec une profonde gratitude, à toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, car un projet n'est jamais le fruit d'une seule personne.

Table des figures

Figure 1: domaine d[3].....	4
Figure 2: La technologie de localisation[13]	7
Figure 3:Prétraitement	8
Figure 4: Maladie bactérienne rouge[18].....	10
Figure 5: Maladies bactériennes (Aéromonose) [18].....	11
Figure 6:Maladie bactérienne des branchies [18]	13
Figure 7: Maladies fongiques (Saprologéniose) [18].....	14
Figure 8:Maladies parasitaires [18]	15
Figure 9:Maladies virales [18].....	16
Figure 10:Hiérarchie de l'IA [32].....	17
Figure 11:Architecture CNN[37].....	19
Figure 12: Logo Anaconda[68].....	37
Figure 13: Jupyter notebook [69].....	38
Figure 14:Architecture AlexNet [76].....	40
Figure 15:Architecture VGGNet [78].....	41
Figure 16:Architecture ResNet [80].....	42
Figure 17:Architecture MobileNet [81].....	43
Figure 18:Bacterial Red disease[18].....	44
Figure 19:Healthy Fish[18].....	44
Figure 20:Data augmentation, Image Resizing.....	46
Figure 21:ResNet Accuracy	49
Figure 22 : matrice de confusion	50
Figure 23:Feature maps after first conv layer	51
Figure 24:AlexNet Accuracy	53
Figure 25:matrice de confusion	54
Figure 26:Feature maps after first conv layer	55
Figure 27:VGGNet Accuracy.	56

Figure 28:matrice de confusion	57
Figure 29:MobileNet Accuracy.	58
Figure 30:matrice de confusion	59
Figure 31:Feature maps after first conv layer	60
Figure 32: Analyse comparative	61
Figure 33:modèle finale	65

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résumé des études récentes utilisant l'intelligence artificielle et l'IoT dans l'aquaculture.	20
Tableau 2 : Synthèse des approches technologiques appliquées à la détection, la classification et la surveillance des maladies en aquaculture.	23
Tableau 3 : Présentation des principaux jeux de données utilisés pour la détection des maladies des poissons en aquaculture	33
Tableau 4 : Évaluation comparative des performances des quatre modèles pour la classification des maladies des poissons.....	62

Liste des équations

Équation 1	46
Équation 2	46
Équation 3	47
Équation 4	47

Introduction générale

L'aquaculture est devenue une industrie majeure afin de satisfaire l'appétit mondial, en constante croissance, pour les produits de la mer. Les animaux aquatiques, en particulier les poissons, sont sujets à de nombreuses maladies, ce qui représente un défi important pour les éleveurs, pouvant entraîner des pertes économiques considérables. Face à ce problème, de nouvelles technologies, telles que l'intelligence artificielle (IA) et l'Internet des objets (IoT), offrent de nouveaux espoirs afin d'améliorer la surveillance et le diagnostic dans les environnements aquacoles.

En ce qui concerne la partie pratique de ce mémoire, le travail a été structuré en deux volets. Tout d'abord, la partie théorique, puis la partie pratique.

Dans la première partie, on s'est concentré sur la question de l'aquaculture, des systèmes liés à l'élevage de poissons marins et des défis liés aux maladies animales, en particulier celles affectant les poissons. Par la suite, on a décrit comment la technologie intelligente, notamment l'IoT, peut assurer la surveillance et le contrôle d'un large éventail de facteurs ayant une influence sur l'élevage de poissons. On a également présenté quelques prérequis fondamentaux de l'apprentissage profond, en particulier des méthodes utilisées en analyse d'images, comme les réseaux de neurones convolutifs (CNN), qui permettent d'identifier de manière autonome des lésions ou des zones malades sur des images de poissons. L'étude de l'analyse d'images et de l'apprentissage automatique, discipline en plein essor, a suscité un intérêt scientifique grandissant. Enfin, on a passé en revue les principales maladies aquacoles et certains des derniers progrès de la littérature scientifique dans ce domaine.

Dans la seconde partie, ces connaissances ont servi de base afin de réaliser un système de détection automatique des maladies de poissons à partir d'images réelles. On a pris comme base de données une collection d'images disponible sur Kaggle, incluant des cas de poissons malades et de poissons sains. Par la suite, on a appliqué divers modèles d'apprentissage profond (AlexNet, VGG, ResNet, MobileNet) afin d'en évaluer les performances en termes de classification. Le traitement a été effectué dans un environnement Cloud (Google Colab), avec une étape de préparation des images. Certains modèles, notamment AlexNet et VGG, se sont révélés les plus performants, atteignant une précision de plus de 90 % dans la détection des maladies.

Ces analyses mettent en valeur la capacité de l'intelligence artificielle à transformer des progrès technologiques en solutions innovantes, modernisant le secteur de l'aquaculture et le rendant plus durable.

Chapitre 1 : Introduction

1.1. INTRODUCTION

L'aquaculture connaît une croissance saisonnière en début d'année, stimulée par l'augmentation de la demande mondiale en poissons, la croissance démographique et le développement économique. De grandes avancées technologiques, des méthodes traditionnelles basées sur un continent intensif sur des avancées progressives en place de systèmes automatisés et intelligents intégrés dans les objets Internet (IoT), l'intelligence artificielle (IA), la robotique et les technologies de l'information. Cette transition est essentielle pour surmonter ces dispositifs que la pénurie principale d'œuvre et la propagation des maladies.

Les maladies des poissons constituent un défi majeur pour le secteur avec des pertes économiques importantes. À cet égard, un diagnostic précoce et une gestion efficace sont essentiels pour prévenir les conditions néfastes pour les poissons et assurer la viabilité à long terme de la production. Les nouvelles technologies – telles que l'apprentissage automatique (Machine Learning), la réalité augmentée, les dispositifs de capture biométrique (Biosensors) et les techniques génomiques avancées – ont considérablement amélioré la surveillance et le diagnostic des maladies des poissons. Des facteurs environnementaux tels que la diminution des niveaux d'oxygène et la pollution des ressources en eau sont également importants, car ils exposent les poissons à un risque sanitaire élevé et les rendent plus vulnérables aux agents pathogènes tels que *Bacillus cereus* et *Vibrio*.

L'utilisation croissante de technologies intelligentes, telles que l'intelligence artificielle et l'analyse de données massives, a transformé l'aquaculture en facilitant la prédiction des maladies et la modélisation des décisions. De plus, couplés à l'intégration des systèmes d'information géographique (SIG), de l'IoT et des technologies de séquençage rapide du génome, ils favoriseront la durabilité et la performance de la production, ouvrant ainsi la voie à une aquaculture plus moderne et plus efficace.

1.1. Définition de l'aquaculture

L'aquaculture est l'industrie alimentaire connaissant la croissance la plus rapide au monde et possédant le plus fort potentiel de développement. Près de la moitié des produits aquatiques consommés par les humains proviennent de l'élevage, ce qui lui confère un rôle essentiel dans l'approvisionnement alimentaire mondial. Les activités de la FAO dans ce domaine s'inscrivent dans le cadre de l'initiative Blue Transformation (Transformation bleue), qui vise à renforcer la résilience et la durabilité, à réduire l'impact environnemental, à améliorer la biosécurité et la gestion des maladies grâce à l'innovation et aux technologies avancées, ainsi qu'à développer les capacités pour assurer une croissance inclusive et équitable. [1]

1.2. Internet des objets (IOT)

L'internet des objets (IOT) est, selon sa définition originelle, un ensemble de réseaux d'interconnexion fondés sur des systèmes d'identification électronique normalisée et des dispositifs mobiles sans fil; il établit un cadre d'identification précise, voire systématique, des objets physiques et des entités numériques associées, facilitant ainsi le stockage, le transfert et le traitement automatisé de l'information concernant des objets mobiles, tout en opérant une interconnexion entre le monde physique et le monde virtuel. [1] [2]

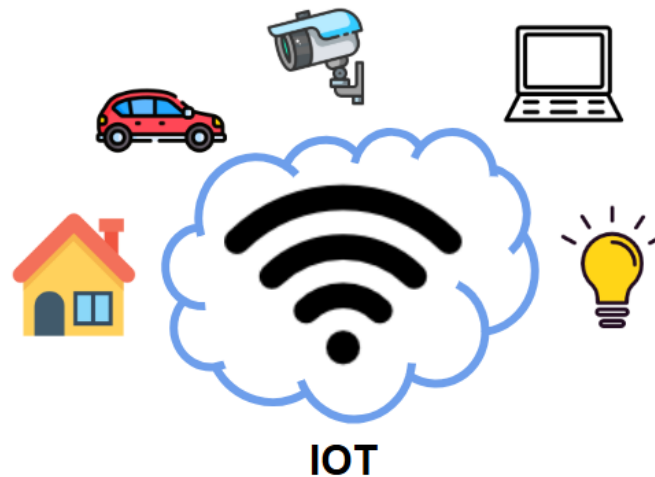


Figure 1: domaine d'application[3]

1.3. L'importance de l'Internet des objets (IoT)

L'Internet des Objets (IoT) est aujourd'hui l'avancée technologique à 21^e siècle avec plus de signes. Il permet de connecter divers objets, tels que des appareils électroniques, des téléphones, des moniteurs climatiques ou les interphones de votre bébé, à Internet via des équipements intégrés. Cette connexion permet une communication fluide entre les personnes, les processus et les objets.[4]

Grâce aux progrès de l'informatique, du cloud, de l'analyse et des technologies mobiles, ces objets sont capables de collecter et de partager des informations avec peu ou pas d'intervention humaine. Dans ce monde hyperconnecté, les systèmes numériques sont capables d'enregistrer, de surveiller et d'apprendre en temps réel les interactions entre les appareils connectés. De cette manière, le monde physique et le monde numérique s'entremêlent et collaborent étroitement.[5]

1.4. La technologie de l'IoT

Bien que l'idée de l'Internet des objets (IoT) existe déjà, sa concrétisation a été rendue possible par les dernières avancées technologiques dans divers domaines :

Intelligence artificielle (IA) : l'IA est au cœur de l'IoT, exploitant les volumes massifs de données collectées pour identifier des tendances, automatiser les processus et améliorer les

prévisions. Cette innovation accroît le besoin de centres de données et de services cloud, utilisés pour l'entraînement des modèles d'intelligence artificielle.[6]

1.5. Définition de l'IoT pour l'aquaculture

Internet des Objets (IoT) en caméras aquacole fait référence à l'implantation de caméras intelligentes et connectées dans les infrastructures aquacoles de gestion.

Ces caméras équipées de capteurs et de technologies de communication reçoivent et acheminent des informations visuelles en temps réel sur le milieu aquacole, les poissons et les conditions hydriques. [7] S'ils sont parfois associés à des algorithmes de traitement d'image et d'intelligence artificielle (IA) pour traiter automatiquement les données, telle la reconnaissance des maladies, la classification des espèces, l'estimation de la taille des poissons, ou la surveillance de la qualité de l'eau.[8]

1.6. L'aquaculture intelligente grâce aux technologies IoT

Propulsée par la technologie, l'aquaculture a évolué des pratiques de subsistance vers des systèmes entièrement automatisés. Avec une augmentation de la demande et une réduction de l'offre de main-d'œuvre, il existe un besoin urgent d'un modèle d'aquaculture plus intelligent.

L'Internet des objets (IoT) fait partie de la 4ème révolution industrielle et améliore l'efficacité des opérations agricoles en utilisant l'IoT, les grandes données, l'IA, la 5G, l'informatique en nuage et la robotique. Ces technologies offrent une surveillance et un contrôle à distance des infrastructures en intégrant tous les processus associés à la production, à l'exploitation opérationnelle et à la gestion des maladies.[9] Ce type de modèle innovant est soutenu par l'IoT, tandis que l'analyse des grandes données avec l'IA approfondit l'examen et la précision de la gestion aquacole. L'atténuation des impacts environnementaux et sanitaires peut être atteinte grâce à des équipements innovants et des technologies connectées, garantissant une production équilibrée et durable. Les capteurs fonctionnent en capturant et en transmettant des données en temps réel sur la croissance des poissons, mesurant les paramètres environnementaux, les opérations et l'allocation des ressources, permettant ainsi de faire des choix éclairés.[10]

1.8. Les technologies de communication en aquaculture

Intégrant l'apprentissage profond, l'inefficacité de l'élevage de poissons a été améliorée. Les technologies issues de l'analyse de grands ensembles de données numérisées aux capteurs et systèmes de monitoring donnent un visuel instantané sur l'alternance de la santé des poissons. Par exemple, la classification et la prédiction des malades et sains est réalisée par des algorithmes d'apprentissage automatique. En d'autres termes, la collaboration des technologies de communication avec l'intelligence artificielle multifonctionnelle a permis de faciliter l'aquaculture avec l'aide de machines de surveillance programmées, d'analyses automatiques et d'aides prédictives.[11]

1.9. La technologie de localisation

La technologie de localisation par apprentissage profond en aquaculture s'appuie sur les algorithmes de pointe permettant de suivre et d'analyser la compétition et la santé des poissons. Avec la vision stéréoscopique, elle permet une analyse en trois dimensions, permettant d'analyser en 2D le front des méthodes classiques. Ces CNN sont efficaces pour la détection, la segmentation et le suivi des poissons dans le milieu aquatique. Le mode Fish DETECT est plus facile à appliquer au transfert d'apprentissage, augmente la précision et l'efficacité de l'identification des espèces sous-marines, même dans des conditions complexes. En bref, cette technologie facilite une gestion optimisée et automatisée des fermes piscicoles, conduisant ainsi à une aquaculture plus durable et plus efficace.[12]

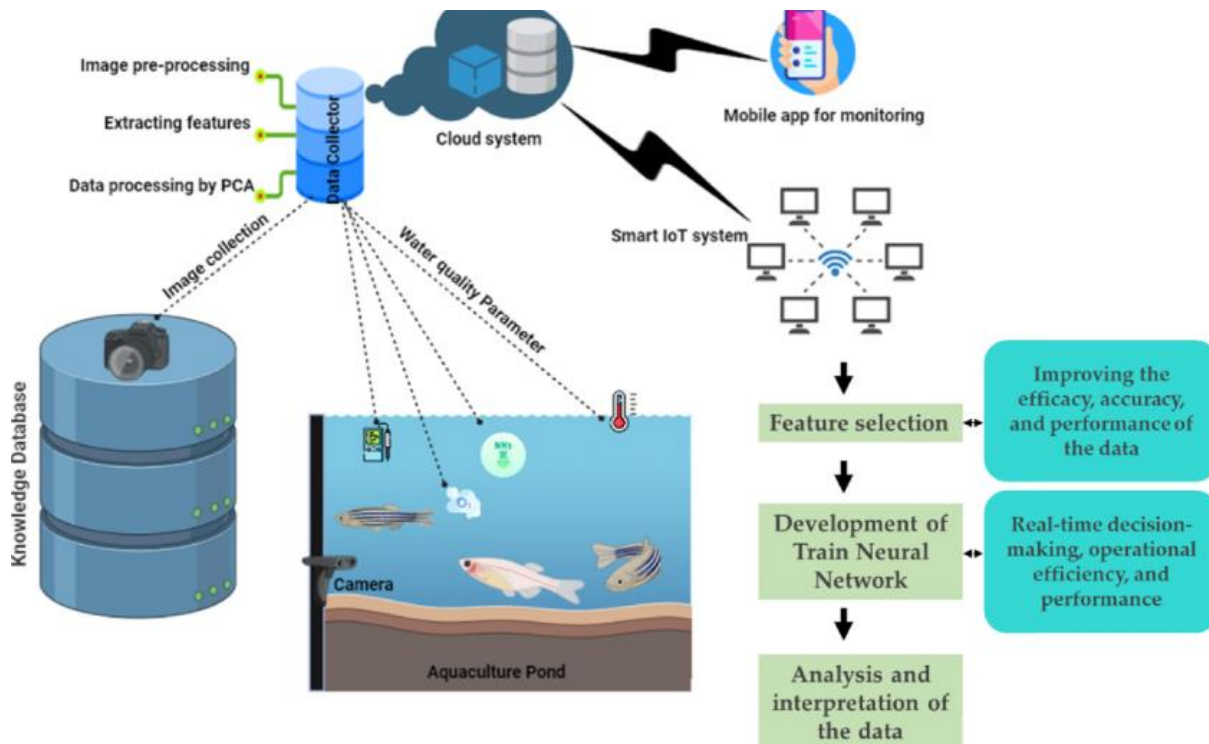


Figure 2: La technologie de localisation[13]

1.10. System Architecture

Le système proposé se compose de trois étapes : augmentation des données, détection et classification. Étant donné que l'ensemble de données initial est de petite taille et déséquilibré, une augmentation des données a été réalisée à l'aide de diverses techniques afin de créer un ensemble de données équilibré et plus large. Dans l'étape de détection, les images d'entrée sont traitées pour extraire les parties contenant des poissons malades. Des techniques de traitement d'images et de segmentation sont utilisées pour identifier les zones présentant des signes de maladie. Ensuite, ces parties sont transmises au classificateur, qui les analyse et produit une distribution de probabilité des types de maladies détectées, facilitant ainsi un diagnostic précis et la prise de mesures thérapeutiques appropriées. Pour détecter les maladies des poissons, nous avons également utilisé des modèles deep Learning. Le modèle d'ensemble qui a atteint la plus haute précision était simplement un modèle CNN pré-entraîné.[14]

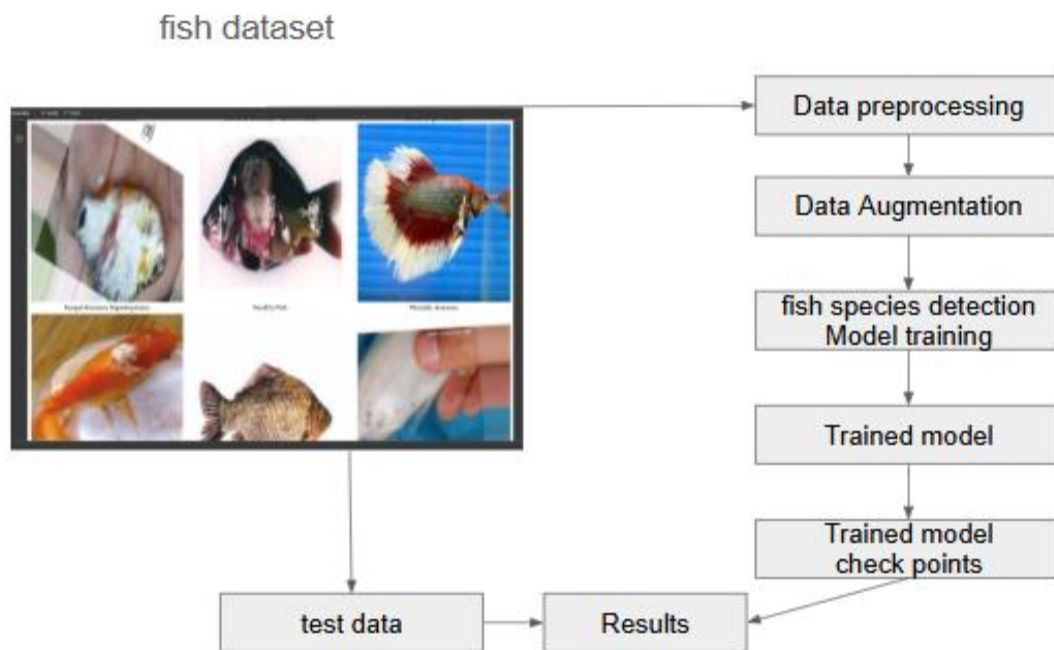


Figure 3: Organigramme du pipeline de détection des maladies de poissons

1.11. Conclusion

L'utilisation des nouvelles technologies IoT dans l'aquaculture permet de générer un potentiel significatif pour la gestion de la santé ichthyologique et pour la performance productivité attendue. En répertoriant les causes, les signes et les facteurs de risque des pathologies aquatiques, l'étude conduite a montré que les techniques intelligentes d'apprentissage automatique et d'IoT sont aisément mobilisables pour surveiller, dépister et agir sur les problèmes de santé de l'aquaculture. La mise en réseau, par des outils numériques performants des pratiques aquacoles, permet un diagnostic anticipé, décision plus intelligente et des opérations écoresponsables, et ainsi une aquaculture moderne et résiliente.

Chapitre 2 : Les maladies des poissons et l'apport du Deep Learning dans leur détection

2.1. Introduction

Les poissons, qu'ils vivent en aquarium ou en milieu naturel, ne sont pas à l'abri des maladies. Comme tout être vivant, ils peuvent être touchés par des infections d'origines diverses : parasitaires, bactériennes, fongiques ou virales. Ces maladies peuvent rapidement se propager, surtout en milieu confiné, et mettre en danger l'ensemble d'un groupe. Les maladies contagieuses chez les poissons sont particulièrement préoccupantes, car un seul individu peut rapidement infecter l'ensemble du groupe. Dès qu'une maladie est détectée, il est recommandé d'isoler les poissons atteints dans un aquarium spécifique, appelé "aquarium hôpital". Comprendre les signes cliniques, les causes et les traitements possibles est essentiel pour assurer la santé et le bien-être des poissons. Ce dossier a pour objectif de présenter les principales maladies contagieuses chez les poissons, leurs symptômes, leurs causes, ainsi que les moyens de prévention et de traitement.

2.2. Les maladies des poissons

2.2.1. La maladie des points rouge (Bacterial Red disease)

- **Comment reconnaître et identifier la maladie**

Maladie bactérienne rouge bactérienne est une maladie bactérienne aiguë qui se traduit par : des lésions rouges sur la peau, les nageoires ou autour de la bouche, une inflammation des tissus, habituellement associée au saignement, un comportement anormal tels que la nage lente ou la perte d'appétit, des ulcères ou des zones nécrotiques (mort des tissus), occasionnellement, une mort subite chez les poissons sévèrement infectés.[16]

- **Cause**

- ✓ Pathogène bactéries : principalement *Aeromonas hydrophila* mais aussi *Pseudomonas*, *Vibrio*, etc.
- ✓ Qualité de l'eau défectueuse : trop de matière organique, pH instable, faible oxygénation, stress : surpopulation, alimentation défectueuse, brusques changements de température. [16]

- **Symptômes**

- ✓ Rougeurs visibles sur la peau, surtout autour de la bouche, des nageoires ou de la queue.

- ✓ Ulcères cutanés ou plaies ouvertes.
 - ✓ Saignements internes ou externes (taches rouges sous la peau).
 - ✓ Gonflement de l'abdomen ou déformations corporelles.
 - ✓ Nage lente ou désorientée.
 - ✓ Perte d'appétit.
 - ✓ Léthargie ou isolement.
 - ✓ Mort subite dans les cas graves.[17]
- **Prévention et traitement**
 Maintenir une bonne qualité d'eau (filtration, oxygénation, nettoyage régulier).
 - ✓ Anticiper surpeuplement et limiter les facteurs de stress.
 - ✓ Utiliser des antibiotiques appropriés sous supervision vétérinaire.
 - ✓ Ajouter des probiotiques ou des suppléments pour renforcer le système immunitaire.
 - ✓ Isoler les poissons malades pour limiter la propagation.[17]



Figure 4: Maladie bactérienne rouge[18]

2.2.2. Maladies bactériennes (Aéromonose)

- **Comment reconnaître et identifier la maladie**
 Cette aéromonose est une cause bactérienne majeure principalement causée par *Aeromonas hydrophila* mais certaines parties du monde comme *A. sobria* et *A. caviar* peuvent également être utilisées à l'intérieur. La maladie touche fréquemment les poissons d'eau et ce mois-ci à l'occasion des risques sanitaires de la grave.[19]
- **Cause**
 - ✓ **Facteurs environnementaux** : température élevée, production efficace d'oxygène, accumulation de déchets d'organes.
- **Symptômes**

- ✓ Rougeurs et inflammations cutanées, nageoires
- ✓ Ulcères et plaies ouvertes.
- ✓ Écailles hérissées (présentation hérissée du corps).
- ✓ Ventre distendu due à une congestion de liquides internes.
- ✓ Comportement anormal : léthargie, nage aberrante, solitude.
- ✓ Hémorragies internes (taches rouges apparaissant sous la peau).
- ✓ Mort soudaine dans les cas sévères[20]

Prévention et traitement

- ✓ Maintenir une bonne qualité de l'eau (filtration, aération, modifications des paramètres).
- ✓ Éliminer le stress sur les poissons de la population environnante.
- ✓ Retirez-vous rapidement des poissons morts ou endommagés.
- ✓ Utilisation d'antibiotiques appropriés (tels que l'Ox tétracycline ou l'en ofloxacine) sous surveillance vétérinaire.
- ✓ Renforce le système immunitaire des poissons en bonne santé dans une alimentation adaptée et l'utilisation de probiotiques.[21]



Figure 5: Maladies bactériennes (Aéromonose) [18]

2.2.3. Maladie bactérienne des branchies

- **Comment reconnaître et identifier la maladie**

La maladie bactérienne des branchies est une infection affectant les branchies des poissons, causée par des bactéries telles que *Flavobacterium branchiophilum*. Elle est étroitement liée à l'aquaculture intensive et peut pénétrer dans les fosses respiratoires difficiles des poissons.[22]

- **Cause**

- ✓ Bactéries pathogènes : principalement *Flavobacterium branchiophilum*.
- ✓ Conditions de vie stressantes : surpopulation, mauvaise qualité de l'eau.
- ✓ Mauvaise hygiène du système d'élevage.
- ✓ Faible taux d'oxygène et forte concentration d'ammoniaque dans l'eau.[23]

- **Symptômes**

- ✓ Respiration raid en surface.
- ✓ Inflammation et fabrication des branchies (pâles ou foncées).
- ✓ Accumulation de mucus sur les branchies.
- ✓ Nage désorientée ou isolement.
- ✓ Perte d'appétit.
- ✓ Mort subite dans les cas sévères[24]

- **Prévention et traitement**

Maintenir une bonne qualité de l'eau (oxygène, pH, température, propreté).

- ✓ Réduire le stress en contrôlant la densité de population.
- ✓ Utiliser des antibiotiques adaptés sous supervision vétérinaire.
- ✓ Améliorer la biosécurité et nettoyer régulièrement les systèmes d'élevage.
- ✓ Renforcer l'immunité des poissons avec une alimentation équilibrée [24]



Figure 6:Maladie bactérienne des branchies [18]

2.2.4. Maladies fongiques (Saprolegniasis)

- **Comment reconnaître et identifier la maladie :**

La « saprolegniasis » est une maladie fongique provoquée essentiellement par des champignons du genre *Saprolegnia*. Elle se manifeste sur la peau, les branchies et les œufs des poissons d'eau douce, surtout lorsque ceux-ci sont faibles ou blessés. Elle est souvent décrite comme une maladie secondaire, qui apparaît après un stress ou une blessure.[25]

- **Cause**

- ✓ Champignons du genre *Saprolegnia* (*S. parasitica*, *S. ferax*).
- ✓ Eau froide, stagnante ou de mauvaise qualité.
- ✓ Lésions cutanées, manipulations brutales, ou stress.
- ✓ Infection secondaire après d'autres maladies ou affaiblissement du système immunitaire.[25]

- **Symptômes**

- ✓ Présence de filaments blancs ou grisâtres du coton ressemblant sur la peau ou les nageoires.
- ✓ Décoloration de la peau autour des lésions.
- ✓ Lésions ulcéreuses ou détérioration des tissus.
- ✓ Comportement léthargique.
- ✓ Décès d'œufs contaminés auprès de poissons porteurs.[26]

- **Prévention et traitement**

- ✓ Maintenir une bonne qualité de l'eau et éviter l'état de stress.
- ✓ Décontaminer les plaies dès leur apparition.

- ✓ Utiliser des traitements antifongiques particuliers (par exemple : permanganate de potassium, vert de malachite, sel).
- ✓ Isoler les poissons infectés afin de réduire la contagion.
- ✓ Purifiez les bacs et les équipements périodiquement.[26]



Figure 7: Maladies fongiques (Saprolegniasis) [18]

2.2.5. Maladies parasitaires

■ Comment reconnaître et identifier la maladie

Cette affection se manifeste notamment par des excréments blancs, légèrement gélatineux, qui restent souvent collés à l'anus, lequel peut paraître anormalement dilaté. Le poisson commence à maigrir, tandis que ses déjections deviennent de plus en plus translucides, tout en gardant leur aspect blanchâtre et gélatineux. Progressivement, il cesse de s'alimenter, ou ne mange que très peu. Des troubles de la vessie natatoire peuvent également apparaître, affectant sa capacité à nager correctement. Sur le long terme — parfois pendant plusieurs mois — l'amaigrissement devient sévère, au point de laisser entrevoir la structure osseuse à travers une peau affinée et translucide.[27]

■ Cause

- ✓ Protozoaires : Ichthyophthirius multifiliis (maladie des points blancs), Trichodina, Chilodonella.
- ✓ Versus plats (Trématodes, Cestodes) : Gyrodactylus, Dactylogyrus.
- ✓ Vers ronds (Nématodes) : Capillaria.
- ✓ Parasites des crustacés : Argulus (pou du poisson), Lernaea (ver ancre).[27]

■ Symptômes

- ✓ Points blancs visibles (dans le cas de l'Ich).
- ✓ Lésions sur la peau ou les nageoires.
- ✓ Amaigrissement malgré une alimentation normale.
- ✓ Respiration rapide ou halètement en surface.
- ✓ Isolement, nage erratique, ou comportement anormal.[28]
- **Prévention et traitement**
 - ✓ Mise en quarantaine des nouveaux poissons avant introduction.
 - ✓ Maintenir une bonne hygiène et une eau propre.
 - ✓ Utilisation d'adaptateurs antiparasitaires (formol, sel, cuivre, etc.).
 - ✓ Système de surveillance de la santé des poissons.
 - ✓ Éliminer le stress et les changements d'environnement.[28]



Figure 8:Maladies parasitaires [18]

2.2.6. Maladies virales

▪ **Comment reconnaître et identifier la maladie**

La lymphocytose est une maladie virale qui provoque l'apparition de nodules ou de tumeurs bénignes sur la peau, les nageoires ou les branchies des poissons. Ces nodules, souvent de couleur rose à rouge, peuvent entraîner des difficultés respiratoires et un comportement anormal, comme la léthargie. Bien que la maladie n'affecte généralement pas l'appétit, elle peut causer des déformations visibles sur les poissons infectés. Il n'existe pas de traitement antiviral spécifique, mais il est essentiel d'isoler les poissons malades et de maintenir une bonne qualité de l'eau pour limiter la propagation du virus.[29]

- **Cause**

La maladie de la queue blanche (MTB) est une infection virale de la fosse qui provient des bassins d'eau, mais elle détecte également toutes les installations d'aquaculture. Il est possible qu'un virus soit proche des Nodaviridae de votre famille et détecte une masse musculaire très importante, non présente dans la file d'attente.[29]

- **Symptômes :**

- ✓ Blanchâtre réalisé de queue (région caudale).
- ✓ Nécrose musculaire visible sous la peau.
- ✓ Lenteur des mouvements, perte de coordination.
- ✓ Mort subite dans les cas graves.
- ✓ Faible taux de survie en larves ou en juvéniles.[30]

- **Prévention et traitement**

- ✓ Contrôle strict de la qualité de l'eau.
- ✓ Isolement et élimination des individus infectés.
- ✓ Renforcement des mesures de biosécurité dans les systèmes d'élevage.
- ✓ Désinfection régulière des équipements.
- ✓ Il n'y a pas d'antiviral spécifique disponible, essentiel : la prévention.[30]



Figure 9:Maladies virales [18]

2.3. L'apprentissage profond (Deep Learning)

2.3.1. Définition de l'apprentissage profond (Deep Learning)

L'apprentissage profond, une branche de l'apprentissage automatique et de l'intelligence artificielle, repose sur l'utilisation de réseaux de neurones artificiels à plusieurs couches pour analyser les données et élaborer des modèles informatiques. Il se distingue par sa capacité à apprendre directement à partir des données, ce qui lui a permis de résoudre efficacement de nombreux problèmes de classification et de régression. [31]

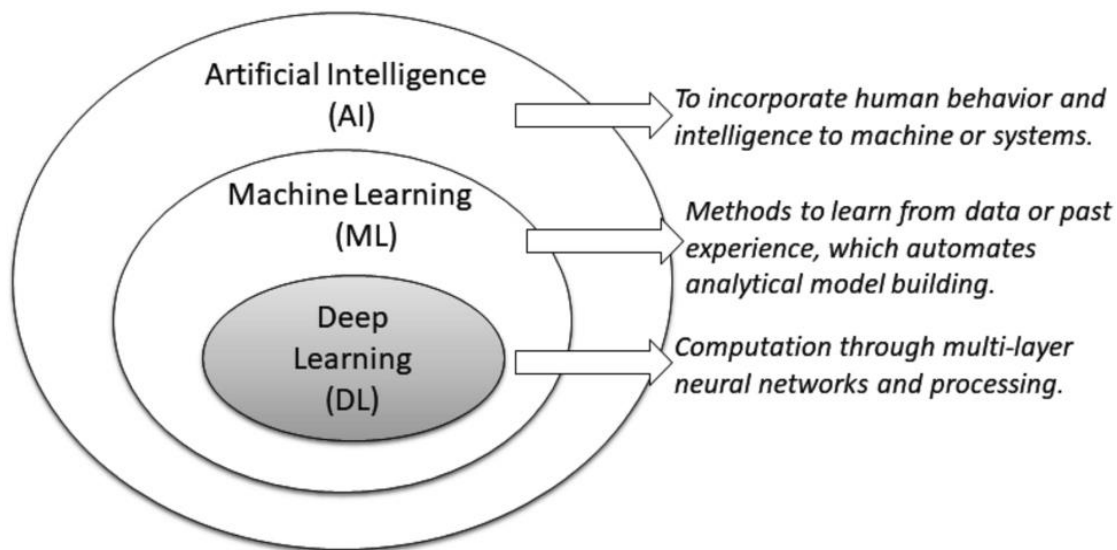


Figure 10: Hiérarchie de l'IA [32]

2.3.2. Modèles d'apprentissage profond

Réseaux de neurones convolutifs (CNN) : Convolutional Neural Networks

Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) sont une catégorie d'algorithmes d'apprentissage profond particulièrement adaptés au traitement d'images. Inspirés du système visuel humain, ils sont capables d'extraire automatiquement des caractéristiques pertinentes à partir de données visuelles telles que des images ou des vidéos. Un CNN traite une image en la faisant

passer à travers plusieurs couches successives, chacune ayant un rôle précis dans l'extraction des caractéristiques visuelles. Voici une description détaillée de ce processus.[33]

Couches convolutives (Convolutional Layers) :

Les couches convolutionnelles constituent l'élément central des réseaux neuronaux convolutifs. Elles utilisent des filtres (ou noyaux) appliqués à l'image d'entrée afin de repérer des motifs élémentaires tels que les contours ou les textures. En parcourant l'image, chaque filtre effectue une opération de convolution, générant ainsi une carte de caractéristiques. Cette étape permet de faire ressortir les éléments essentiels de l'image initiale. [34]

Couches de regroupement (Pooling Layers) :

Les couches de regroupement, également connues sous le nom de sous-échantillonnage, servent à réduire les dimensions des cartes de caractéristiques tout en préservant les informations les plus importantes. La technique la plus répandue est le **max pooling** (regroupement maximal), qui consiste à retenir la valeur la plus élevée dans chaque sous-région d'une carte de caractéristiques. Cette étape permet de diminuer la complexité computationnelle du modèle tout en améliorant sa robustesse face aux variations et aux déformations présentes dans les images.[35]

Couches entièrement connectées (Fully Connected Layers) :

Après avoir traversé plusieurs couches convolutionnelles et de regroupement, les cartes de caractéristiques sont transformées en un vecteur unidimensionnel (1D). Ce vecteur est ensuite transmis à des couches entièrement connectées (ou denses) en vue de la classification finale. Similaires à celles utilisées dans les réseaux de neurones classiques, ces couches permettent d'assembler les différentes caractéristiques extraites afin de prédire la classe à laquelle appartient l'image. [36]

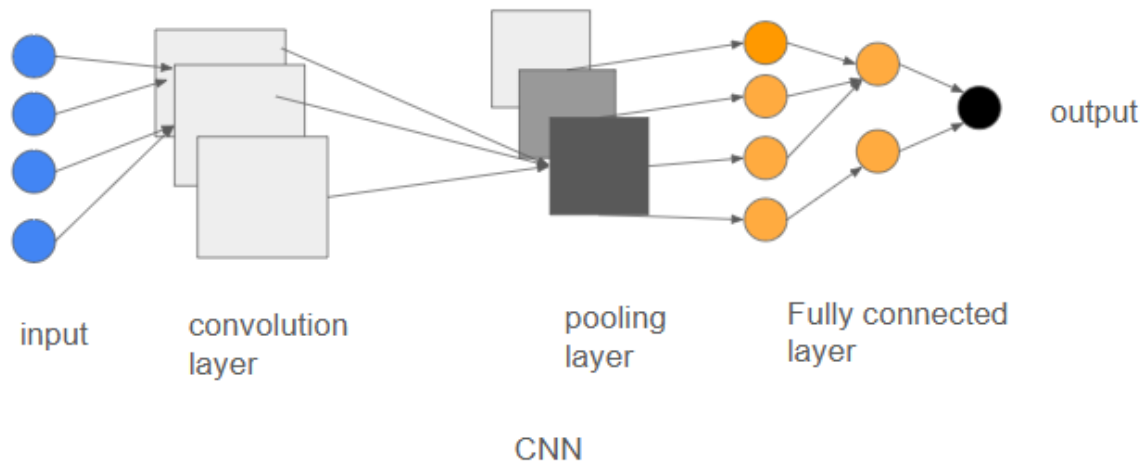


Figure 11: Architecture CNN

2.4. Travaux antérieurs

Nous avons développé un modèle de classification d'images basé sur l'apprentissage profond pour la détection automatique des maladies chez les poissons en aquaculture. Le projet s'est appuyé sur un jeu de données public intitulé « Freshwater Fish Disease Aquaculture in South Asia », contenant des images haute résolution classées selon plusieurs types de maladies. L'apprentissage par transfert a été appliqué en utilisant des modèles de réseaux de neurones convolutifs pré-entraînés tels que ResNet50 et VGG16, MobileNetV2, Alex Net permettant au système d'atteindre une précision de classification élevée. Le dataset de données a été structuré en ensembles d'entraînement et de test afin de garantir une évaluation fiable. Parmi les modèles testés, AlexNet a montré des performances supérieures avec une précision dépassant [Final Validation Accuracy : 100%], démontrant ainsi sa robustesse face à la variabilité visuelle entre les différentes classes de maladies. Cette étude met en évidence le potentiel de l'apprentissage profond et des réseaux de neurones convolutifs dans l'amélioration de la surveillance et du diagnostic des maladies en aquaculture, contribuant ainsi à la détection précoce et à la prévention.

Tableau 1 : Résumé des études récentes utilisant l'intelligence artificielle et l'IoT dans l'aquaculture.

Référence	Étude	Année	Applications	Algorithme utilisé	Sécurité	Utilisation d'IoT
[38]	MortCam: An Artificial Intelligence-aided fish mortality detection and alert system for recirculating aquaculture	2023	Suivi de la mortalité des poissons dans les systèmes aquacoles recirculants (RAS) pour améliorer la gestion de la production et le bien-être des poissons.	Modèle de détection de mortalité YOLOv7 (You Only Look Once version 7).	Le système génère des alertes par e-mail et SMS en cas d'événements de mortalité inhabituels, permettant une intervention rapide.	Intégration de capteurs et d'IoT pour le suivi en temps réel de la mortalité des poissons.
[39]	Predicting for disease resistance in aquaculture species using machine learning models	2021	Prédiction de la résistance aux maladies dans les espèces aquacoles à l'aide de modèles d'apprentissage automatique	Modèles de machine learning tels que Decision Trees (DT), Support Vector Machines (SVM), Random Forests (RF),	Non spécifiquement abordée dans l'article, mais la résistance aux maladies contribue à la durabilité de	Non mentionnée explicitement, mais les technologies de machine learning peuvent être intégrées dans des

				Adaptive Boosting (Adaboost), et Extreme Gradient Boosting (XGB).	l'aquaculture .	systèmes IoT pour le suivi des maladies.
[40]	Fish Disease Detection Using Image Based Machine Learning Technique in Aquaculture	2021	Détection des maladies chez les poissons, en particulier le saumon, à l'aide de techniques d'apprentissage automatique basées sur l'image.	Support Vector Machine (SVM) pour la classification des images de poissons.	La détection précoce des maladies contribue à la sécurité alimentaire en réduisant la propagation des infections.	Non mentionnée, mais l'intégration de l'IoT pourrait être envisagée pour le suivi en temps réel.
[41]	An overview of disruptive technologies for	2022	Présentation des technologies émergentes et disruptives dans	Non applicable, car il s'agit d'une revue des technologies plutôt que	Les technologies proposées visent à améliorer la durabilité et la rentabilité	Mention de l'IoT comme une technologie clé pour améliorer la

	aquaculture		l'aquaculture, y compris l'édition génomique, l'intelligence artificielle, et les systèmes aquacoles recirculants.	d'une étude expérimentale	de l'aquaculture, ce qui peut indirectement renforcer la sécurité alimentaire.	production aquacole.
[42]	FCL-IWQMS: Federated Continual Learning and IoT-Based Water Quality Monitoring System for Adaptive Real-Time Insights	2024	Système de surveillance de la qualité de l'eau en temps réel utilisant l'apprentissage fédéré et l'IoT.	Techniques d'apprentissage fédéré et d'apprentissage continu, y compris FedAvg, FedTM, AMU, PER, LWF, et EWC	Le système garantit la confidentialité des données en n'envoyant que des mises à jour de modèles locaux au serveur central.	Intégration de capteurs IoT pour la collecte de données sur la qualité de l'eau.

Ce tableau témoigne d'une synthèse de cinq travaux effectués sur l'application de l'intelligence artificielle (IA) et des technologies IoT (Internet of Things) en aquaculture. Dans l'ensemble, les travaux analysés portent sur des cas d'usage variés : détection de maladies des poissons, prévision de résistance aux maladies, surveillance de la qualité de

l'eau et analyse d'images pour détecter des maladies. Le tableau présente une analyse des algorithmes utilisés dans chaque étude, les mesures de sécurité, et s'il y a ou non intégration de capteurs IoT. Cette vue d'ensemble permet de témoigner des tendances actuelles de transformation numérique en aquaculture, l'importance croissante d'approches intelligentes et connectées pour une gestion durable et efficace des systèmes aquacoles.

Tableau 2 : Synthèse des approches technologiques appliquées à la détection, la classification et la surveillance des maladies en aquaculture.

Référence	Application	Description	Utilisation
[43]	Vision par ordinateur et traitement d'images (segmentation d'images, détection des contours, extraction de caractéristiques)	Article 2 : Cette technique consiste à partitionner une image en différentes régions afin d'améliorer l'identification des zones infectées. La segmentation en k-moyennes est une méthode courante pour cette opération. Objectif. _Des méthodes de détection des contours comme Canny, Prewitt et Sobel sont utilisées pour identifier les limites des images, ce qui est essentiel pour reconnaître les symptômes de maladies chez les poissons. _Des techniques telles que l'histogramme de gradient (HOG) et le test de	Appliqué dans diverses études, y compris celles mentionnées dans l'article. Discuté dans des travaux connexes, mais manquant de techniques spécifiques d'extraction de caractéristiques. Exploré dans des travaux connexes visant à améliorer la précision de la classification.

		segmentation accélérée (FAST) sont utilisées pour extraire les caractéristiques pertinentes des images à des fins de classification.	
[43] [44]	(Apprentissage automatique et modèles prédictifs (machine à vecteurs de support (SVM), comparaison de modèles, réglage des hyperparamètres)	Article 02 : Le SVM est utilisé pour classer les caractéristiques extraites afin d'identifier les poissons infectés. Il est reconnu pour sa grande précision dans les problèmes de classification binaire. Article 03 : L'étude compare les modèles ML à GBLUP-MCMC en termes d'efficacité de prédiction et de puissance de calcul. Les hyperparamètres des modèles ont été optimisés grâce à RandomizedSearchCV, garantissant ainsi des performances optimales.	L'article rapporte une précision de 91,42 % et 94,12 % avec et sans augmentation d'image, respectivement
[44] [45]	Intégration de l'IA et (Extreme Gradient Boosting (XGB), Support Vector Machines (SVM), Random Forest (RF))	Article 01 : Utilise un modèle YOLOv7 personnalisé pour une détection précise de la mortalité des poissons	_Entraîné sur des images annotées, il atteint une précision moyenne (mAP) de

		Article 03 : Les valeurs génétiques basées sur les données génomiques sont cruciales en aquaculture pour estimer les caractères de résistance aux maladies, car elles prennent en compte les caractères polygéniques influencés par plusieurs gènes. Cette approche améliore l'efficacité, la précision et la durabilité de la sélection, ce qui conduit à une amélioration de la résilience aux maladies et de la productivité globale. _ XGB est un modèle d'apprentissage automatique qui a démontré une grande performance dans la prédiction de la résistance aux maladies. Il est reconnu pour son efficacité et sa réduction des temps de calcul. Exigences par rapport à GBLUP _ RF est une méthode d'apprentissage d'ensemble qui combine plusieurs arbres	93,4 % pour la détection. _ Des modèles d'apprentissage automatique ont été utilisés pour évaluer son efficacité dans la prédiction de la résistance aux maladies. Il sert de référence pour la comparaison avec d'autres modèles. _ Dans l'étude, XGB s'est classé premier en termes de performances de modèle sur divers ensembles de données, démontrant un léger avantage sur GBLUPMCMC en termes de précision des prédictions _ Le SVM a fourni des prédictions proches de celles du XGB et du GBLUP-
--	--	--	--

		de décision pour améliorer la précision des prédictions. Elle est efficace en termes de temps de calcul et a été testée dans le contexte de la résistance aux maladies.	MCMC, ce qui témoigne de son potentiel comme modèle fiable pour la prédiction de la résistance aux maladies. _ L'étude a révélé que le RF fournissait des prédictions compétitives tout en étant très efficace, avec des calculs en environ 3 minutes. Cela en fait une option viable pour les études de sélection aquacole.
[46] [45]	Vision par ordinateur et traitement d'images	Article 01 : Inclut des images dans les alertes pour permettre à l'équipage de vérifier le nombre de décès. Article 02 : Cette technique consiste à partitionner une image en différentes régions afin d'améliorer l'identification des zones infectées. La segmentation	

		en K-moyennes est une méthode courante à cette fin. Des techniques telles que l'histogramme de gradient (HOG) et le test de segmentation accélérée (FAST) permettent d'extraire des caractéristiques pertinentes des images à des fins de classification.	
[47] [48]	Systèmes de surveillance et d'alerte en temps réel et diagnostic des maladies	Article 01 : Observation continue de la mortalité des poissons grâce à la capture d'images toutes les 15 minutes. _ Envoi de notifications par e-mail et SMS lorsque la mortalité dépasse un seuil défini. _ Enregistrement automatique des données de mortalité à des fins d'analyse et de prise de décision. _ Article 4 : Utilisation de techniques moléculaires sensibles pour identifier et caractériser les maladies virales.	Capture d'images pour détecter les poissons morts, fournissant des données opportunes pour les décisions de gestion. _ Déclenchement d'alertes pour informer le personnel des événements de mortalité inhabituels, permettant des réponses rapides. _ Fourniture de données historiques

		_ Compréhension de l'hôte et de la répartition géographique des agents pathogènes viraux grâce à une surveillance améliorée. Article 10 : Les données génomiques peuvent être utilisées pour surveiller la présence de <i>Pseudomonas plecoglossicida</i> dans les milieux aquatiques.	pour aider les gestionnaires d'élevage à anticiper les tendances et les problèmes futurs de mortalité. _ Mise en œuvre de méthodes de diagnostic avancées qui ont amélioré la compréhension de la répartition des maladies virales. _ Identification de porteurs jusqu'alors inconnus et constatation de l'endémie de certains virus dans certaines régions, comme le VSHV dans les océans Pacifique Nord et Atlantique Nord. _ Cela implique l'utilisation marqueurs génétiques pour suivre la prévalence
--	--	--	--

			de la bactérie dans les zones de pisciculture
[49] [50]	Comparaison de modèles et prédiction des maladies	Article 2 : L'article compare l'approche SVM proposée à d'autres méthodes, soulignant que les travaux antérieurs reposaient souvent uniquement sur le traitement d'images, sans systèmes intelligents. Article 3 : Valeurs génétiques basées sur des données génomiques. Cette approche est particulièrement utile en aquaculture pour estimer les caractères de résistance aux maladies, car elle prend en compte les caractères polygéniques.	Cette comparaison souligne la nouveauté et l'efficacité de la méthode proposée : des modèles d'apprentissage automatique permettent d'évaluer son efficacité à prédire la résistance aux maladies. Elle sert de référence pour la comparaison avec d'autres modèles.
[51] [52]	Développement de vaccins et stratégies de traitement	Article 5 : La compréhension du génome peut permettre d'identifier des cibles vaccinales potentielles contre la bactérie. Article 8 : Bloquer l'expression de gènes	T Ses travaux cohérents à analyser les gènes afin d'identifier ceux susceptibles de déclencher une réponse immunitaire chez les poissons. _ Proposer une méthode pour

		spécifiques grâce à l'ARN antisens, contrôlant potentiellement la virulence de l'agent pathogène. Article 4 : Un petit nombre de poissons sont d'abord placés dans un bain médicamenteux. Article 8 : Le génome apporte des informations sur les mécanismes de résistance aux antibiotiques chez <i>Pseudomonas plecoglossicida</i>.	manipuler l'expression génétique des agents pathogènes, contribuant ainsi à la lutte contre les maladies. _ Cela permet d'observer leur réaction au médicament avant d'introduire la population principale. _ Les chercheurs peuvent étudier les gènes identifiés pour développer des stratégies de lutte contre la résistance.
[53]	Gestion de l'aquaculture et biosécurité	Article 6 : Utilise des techniques de traitement d'images pour mesurer avec précision le poids et la longueur des poissons. _ Implique la classification et le comptage des poissons par analyse d'images pour surveiller les populations. _ Utilise des méthodes d'imagerie avancées pour détecter, suivre et identifier les poissons dans divers environnements. _ Se concentre sur l'identification et le diagnostic des maladies des poissons par	Améliore l'efficacité de l'aquaculture en fournissant des mesures précises pour le suivi de la croissance.

		l'analyse d'images et l'extraction de caractéristiques.	
[54] [55]	Biotechnologies avancées et détection intelligente	Article 9 : Identifie les antigènes essentiels à la survie des agents pathogènes chez l'hôte, contribuant ainsi au développement de vaccins. Article 10 : Une technologie utilisant des nanoparticules magnétiques recouvertes d'anticorps pour détecter de faibles concentrations d'agents pathogènes. Utilise des matériaux de 0,1 à 100 nanomètres, présentant des propriétés uniques par rapport aux matériaux plus grands.	_ Soutient les pratiques aquacoles durables en garantissant des évaluations précises des populations.
[56] [57]	Durabilité et adaptation au climat	_ Article 6 : Évaluation du potentiel d'émergence de maladies à mesure que l'aquaculture se développe face au changement climatique. _ Article 7 : Renforcer les capacités humaines pour un diagnostic et une gestion efficace des maladies des poissons.	Recherches sur l'influence du changement climatique sur la prévalence et les types de maladies virales affectant les animaux aquatiques _ Les initiatives sous-régionales peuvent contribuer à réduire les coûts de gestion.

Le tableau ci-joint propose une synthèse des technologies principales mobilisées dans la recherche sur la détection et la prise en charge de pathologies en aquaculture. Chaque ligne porte sur une référence scientifique citée dans le mémoire, répartie selon un type d'application technologique : vision artificielle, machine learning, IA, systèmes de monitoring, biotechnologies, ou analyse comparative de modèles. Les informations renseignées sont :

- L'application typique (ex : détection d'images, diagnostic prédictif, alerte automatisée)
- Une description des techniques et outils utilisés (ex : SVM, YOLOv7, k-moyennes, HOG, FAST, etc.)
- L'application concrète dans les études (résultats atteints, méthodes mises en regard, performances évaluées).

Ce tableau est indispensable pour appréhender la diversité des approches expérimentées, leurs efficacités respectives et leurs contributions potentielles à l'optimisation des systèmes aquacoles intelligents. Il permet également d'appréhender quelles technologies pourraient être les plus prometteuses pour une intégration future dans des solutions de gestion des maladies aquacoles pratiques et durables.

Tableau 3 : Présentation des principaux jeux de données utilisés pour la détection des maladies des poissons en aquaculture

Dataset Format	Dataset Purpose	Source	Link	Camera used
.png	Fish Disease Dataset	Kaggle	https://www.kaggle.com/datasets/alaamahmoud2010/fish-disease/data [58]	
.jpg .png .jpeg .csv	Freshwater Fish Disease Aquaculture in south asia	Kaggle	https://www.kaggle.com/datasets/subirbiswas19/freshwater-fish-disease-aquaculture-in-south-asia/data [59]	
.png	SalmonScan: A Novel Image Dataset for Machine Learning and Deep Learning Analysis in Fish Disease Detection in Aquaculture	Mendeley Data	https://data.mendeley.com/datasets/x3fz2nfm4w/3 [60]	
.jpg. json	Fish disease detection	Universe	https://universe.roboflow.com/iot-uiah0/fish-disease-detection-n4fho/dataset/2 [61]	Raspberry Pi camera
.jpg. json	seg Computer Vision Project	Universe	https://universe.roboflow.com/smarttech/seg-hevpd [62]	

.jpg .csv	Classification Computer Vision Project	Universe	https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/classification-vfybf/dataset/2 [63]	
.jpg .csv	fish Computer Vision Project	Universe	https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/fish-av5bm [64]	Raspberry Pi camera
.jpg .csv	finspy Computer Vision Project	Universe	https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/finspy/dataset/1 [65]	Raspberry Pi camera

Cette table indique les jeux de données (datasets) les plus couramment utilisés en recherche pour la détection automatique de maladies. Chaque ligne précise :

- Le format du jeu de données (formats des fichiers : .jpg, .png, .csv...)
- Le principal objectif du dataset (ex. : classification d'images de poissons malades, diagnostic par vision par ordinateur...)
- La source de publication (plateformes comme Kaggle, Mendeley Data, Universe...)
- Le lien vers le dataset, direct cette fois, pour aider au téléchargement ou à l'exploration
- Le type de caméra utilisée lorsque cela est précisé (ex. : Raspberry Pi Camera...)

Ces datasets sont utilisés comme base pour entraîner, valider, puis comparer des modèles deep learning tels qu'AlexNet, ResNet, ou MobileNet, mais aussi pour simuler des scénarios de mise en élevage piscicole, en utilisant des images collectées en conditions variées, et annotées avec les maladies observées. Le fait d'utiliser plusieurs formats d'image permet en outre de tester la robustesse et la généralisabilité des modèles.

2.5. Conclusion

Pour conclure, le deep learning représente un véritable levier d'optimisation du diagnostic et de la détection des maladies chez les poissons d'élevage aquacole. Dans ce chapitre nous avons présenté les fondamentaux de l'apprentissage profond, décrit les maladies les plus fréquentes chez le poisson, et discuté plusieurs travaux antérieurs sur le sujet. En s'intéressant aux différentes approches de deep learning utilisées pour le diagnostic des maladies chez les poissons, nous avons pu montrer leur capacité non seulement à améliorer la précision du diagnostic, mais aussi permettre une identification précoce des infections, mais aussi une gestion optimale des traitements. Le secteur de l'aquaculture, de par la technologie évolutive et l'accessibilité croissante des techniques de l'intelligence artificielle, va devenir de toute évidence de plus en plus tributaire de leur intégration dans le processus de prise en charge de la santé des poissons et, partant, de la productivité des systèmes de production aquacole.

Chapitre 03 : Implémentation et Résultats

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une description détaillée de la mise en œuvre pratique des modèles de deep learning appliqués à la classification des maladies des poissons. Il met l'accent sur la configuration de l'environnement de développement, les architectures de réseaux neuronaux profondes utilisées (telles que ResNet et VGG...etc.), le jeu de données d'images collecté en aquaculture, ainsi que les techniques de prétraitement appliquées aux images. L'objectif de ce chapitre est de clarifier les méthodologies adoptées tout au long du projet et de présenter les résultats expérimentaux obtenus, illustrant ainsi l'efficacité des approches choisies pour améliorer le diagnostic des maladies des poissons.

3.2 Outils de développement

Dans ce chapitre, nous exposerons de manière synthétique les modalités de mise en œuvre pratique des modèles de deep learning à la classification des maladies des poissons. Nous discuterons principalement de la configuration de l'environnement de développement, de la définition des architectures de réseaux neuronaux profonds (ResNet et VGG notamment), du jeu de données d'images collecté en aquaculture, et des modalités de prétraitement appliquées sur les images. Ce chapitre va permettre d'opérer une clarification des méthodologies choisies et mises en œuvre tout au long du projet ainsi qu'une présentation des résultats expérimentaux obtenus qui attesteront de l'efficacité des approches de deep learning adoptées pour le diagnostic des maladies des poissons.

3.3 Environnement logiciel (Software)

3.1. Dataset (ensembles de données)

Les datasets peuvent être représentés sous différents types, que ce soient des tableaux, des graphes, des arbres ou autres. On travaille souvent avec des structures de tableaux dans les algorithmes de machine Learning. Chaque valeur présente dans un dataset est associée à un attribut et à une observation.[66]

L'ensemble de données qui a servi à ce projet est un ensemble d'images de poissons, et qui sont classées par différentes étiquettes de maladies aquacoles, structurellement constitué de dossiers d'apprentissage et de validation afin d'entraîner et d'évaluer un modèle de classification par réseaux de neurones convolutifs.[67] ,Ilya sept class : Bacterial Red disease, Bacterial diseases Aeromoniasis, Bacterial gill disease, Fungal diseases Saprolegniasis,Healthy Fish,Parasitic diseases, Viral diseases White tail disease

3.2. Anaconda Navigator

Anaconda Navigator est une interface graphique (GUI) pour ordinateur de bureau, faisant partie de la distribution Anaconda (voir la Figure12). Elle permet de lancer des applications et de gérer les paquets Conda, les environnements et les canaux, sans avoir besoin d'utiliser des commandes en ligne de commande (CLI). Anaconda Navigator est disponible pour Windows, macOS et Linux.



Figure 12: Distribution Python orientée science des données, apprentissage automatique

3.3. Jupiter Notebook

Jupyter Notebook (voir la Figure13) est présenté comme un exemple d'environnement de développement intégré (IDE) qui n'est pas proposé de manière autonome. Il s'agit d'une application web open-source lancée en 2015, initialement sous le nom d'IPython Notebook. Jupyter Notebook est non seulement un environnement de calcul interactif, mais aussi une plateforme de codage qui permet aux développeurs de présenter leur travail et de

collaborer avec d'autres membres de projet. Le nom Jupyter est un jeu de mots basé sur Julia, Python et R, bien que l'application ne soit pas limitée à ces langages. L'environnement Jupyter Notebook prend en charge plus de 50 langages de programmation et permet de créer des documents interactifs appelés notebooks, qui peuvent contenir du code informatique, des commentaires, des équations mathématiques, des graphiques et du contenu multimédia.[69]



Figure 13: Jupyter notebook [69]

3.4. Google Colab

Google Colab est une plateforme gratuite fournie par Google qui vous permet d'écrire, d'exécuter et de partager du code Python dans un environnement cloud avec des ressources puissantes telles que des GPU et des TPU, ce qui est parfait pour l'apprentissage automatique et la science des données.[70]

3.5. Outils et cadres

Dans le domaine en constante évolution de l'apprentissage profond, des outils et des cadres spécialisés sont essentiels au développement et à l'amélioration des modèles. Cette section présente les composants clés utilisés dans ce domaine.

4.1. Bibliothèques

- **Numpy** : La bibliothèque open-source NumPy est un outil incontournable de la programmation scientifique en Python. Elle est principalement utilisée pour : Le calcul numérique, les calculs mathématiques de façon rapide, La manipulation des tableaux multidimensionnels (ndarray), La base de différentes bibliothèques comme Pandas, TensorFlow, PyTorch, scikit-learn, etc.[71]
- **Pandas** : Pandas est une bibliothèque open-source développée en Python pour la gestion, l'analyse et le nettoyage des données. Elle est largement utilisée dans le cadre des applications de data science, d'analyses statistiques et d'apprentissage automatique.[72]
- **OS** : La bibliothèque os est une bibliothèque standard de Python qui permet d'interagir avec le système d'exploitation. Elle est utile pour :
 - ✓ Gérer les fichiers et dossiers (lecture, écriture, suppression...)
 - ✓ Accéder à des informations système.[73]
- **PyTorch** : PyTorch est un autre framework open-source populaire pour l'apprentissage profond, développé par le laboratoire de recherche en intelligence artificielle de Facebook (FAIR – *Facebook AI Research*). Il met l'accent sur les graphes de calcul dynamiques, ce que les chercheurs et les praticiens apprécient pour leur flexibilité dans la personnalisation des composants des réseaux de neurones. PyTorch est largement utilisé dans les domaines du traitement du langage naturel (NLP) et de la vision par ordinateur.[74]

3.6. Modèles d'apprentissage profond utilisés

Pour évaluer l'efficacité de différents modèles d'apprentissage profond, nous avons implémenté quatre architectures bien connues : AlexNet, MobileNet, VGGNet et ResNet.

3.6.1. AlexNet

AlexNet est une architecture de réseau de neurones convolutif (CNN) introduite par Alex Krizhevsky et ses collègues en 2012

Il a gagné le ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC) en 2012 AlexNet est constitué de 5 couches convolutionnelles et 3 couches entièrement connectées il utilise notamment la normalisation de réponse locale (local réponse normalisation) et le dropout pour obtenir de meilleures performances et éviter le surapprentissage (overfitting)[75] [76]

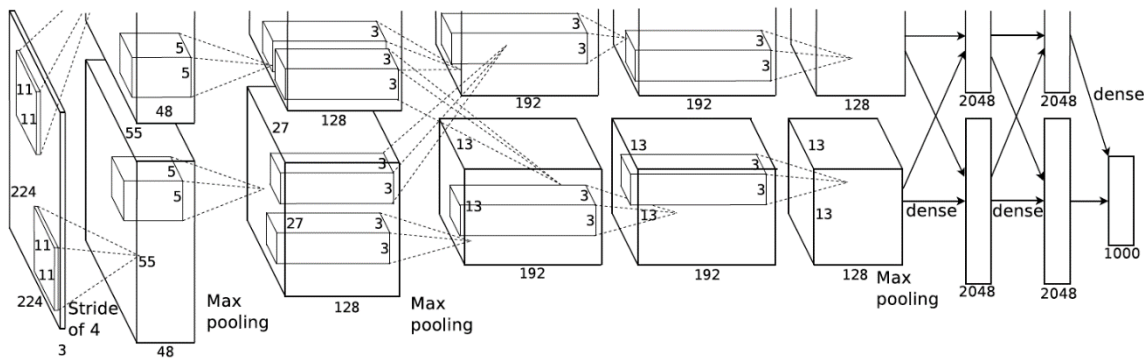


Figure 14:Architecture AlexNet [76]

3.6.2. VGGNet

VGGNet, proposée par Simonyan et Zisserman en 2014, est reconnue pour sa simplicité et son efficacité, L'architecture se compose de plusieurs couches convolutionnelles empilées de taille 3x3, suivies de couches entièrement connectées. VGGNet existe en plusieurs variantes, telles que VGG16 et VGG19, qui indiquent le nombre total de couches avec des poids (paramètres entraînaables) dans le réseau.[77] [78]

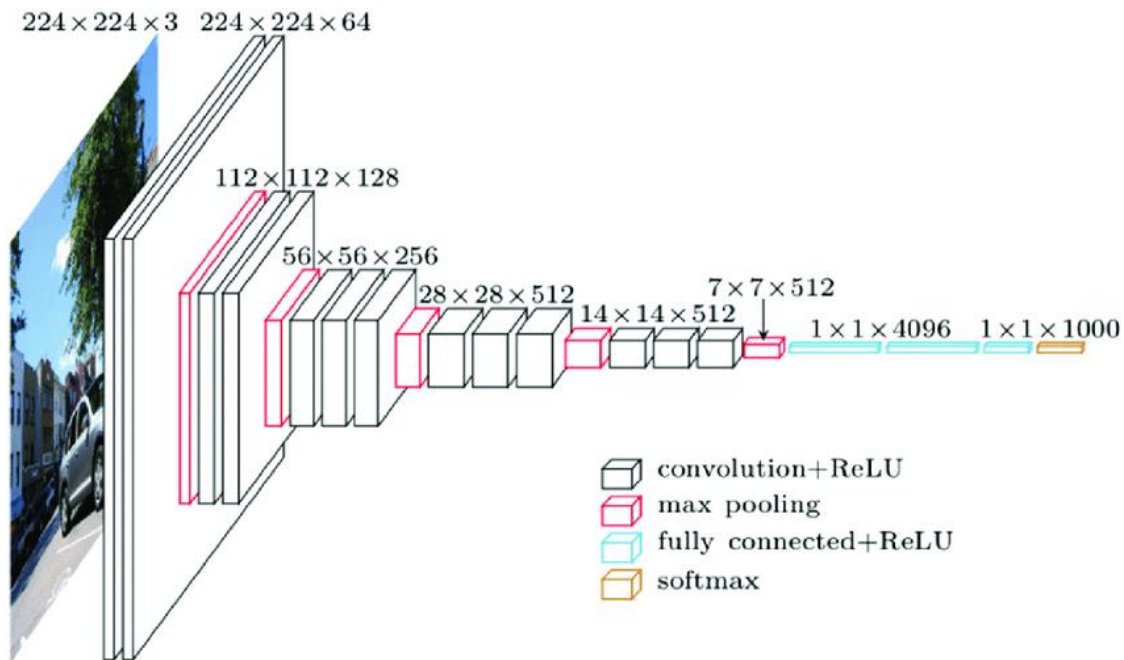


Figure 15:Architecture VGGNet [78]

3.6.3. ResNet (Residual Network)

ResNet, introduite par Kaiming He et ses collègues en 2015, est une architecture de réseau de neurones convolutif (CNN) qui intègre des "blocs résiduels", permettant à l'information de circuler via des connexions directes entre les couches. Cette approche permet de résoudre le problème de dégradation du gradient dans les réseaux très profonds, ce qui rend possible l'entraînement de réseaux beaucoup plus profonds sans perte de précision.[79] [80]

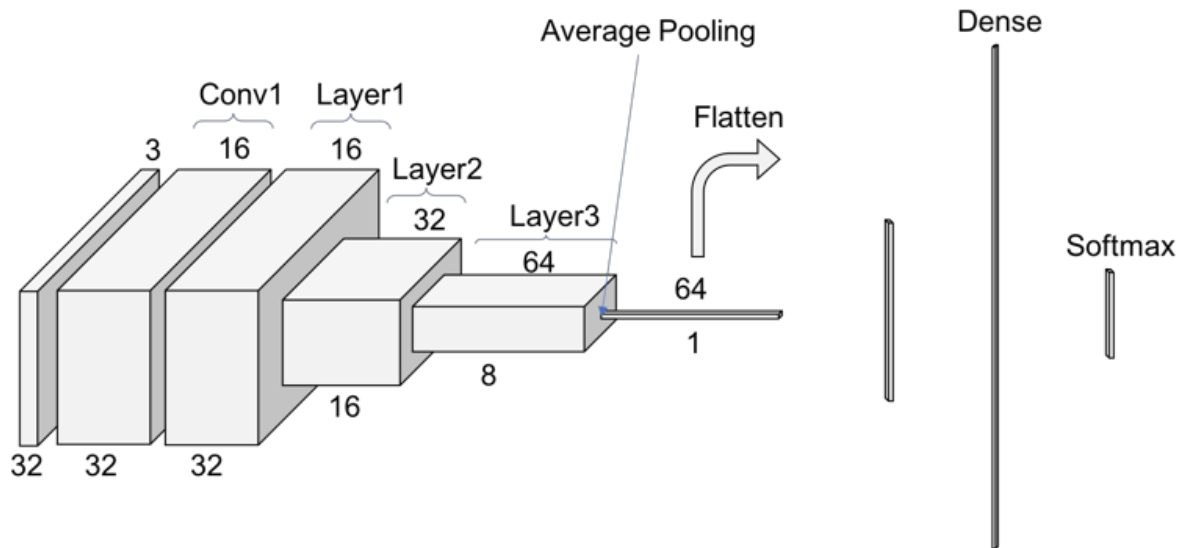


Figure 16:Architecture ResNet [80]

3.5.4. MobileNet

MobileNet est un réseau neuronal développé par Google en 2017, conçu pour fonctionner de manière efficace sur les appareils mobiles et embarqués. Il utilise une technique appelée convolutions séparables en profondeur (depthwise separable convolutions), qui divise le processus de convolution standard en deux étapes plus simples : la première traite chaque canal séparément, et la seconde combine les résultats. Cette approche réduit considérablement le nombre de calculs nécessaires, ce qui rend MobileNet plus rapide et moins énergivore que les réseaux neuronaux traditionnels. De plus, MobileNet peut être personnalisé en ajustant les paramètres de largeur et de résolution, ce qui permet de trouver un bon compromis entre précision et vitesse selon les besoins spécifiques d'une application [81]. [82]

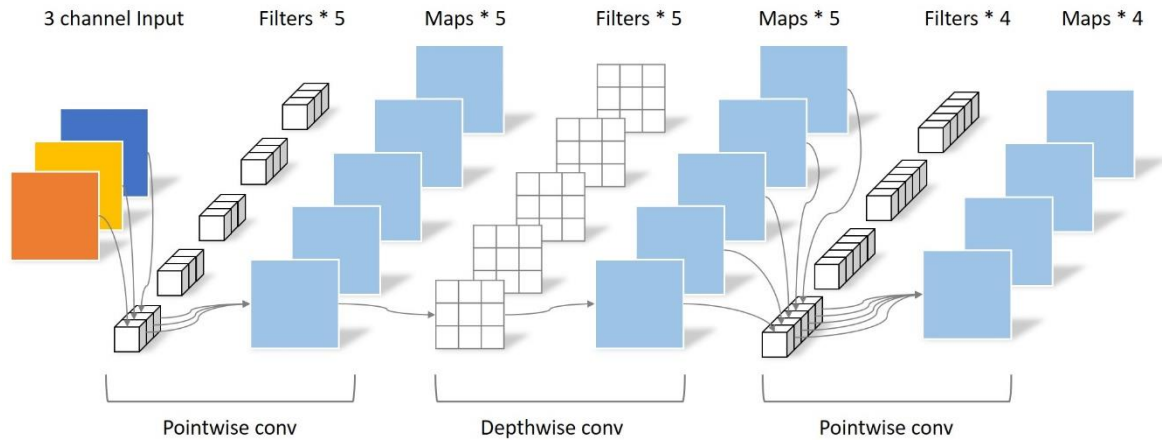


Figure 17: Architecture MobileNet [81]

3.7. Dataset utilisé

Dataset utilisé dans le cadre de ce projet est précisément « Freshwater Fish Disease Aquaculture in South Asia ». Il a été conçu pour la classification des maladies des poissons d'eau douce à partir des images dans un contexte aquicole. Ce dataset est constitué de : - Un dossier Train/ dans lequel se trouvent des sous-dossiers, chaque sous-dossier ayant une catégorie de maladie correspondante. Ces sous-dossiers contiennent plusieurs images annotées. - Un dossier Test/ dont la fonction est d'évaluer les performances du modèle entraîné. - Un fichier Train.csv dans lequel se trouvent probablement les noms des images et les étiquettes associées (label), qui permettent de proposer une lecture structurée de l'information. La particularité de ces images est d'avoir été recueillies à partir d'environnements réels d'élevage de poissons et de contenir des signes cliniques visibles permettant l'identification des maladies. Du coup, ce dataset constitue la base d'entraînement et d'évaluation des modèles de deep learning dédiés à la détection automatique des maladies aquicoles.[59]

Le dataset comprend 7 classes différentes :

1. Bacterial Red disease
2. Bacterial diseases - Aeromoniasis
3. Bacterial gill disease
4. Fungal diseases - Saprolegniasis

5. Healthy Fish
6. Parasitic diseases
7. Viral diseases - White tail disease



Figure 19:Healthy Fish[18]



Figure 18:Bacterial Red disease[18]

3.8. Prétraitement des données (Data Preprocessing)

3.8.1. L'augmentation des données (Data augmentation)

L'augmentation des données est une technique d'apprentissage automatique et d'apprentissage profond utilisée pour augmenter la diversité et la taille d'un ensemble de données de formation en créant des versions modifiées d'échantillons de données existants. Cela est réalisé grâce à des transformations telles que la rotation, la translation, le retournement, le zoom et l'ajout de bruit. L'augmentation des données contribue à améliorer la capacité de généralisation des modèles, les rendant plus robustes aux variations de données et réduisant le risque de surajustement en permettant au modèle d'apprendre à partir d'un ensemble plus varié d'exemples de formation.[83]

3.8.2. Redimensionnement de l'image (Image Resizing)

Le redimensionnement d'image est une étape fondamentale dans le prétraitement d'images pouvant être effectuée pour ajuster les dimensions d'une image de façon à ce qu'elles conviennent à la taille d'entrée exigée par le réseau de neurones. Ce redimensionnement est réalisé notamment en préservant la qualité de l'image sans distorsion, en préservant le rapport d'aspect ou en utilisant différentes techniques d'interpolation comme le plus proche voisin. Le redimensionnement permet la standardisation des dimensions des images en entrée qui contribue au bon fonctionnement des processus d'entraînement et d'inférence du modèle qui reconnaît et apprend à partir des images d'entraîner. Cette étape cruciale permet d'atteindre des performances cohérentes et robustes dans les tâches comme la classification d'images, la détection d'objets et la segmentation.[84]

```

train_transforms = transforms.Compose([
    transforms.Resize((224, 224)),
    transforms.RandomRotation(20),
    transforms.RandomHorizontalFlip(),
    transforms.RandomResizedCrop(224, scale=(0.8, 1.0)),
    transforms.ToTensor(),
    transforms.Normalize([0.485, 0.456, 0.406], [0.229, 0.224, 0.225])
])

```

Figure 20: Data augmentation, Image Resizing

3.8.3. Les métriques de performance :

L'exactitude (Accuracy), la précision (precision), le rappel (recall) et le score F1 sont les quatre indicateurs de performance de validation les plus couramment utilisés pour évaluer la performance des modèles. Ils sont calculés comme suit :

L'exactitude : La proportion des catégories corrigées des échantillons est rapportée par rapport à l'ensemble des échantillons au sens du test.

Équation 1 :

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)}$$

Précision : indique le pourcentage d'échantillons correctement classés pour tous les TP et FP dans l'ensemble de tests.

Équation 2

$$Precision = \frac{(TP)}{(TP + FP)}$$

Rappel : indique le rapport entre les échantillons TP et le nombre total d'échantillons TP et FN

Équation 3 :

$$Recall = \frac{(TP)}{(TP + FN)}$$

Score F1 : indique la moyenne harmonique entre la précision et le rappel.

Équation 4 :

$$F1 - score = \frac{(2 * TP)}{(2 * TP + FP + FN)}$$

TP (vrais positifs) : représente le nombre d'échantillons anormaux correctement classés comme exacerbation (détection correcte).

FP (Faux positif) : représente le nombre d'échantillons normaux classés à tort comme maladie (détection incorrecte).

TN (Vrai négatif) : représente le nombre d'échantillons normaux mal classés (détection correcte).

FN (Faux négatif) : représente le nombre d'échantillons anormaux classés à tort comme maladie (détection incorrecte).

3.9. Résultats :

Dans cette étude, on a comparé les performances de plusieurs modèles d'apprentissage profond (AlexNet, ResNet, MobileNet et VGG16) afin d'identifier les maladies de poissons d'eau douce en utilisant le jeu de données « Freshwater Fish Disease Aquaculture in South Asia ». Les expérimentations ont été menées sur ce jeu de données disponible sur Kaggle (<https://www.kaggle.com/datasets/subirbiswas19/freshwater-fish-disease-aquaculture-in-south-asia>).

Les résultats mettent en valeur la pertinence de certains modèles, notamment AlexNet, en termes de précision de détection des maladies.

3.9.1. ResNet

La figure 21 montre comment les performances du modèle de classification des maladies des poissons ont évolué au cours des 50 époques d'entraînement. Au cours de la première époque,

la valeur de la perte d'entraînement (Train Loss) était relativement élevée, à 1.8226, avec une précision faible suggérant que le modèle ne savait pas reconnaître correctement les motifs caractéristiques attendus de la maladie, à 29.94%. En validation, la perte (Validation Loss) atteignait 1.6432 pour une précision à 34.86%. Ces premiers résultats montrent que le modèle est encore en phase d'apprentissage. À la fin de l'entraînement, le modèle a montré une amélioration des performances. À chaque époque, les valeurs de la perte sont passées au fur et à mesure des enregistrements de l'entraînement puis de la validation à des valeurs de plus en plus faibles et celles de la précision à des valeurs de plus en plus précises. En effet, à l'issue de l'entraînement, le modèle a atteint une précision sur l'ensemble d'entraînement de 79.49% et sur l'ensemble de validation de 86.86%, montrant que le modèle a appris à généraliser à de nouvelles données. Pour les métriques, le modèle affiche enfin une précision globale (Accuracy) de 76.29%, précision positive (Precision) de 76.57% et rappel (Recall) de 76.29%, score F1 (F1 Score) moyen de 76.07%, traduisant ainsi un bon équilibre de performances du modèle en conservant une interprétabilité de prévision de bon niveau confirma ce que l'on observe alors que la précision de la détection des poissons malades est plus en faveur de la précision que de la sensibilité.

Final Validation Accuracy : 0.8686

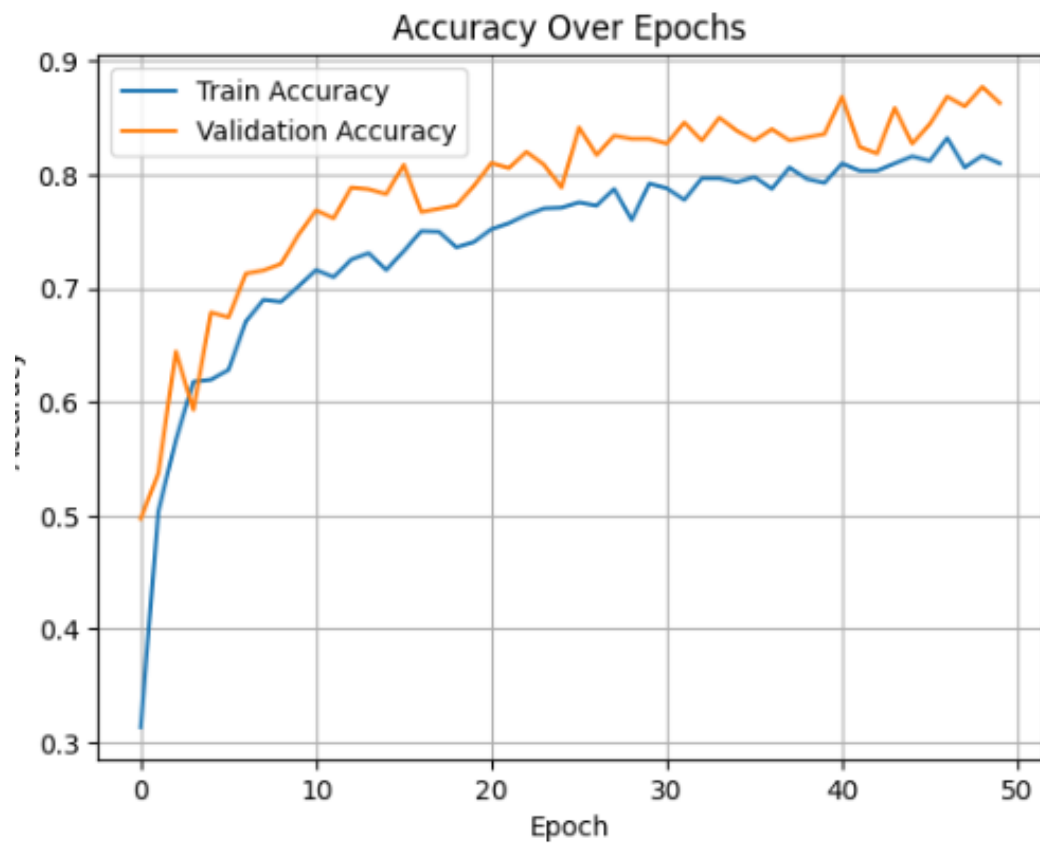


Figure 21:ResNet Accuracy

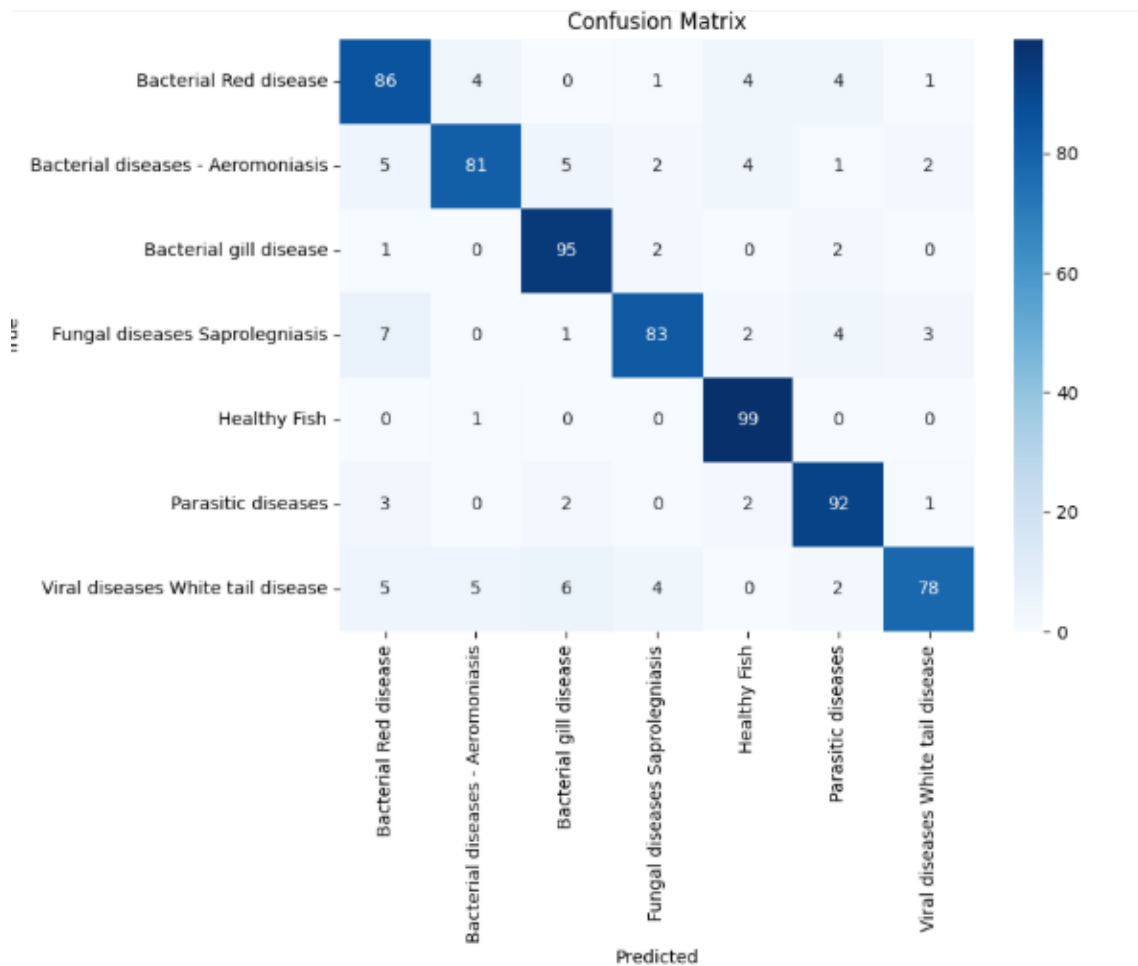


Figure 22 : matrice de confusion

La figure 22 montre L'analyse de performance est effectuée avec la matrice de confusion, à travers laquelle on peut évaluer un modèle de classification d'images, sur des données de validation. Dans un premier temps, le modèle est mis en mode évaluation (`model.eval()`) afin de désactiver certaines fonctionnalités comme le Dropout. En ce qui concerne les données de validation, celles-ci sont soumises au modèle tout en ne mettant pas les poids à jour en raison de `torch.no_grad()`. Ainsi, la prédiction (`preds`) effectuée par le modèle sera comparée aux vraies étiquettes (`labels`). Les prédictions et étiquettes sont alors récupérées pour produire, par

le biais de `classification_report`, le rapport de classification correspondant, qui fournit des informations portant notamment sur la précision (`precision`), le rappel (`recall`) et le score F1 pour chaque classe. Une matrice de confusion (`confusion_matrix`) est également créée afin de visualiser la performance du modèle dans sa capacité à distinguer les différentes classes, et celle-ci est représentée sous forme de carte thermique à l'aide de la bibliothèque Seaborn. L'ensemble de ces résultats permet de mieux saisir dans le détail, les capacités du modèle tout comme ses points forts et ses points faibles.

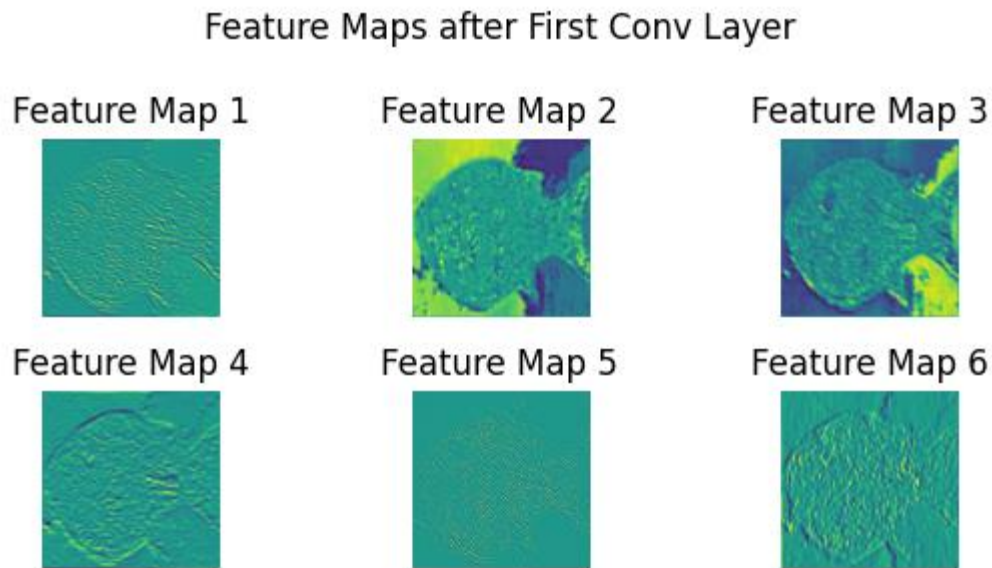


Figure 23: Feature maps after first conv layer

La figure 23 montre Cartes des caractéristiques (Feature maps) présent permet d'analyser et de visualiser les cartes d'activation (ou feature maps) de la première couche de convolution de ResNet, après traitement d'une image dans le jeu de validation, choisi dans `val_dataset`, puis transformée dans un format adéquat au modèle (transformations successives : redimensionnement, conversion en tenseur et normalisation avec les statistiques d'ImageNet). L'image, transformée, est ensuite uniquement introduite dans la première couche conv1 du

modèle, sans passer par le reste du réseau. Les cartes d'activation sont celles correspondant aux premiers motifs détectés par le modèle (bords, textures simples, etc.). Ces cartes sont converties en tableau NumPy pour permettre leur affichage. Puis, les six premières cartes sont visualisées sous forme d'images avec matplotlib, ce qui permet ainsi d'approcher la compréhension de la manière dont le modèle perçoit l'image dès ses premières étapes de transformation.

3.8.2. AlexNet

La figure 24 montre les graphiques présentés ci-dessus permettent de visualiser l'évolution de la performance du modèle AlexNet dans la tâche de classification des maladies des poissons à travers les différentes époques d'entraînement d'une part, et d'autre part, de comparer les précisions d'entraînement et de validation. Au départ, on note que la précision d'entraînement est d'environ 54,86% puis augmente rapidement au fur et à mesure des époques pour atteindre 98,45 % à la fin de l'entraînement alors que la précision de validation (Validation Accuracy) est stabilisée dès l'époque 25 du modèle à 0,9986, ce qui indique un bon comportement du modèle. Petit à petit, il est noté de légères variations dans la précision de validation qui paraissent cependant ne pas affecter la tendance générale montant que le modèle est capable de généraliser correctement et de bien performer sur des données inconnues durant l'entraînement ; ce qui est renforcé par le fait que les courbes de précision de validation et d'apprentissage se correspondent en indiquant que AlexNet a évité le sur-apprentissage (Overfitting) en atteignant ainsi un score de précision très élevé dans la classification des maladies des poissons.

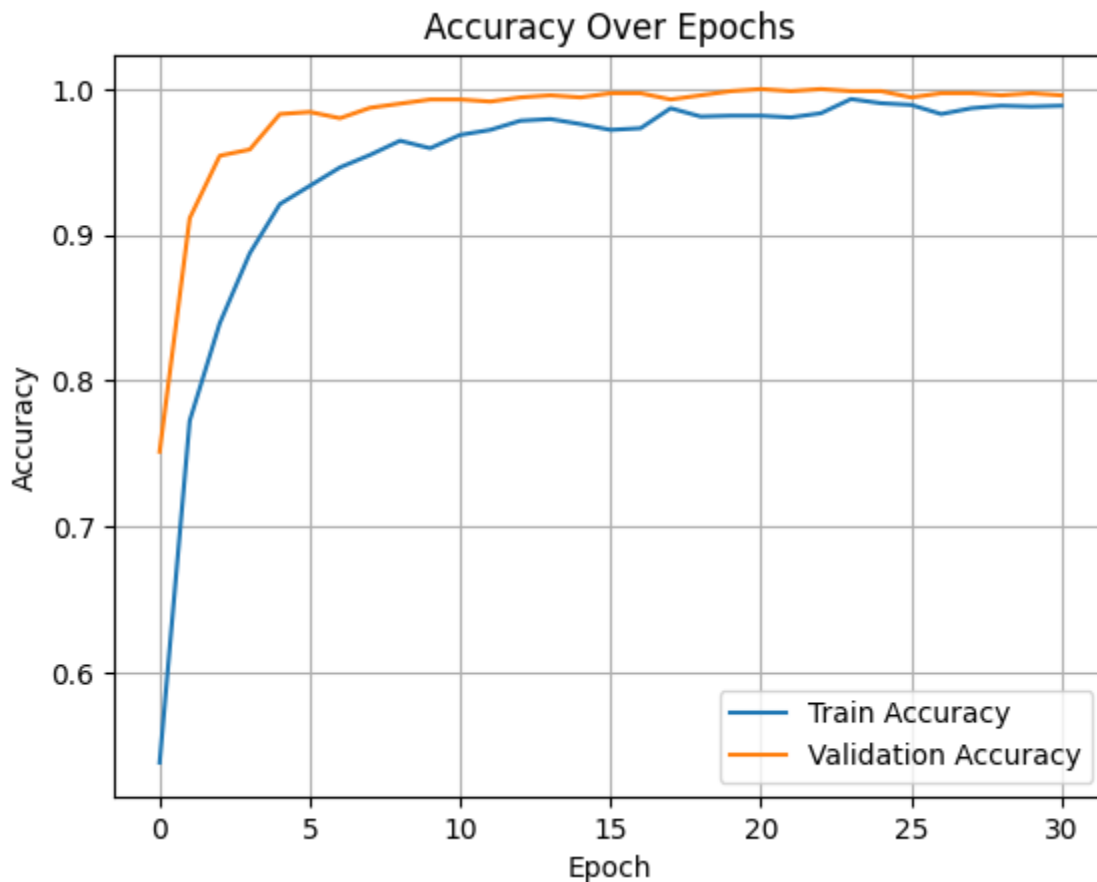


Figure 24: AlexNet Accuracy

La figure 25 montre les résultats de la classification fournis dans le rapport, montrant que le modèle AlexNet a permis d'obtenir de très bonnes performances sur la classification des maladies des poissons de certaines catégories. Dans l'analyse des autres mesures importantes (Precision, Recall, F1-Score) pour chaque classe (par exemple, les maladies bactériennes, fongiques, parasitaires et virales ainsi que les poissons sains), on remarque que toutes les classes ont été correctement classées avec très grande précision. Les classes Bacterial gill disease, Fungal diseases Saprolegniasis et Healthy Fish ont obtenu des valeurs de 1.00 pour les mesures Precision, Recall et F1-Score, elles sont donc parfaitement classées. Le modèle a des valeurs de 1. dans la mesure de Precision sur l'ensemble de validation, ce qui signifie qu'il a parfaitement classé toutes les instances. Grâce à ces résultats, on peut conclure que le modèle

est capable de bien généraliser sur les nouvelles données, sans sur-apprentissage (Overfitting), donc il peut être utilisé convenablement pour la classification des maladies des poissons.

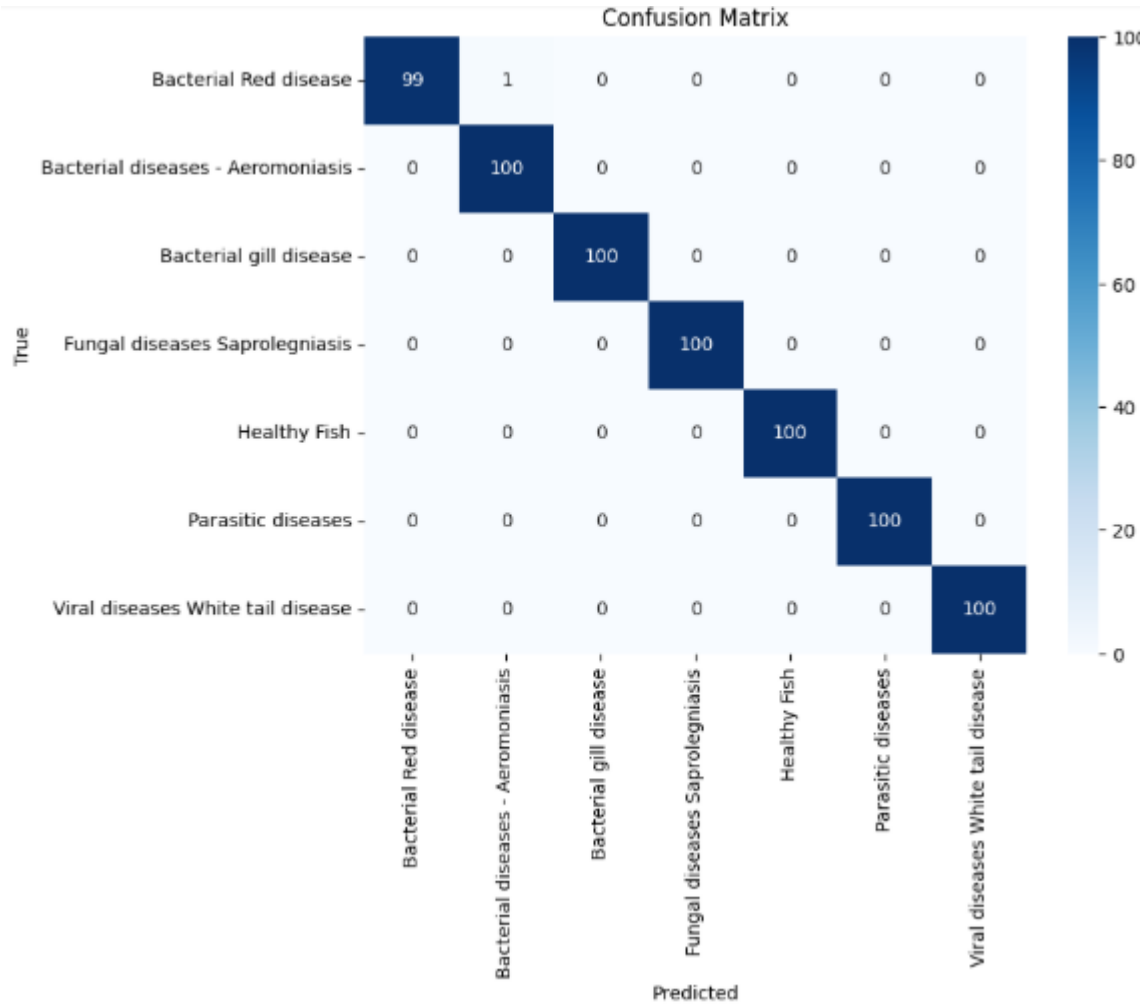


Figure 25:matrice de confusion

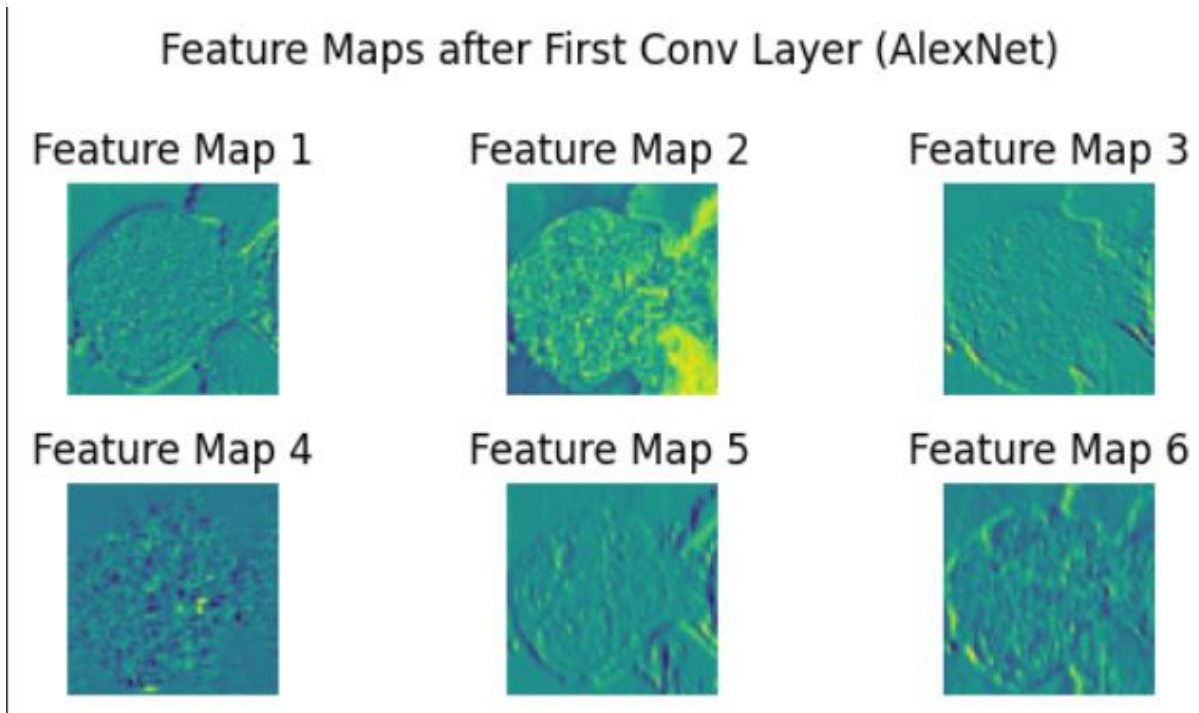


Figure 26: Feature maps after first conv layer

3.8.3. VGGNet

La figure 27 montre les données issues de l'entraînement du modèle VGG en tant que modèle de classification des maladies du poisson révèlent qu'au départ, les résultats étaient encore relativement modestes : à l'issue d'une première phase d'entraînement de 50 epochs, une précision de 47,54% et une perte d'entraînement de 1,4298 laissaient déjà augurer de progrès possibles. la validation s'est établie à 72,43 de précision à la fin de l'entraînement, alors même qu'à ce stade, une sauvegarde du modèle avait fait l'objet d'une demande automatique et du fait que la perte de validation s'affichait à 0,9430. Au final, c'est une précision exceptionnelle de 99,86% qui a pu être enregistrée à l'issue de la phase d'entraînement figurant la meilleure capacité de généralisation sans sur-apprentissage et confirmant au moins une bonne capacité à traiter de nouveaux échantillons de données n'ayant jamais été vues avant.

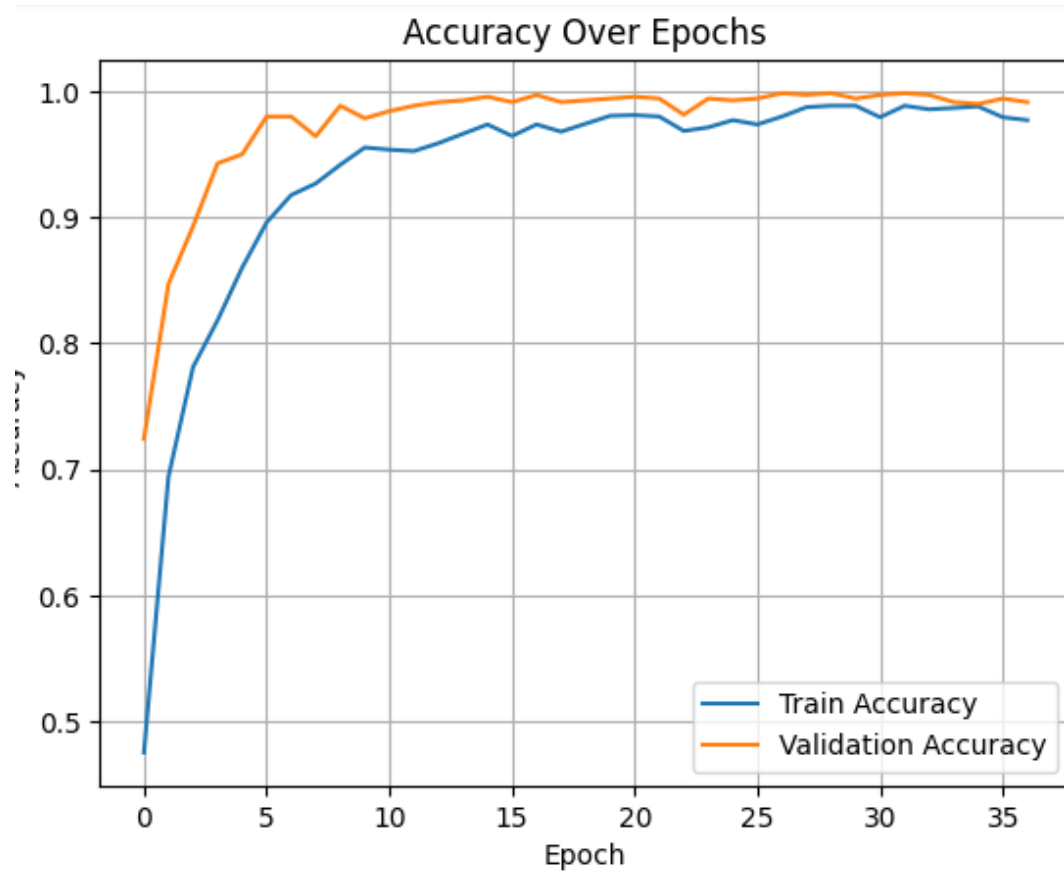


Figure 27:VGGNet Accuracy.

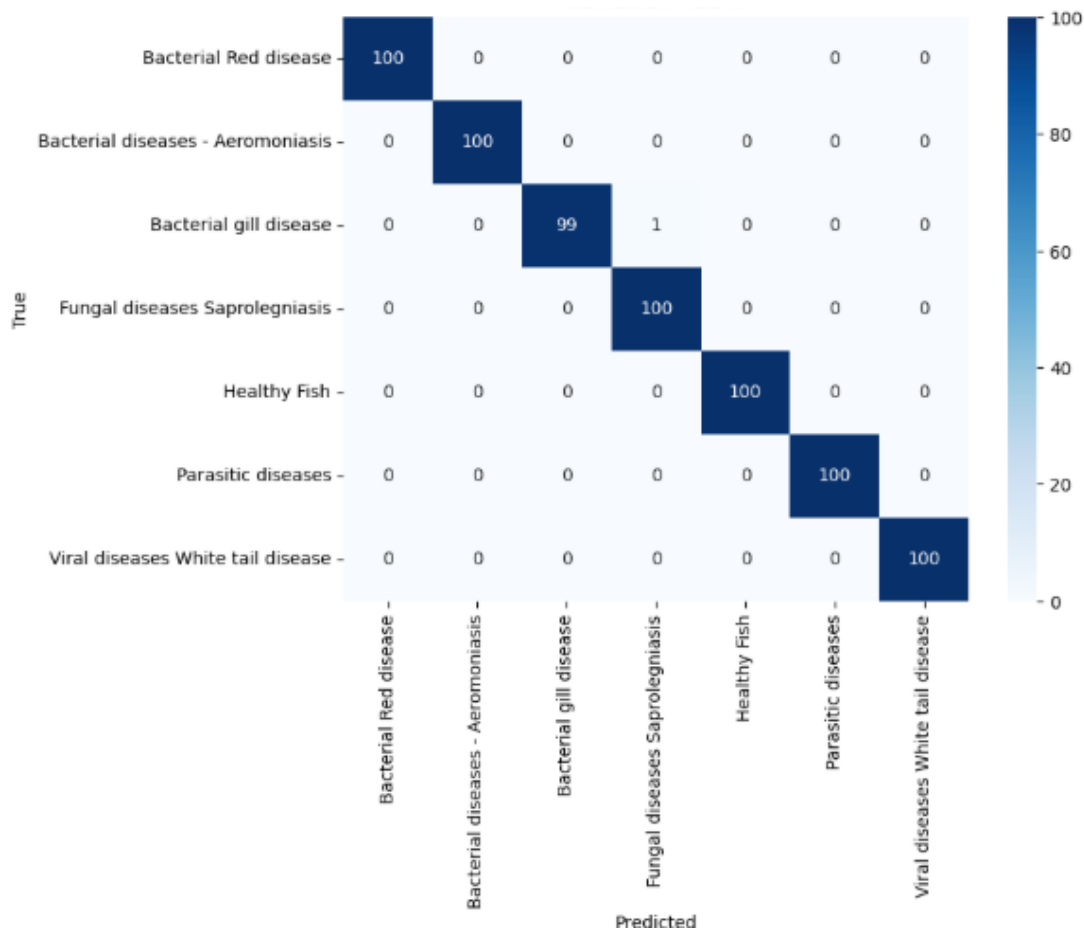


Figure 28:matrice de confusion

La figure 28 montre les résultats finaux obtenus pour le modèle proposé, utilisant VGG pour la classification des maladies des poissons confirment les performances remarquables du modèle. Effectivement, le modèle a progressivement amélioré sa précision au fil des itérations d'entraînement pour aboutir à une précision de validation de 99,86% après 50 époques et un score de perte final de 0.9430. Le rapport de classification souligne cette performance : toutes les classes sont classées avec des valeurs de précision, de rappel et de F1-score quasi identiques et élevées (de l'ordre de 1.00) pour toutes les classes, incluant les maladies bactériennes, fongiques, parasitaires et virales mais aussi le cas des poissons sains. La cohérence entre toutes ces métriques montre que non seulement le modèle VGG se révèle robuste, mais également qu'il est capable de généraliser correctement sur des données auparavant inconnues, tout en obtenant d'excellents résultats en matière de détection précise des maladies des poissons.

3.8.4. MobileNet

La figure 29 montre les résultats d'entraînement et de validation pour le modèle MobileNet de classification des maladies des poissons montrant que le modèle a débuté l'entraînement avec une valeur de perte (Loss) de 1.94420 et une valeur de précision (Accuracy) de 0.1880. Bien qu'au départ, la performance était faible, le modèle a montré une forte amélioration au fur et à mesure des époques. Ainsi, après 50 époques d'entraînement, la perte d'entraînement baisse à 1.8637, alors que la validation Accuracy est de 0.2514 à la première époque. En fin d'entraînement, on obtient finalement une validation Accuracy finale de 0.7686 pour le modèle. Ce résultat a permis de voir que le modèle avait progressé durant l'entraînement, ce qui reflète l'amélioration de son apprentissage, et qu'il est capable d'obtenir une bonne précision dans la classification des maladies des poissons.

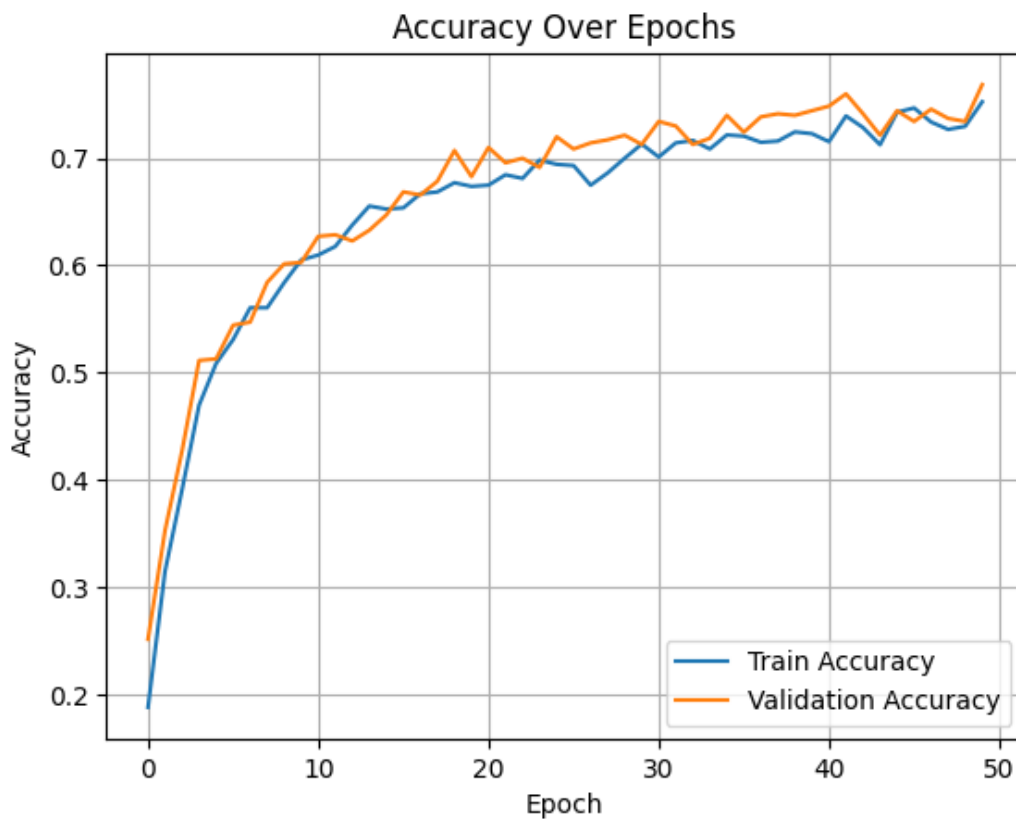


Figure 29: MobileNet Accuracy.

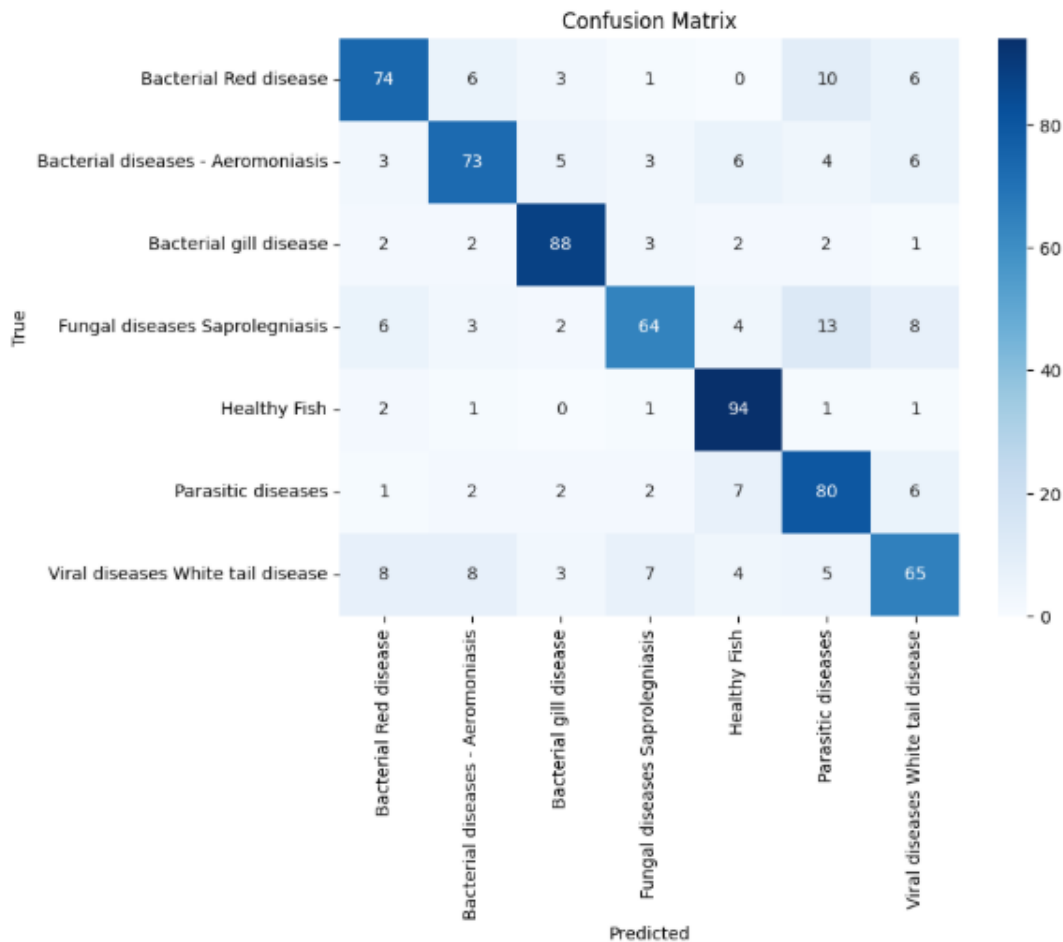


Figure 30:matrice de confusion

La figure 30 montre les performances du rapport de classification dans le cas du modèle MobileNet pour la classification des maladies des poissons a été satisfaisante avec un score global de 0.77 pour la précision, mais les scores de precision, recall, et f1-score diffèrent en fonction des classes. Par exemple : La classe Bacterial gill disease a réalisé les meilleures performances avec precision = 0.85 et recall = 0.88 ce qui conduit à un score de f1 = 0.87. D'autres classes comme Healthy Fish ont également obtenu de bons scores avec precision = 0.80 et recall = 0.94, ce qui démontre la capacité du modèle à classer les poissons sains avec une bonne qualité. En revanche des classes comme Viral diseases White tail disease et Fungal diseases Saprolegniasis ont des performances moins satisfaisantes avec des scores de precision

et recall inférieurs à la valeur 0.80. Il existe néanmoins certaines disparités concernant les fluctuations de performance des différentes classes, sur le jeu de données, globalement le modèle a obtenu des résultats satisfaisants sur la classification des maladies grâce à une généralisation correcte sur ce jeu de données.

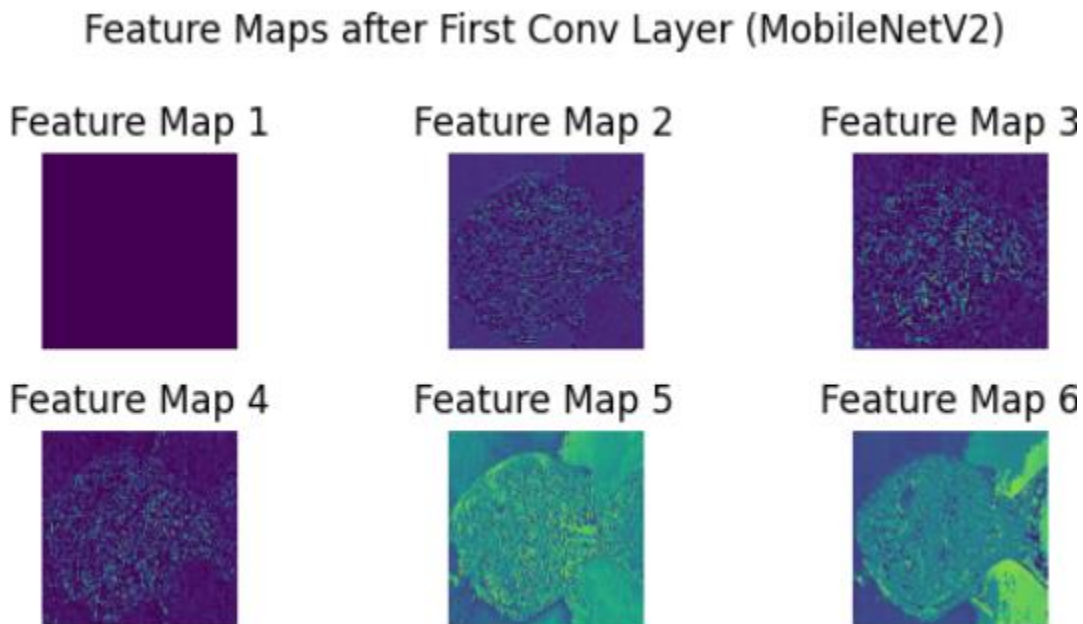


Figure 31: Feature maps after first conv layer

3.9 Analyse comparative des architectures d'apprentissage profond

Figure 32 montre la comparaison des quatre modèles employés pour la classification des maladies des poissons – AlexNet, VGG, ResNet et MobileNet – met en exergue des performances inégales selon la structure du réseau de neurones. Les modèles AlexNet et VGG ont largement surperformé, avec une précision de validation ultime s'élevant jusqu'à 99,86 %, et des scores atteignant 1,00 en précision, rappel et F1-score pour toutes les classes, témoignant de leur bonne capacité de généralisation et de leur habileté à bien classifier les différentes catégories, incluant les infections bactériennes, fongiques et virales, ainsi que les poissons sains. Le modèle ResNet, en léger retrait cependant, parvient tout de même à obtenir une

précision de validation de 87,71 %, et des scores qui se maintiennent autour de la moyenne, soit 0,88, ce qui reste très honorable, et qui montre bien les atouts de ResNet, confirmés la plupart du temps dans des environnements plus difficiles à classer. Le modèle MobileNet, plus optimisé pour les environnements où les ressources sont limitées, se retrouve peu performant avec une précision de 76,86 %, et des scores tournant autour de 0,77, et bien que ses performances soient inférieures aux autres modèles, il reste une option intéressante si les priorités sont la rapidité d'inférence, et la légèreté du modèle.

Analyse comparative

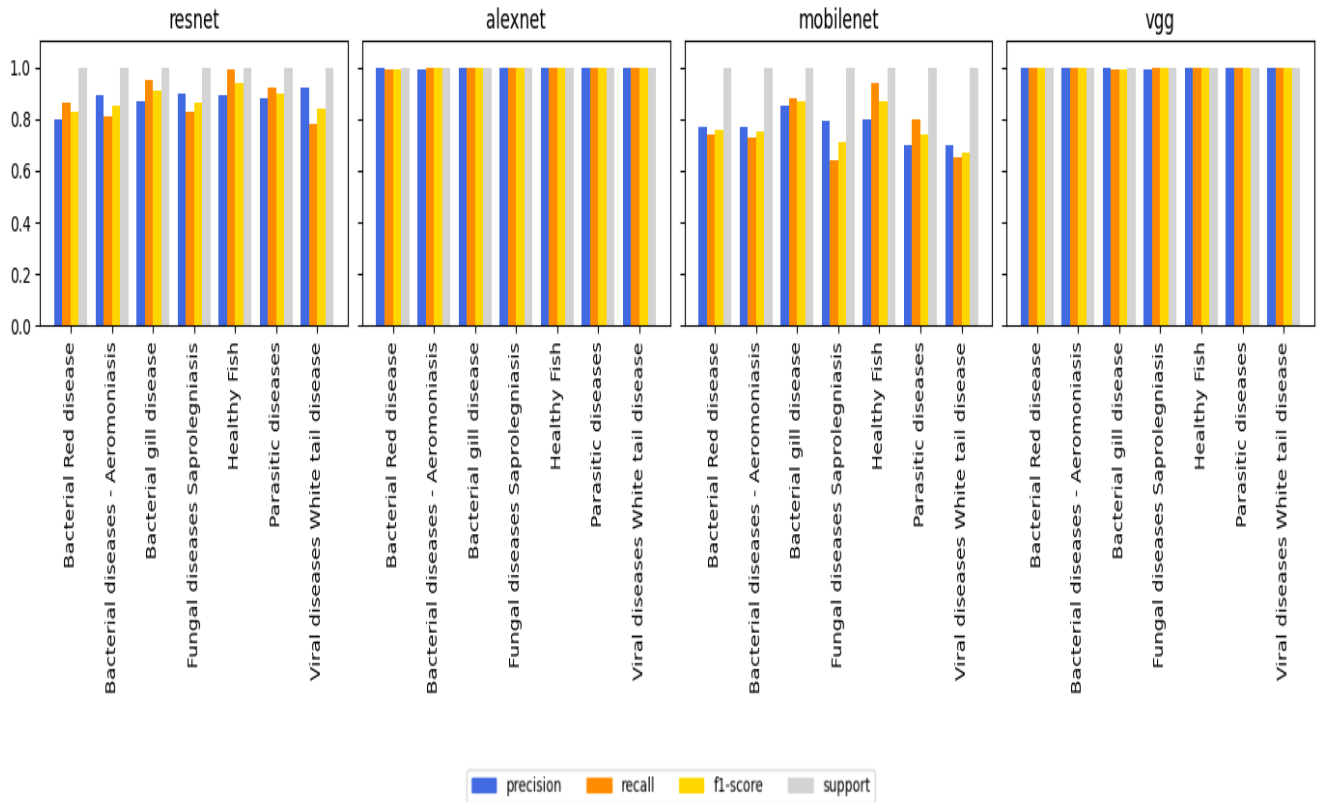


Figure 32: Analyse comparative

Tableau 4 : Évaluation comparative des performances des quatre modèles pour la classification des maladies des poissons

Modèles	Maladies	Precision	Recall	F1-score	Support
ResNet	Bacterial Red disease	0,8	0,86	0,83	100
	Bacterial diseases - Aeromoniasis	0,89	0,81	0,85	100
	Bacterial gill disease	0,87	0,95	0,91	100
	Fungal diseases Saprolegniasis	0,9	0,83	0,86	100
	Healthy Fish	0,89	0,99	0,94	100
	Parasitic diseases	0,88	0,92	0,9	100
	Viral diseases White tail disease	0,92	0,78	0,84	100
AlexNet	Bacterial Red disease	1	0,99	0,99	100
	Bacterial diseases - Aeromoniasis	0,99	1	1	100
	Bacterial gill disease	1	1	1	100

	Fungal diseases Saprolegniasis	1	1	1	100
	Healthy Fish	1	1	1	100
	Parasitic diseases	1	1	1	100
	Viral diseases White tail disease	1	1	1	100
MobilNet	Bacterial Red disease	0,77	0,74	0,76	100
	Bacterial diseases - Aeromoniasis	0,77	0,73	0,75	100
	Bacterial gill disease	0,85	0,88	0,87	100
	Fungal diseases Saprolegniasis	0,79	0,64	0,71	100
	Healthy Fish	0,8	0,94	0,87	100
	Parasitic diseases	0,7	0,8	0,74	100
	Viral diseases White tail disease	0,7	0,65	0,67	100
Vgg16	Bacterial Red disease	1	1	1	100
	Bacterial diseases - Aeromoniasis	1	1	1	100
	Bacterial gill disease	1	0,99	0,99	100
	Fungal diseases Saprolegniasis	0,99	1	1	100
	Healthy Fish	1	1	1	100

	Parasitic diseases	1	1	1	100
	Viral diseases White tail disease	1	1	1	100

3.4. Matériels (Hardware)

Raspberry pi high_quality (HQ) camera (12.3MP, Sony IMX477), Cables, Model

Dans le cadre de notre projet de reconnaissance des maladies des poissons, nous prévoyons d'utiliser les techniques d'intelligence artificielle sur le edge (Raspberry Pi). Ce système est constitué des éléments suivants :

- Caméra Sony IMX477 (12.3 MP) : Une caméra haute définition qui permet de prendre des images de poissons au sein de leur milieu aquatique. Sa localisation permet de réaliser une surveillance continue du bassin.
- Raspberry Pi : Micro-ordinateur qui permet de connecter la caméra pour récupérer les images prises et les transmettre vers le modèle d'analyse. En outre, il peut être utilisé pour effectuer un prétraitement des images.
- Câble de connexion (CSI) : Câble utilisé pour relier la caméra au Raspberry Pi et assurer la transmission des données d'image en temps réel.
- Modèle d'intelligence artificielle (IA) : Architecture de Deep Learning (comme ResNet, MobileNet, VGG ou AlexNet) entraînée pour analyser les images et détecter d'éventuelles maladies chez les poissons.

Ce système est proposé pour une détection automatisée, rapide et fiable qui limite les inspections manuelles et améliore la surveillance de la santé aquacole.

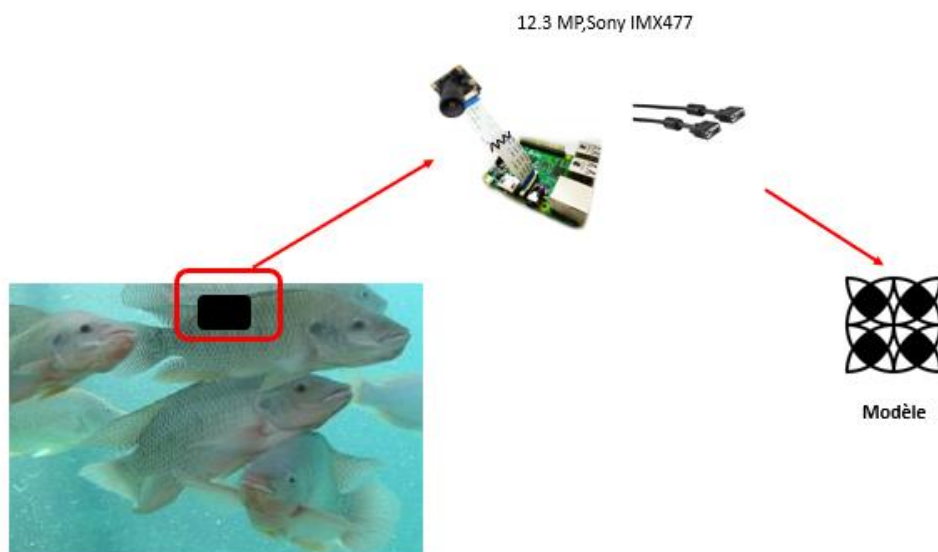


Figure 33:modèle finale

3.5. Conclusion

Dans le chapitre qui nous occupe ici, nous avons examiné et comparé plusieurs architectures de réseaux de neurones convolutifs (CNN) qui sont couramment utilisées dans le domaine de la classification d'images, à savoir AlexNet et VGG, deux architectures représentant un bon compromis entre la précision de la classification et l'efficacité de calcul, ce qui les rend potentiellement intéressantes pour une implémentation sur des plateformes embarquées telles que le Raspberry Pi. Puis nous avons abordé la partie pratique de notre projet, à travers l'intégration du modèle avec la caméra HQ de Raspberry Pi (Sony IMX477) que nous avons choisie pour sa haute résolution et la possibilité de changer l'objectif afin de pouvoir capturer des images de poissons de qualité suffisante pour détecter correctement les maladies. Alliant un modèle performant et un matériel de capture, ce système intelligent pourrait permettre de diagnostiquer les maladies des poissons en temps réel et ainsi, contribuer à une meilleure gestion dans les exploitations aquacoles.

Chapitre 04 : Étude technico-économique

1. Premier axe : Présentation du projet

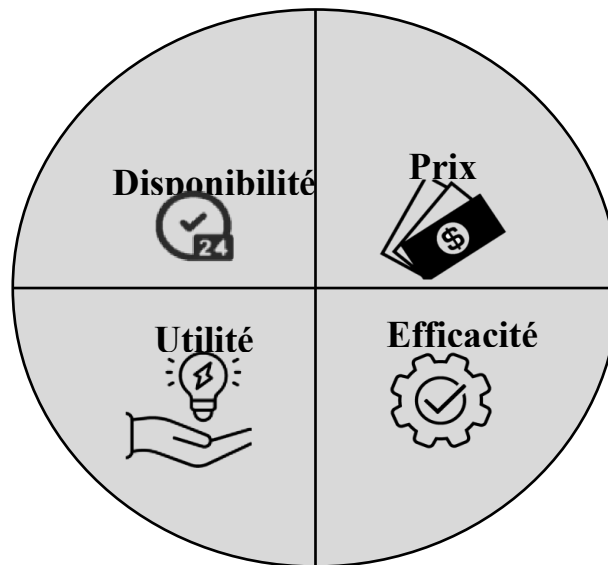
1.1. L'idée de projet :

Le projet que nous avons développé est celui correspondant à un système intelligent fondé sur l'intelligence artificielle, et plus précisément sur l'apprentissage profond, pour une détection et classification automatiques de maladies chez les poissons d'eau douce à partir d'images.

Nous avons utilisé plusieurs architectures de réseaux de neurones convolutifs, VGG, ResNet, MobileNet, AlexNet, pour comparer leurs performances et déterminer le modèle le plus adapté à la reconnaissance de maladies.

Ce système a pour objectif d'intervenir au chevet des pisciculteurs et aquaculteurs pour établir rapidement le diagnostic et de réduire les pertes économiques, mais aussi favoriser la santé des élevages.

1.2. Les valeurs suggérées :



- **Disponibilité** : Ce système est déjà disponible pour répondre aux besoins des marchés locaux, régionaux et nationaux, notamment dans les zones aquacoles en

développement. Il est conçu pour être facilement installé dans les bassins piscicoles avec une logistique locale optimisée. (Voir annexe : étude de marché)

- **Prix** : est proposé à un prix estimatif de 200000 DA (environ 800 €), soit un tarif hautement compétitif face aux produits étrangers dont les prix dépassent souvent 850 €. Il offre une technologie locale de haute qualité à un coût accessible pour les éleveurs algériens.
- **Utilité** : Ce système est d'une grande utilité pour les éleveurs piscicoles, techniciens aquacoles et coopératives, car il permet de détecter précocement les maladies chez les poissons, réduisant ainsi les pertes économiques et améliorant la santé des élevages.
- **Efficacité** : Le système a démontré son efficacité à travers des tests techniques sur site et des essais expérimentaux en environnement contrôlé. Les résultats ont confirmé sa capacité à détecter les signes de maladies avec précision.

1.3. L'équipe :

- Les étudiantes :

CHOUCHAOU Ferdaous : étudiante en 1^{ère} Master Instrumentation et Métrologie.

- L'encadrant :

D^r DAHANE Amine

- Co-encadrant :

D^r RABAIE Benameur

1.4. Les objectifs du projet :

Développer un système autonome et intelligent, basé sur l'intelligence artificielle, permettant de détecter précocement les maladies des poissons dans les bassins piscicoles, afin de réduire les pertes économiques et améliorer la productivité des élevages aquacoles en Algérie.

1.5. Le planning de réalisation du projet:

- étude du projet (2 à 3 mois) :

L'étude du projet concerne plusieurs parties qui ont été primordiales dans nos décisions ; elle a concerné l'étude économique et l'étude scientifique :

- Effectuer des recherches scientifiques sur notre test optométrique pour recueillir le maximum d'informations et commencer sur de bonnes bases.
- Quantifier la présence de concurrence sur le marché algérien et identifier leurs points clés.
- Chercher les meilleurs matériaux, et identifier des fournisseurs.
- Identifier nos clients cibles.
- Faire le tour d'un segment de clientèle pour un avis sur le projet.
- Lancement de l'activité : (6 mois)
- Choix du local d'activité et équipements.
- Contact direct avec les fournisseurs et validations des matériaux et techniques de travaux.
- Installations des équipement.
- Commencer le coté conception assistée par ordinateur du projet.
- Finalisation des produits : (1 mois)
- Choix du design final.
- Choix de l'emballage.
- Facturation totale.
- Lancement des campagnes publicitaire et des stratégies marketing étudié précédemment.

2. Deuxième axe : Aspects innovants

2.1. La nature des innovations:

- Notre projet présente deux dimensions innovantes majeures :

Innovation marchée : Il s'agit du premier système local en Algérie combinant caméra sous-marine, intelligence artificielle et analyse en temps réel, spécifiquement conçu pour la détection des maladies chez les poissons dans les bassins d'aquaculture.

Innovation Scientifique : Ce système intègre un modèle d'intelligence artificielle entraîné à partir d'images de poissons malades et sains, capable de reconnaître automatiquement les signes visuels de maladies (changements de comportement, de couleur, lésions, etc.).

2.2. Les domaines d'innovation:

Le système est une innovation locale combinant intelligence artificielle, vision par ordinateur et impression 3D pour détecter automatiquement les maladies des poissons dans les bassins. Elle modernise l'aquaculture en Algérie en offrant une solution accessible, durable et efficace pour la surveillance sanitaire, tout en réduisant l'usage de produits chimiques.

3. Troisième axe : Analyse stratégique du marché

3.1. Le segment du marché :

• Clients cibles :

Les principaux clients visés par le système sont les acteurs du secteur de l'aquaculture, particulièrement ceux impliqués dans la production piscicole en bassin :

- Les éleveurs piscicoles : petits, moyens ou industriels, qui cherchent à améliorer la surveillance de la santé de leurs poissons pour éviter les pertes économiques dues aux maladies.
- Les coopératives et fermes aquacoles : structures regroupant plusieurs producteurs cherchant à moderniser leurs pratiques avec des outils technologiques fiables et abordables.
- Les instituts de recherche en aquaculture ou en environnement marin : qui peuvent utiliser le système dans des projets scientifiques ou pour la formation.
- Les ONG, agences de développement et projets de soutien à l'agriculture durable : notamment dans les zones rurales ou côtières, où l'amélioration des rendements aquacoles est un enjeu économique.

• Marché cibles :

Pour respecter notre capacité de production en premiers temps on va cibler le marché algérien, les optométristes et praticien visuelle d'Algérie avant de se concentrer sur un terrain plus vaste.

- Le marché régional (L'ouest algérien).
- Le marché national.
- Le marché international exportation (vente en ligne).

3.2. La mesure de l'intensité de la concurrence :

Il n'existe actuellement aucun concurrent direct sur le marché national. Aucune autre entreprise en Algérie ne conçoit, ne fabrique ni ne commercialise une box optométrique similaire à la nôtre. Nous sommes les premiers à proposer ce type de produit sur le territoire national.

À l'international, on trouve quelques alternatives comme la solution d'eFishery ou d'autres équipements importés de marques spécialisées. Cependant, ces produits sont principalement destinés aux grandes piscicultures industrielles et affichent des coûts très élevés — dépassant souvent les 650 euros (environ 97 500 DA) — sans compter les abonnements logiciels et les délais de livraison longs (souvent plusieurs semaines). À l'inverse, notre dispositif complet, vendu à environ 200 000 DA, reste abordable au regard de ses fonctionnalités avancées, de sa disponibilité immédiate (sous 48 h), et surtout de son adaptation au contexte local.

Caractéristiques	Votre entreprise	Concurrent 1	Concurrent 2	Concurrent 3
Qualité du produit	Très satisfaisant	Très haute qualité	Qualité moyenne à bonne	Qualité humaine variable, dépend des compétences et de la vigilance
Prix	Moyen 200000DA	Élevé à très élevé. Investissement important, abonnements souvent nécessaires	Faible à moyen. Achat caméra + installation, sans automatisation.	Aucun coût matériel, mais coût humain important (temps, erreurs possibles).
Temps de livraison	Rapide localement (composants	Long (importation, formalités,	Immédiat localement, selon	Instantané, aucune livraison.

	disponibles en Algérie). Assemblage et déploiement rapides.	configuration), parfois plusieurs semaines.	disponibilité des caméras.	
Nom de la marque		eFishery	Marques locales ou internationales	N/A (humain)
Besoin /Clients	Ciblé pour petits/moyens bassins aquacoles, éleveurs algériens, solutions adaptées au contexte local.	Piscicultures industrielles, grandes fermes aquacoles internationales.	Surveillance simple, pas adapté à détection maladies.	Tous types d'éleveurs, mais dépend fortement de l'expérience.

3.3. La stratégie marketing:

- Définir clairement notre public cible : Identifier les segments de marché les plus pertinents pour notre produit, notamment les pisciculteurs, les gestionnaires de fermes aquacoles, les centres de recherche en aquaculture, ainsi que les institutions publiques ou privées œuvrant dans le domaine halieutique.
- Créer une présence en ligne forte : Développer un site web professionnel et bien référencé (SEO), présentant notre technologie, ses avantages, ses résultats, ainsi que des démonstrations vidéo. Créer des profils actifs sur les réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, YouTube, etc.) pour atteindre les communautés d'éleveurs, de chercheurs et de professionnels de l'aquaculture.
- Offrir du contenu informatif : Partager régulièrement des contenus éducatifs et visuels (articles, vidéos, infographies) sur les maladies courantes des poissons, l'importance de

la détection précoce, les bonnes pratiques en aquaculture, et les bénéfices de notre solution technologique.

- Solliciter des avis et des témoignages : Encourager les premiers utilisateurs (pisciculteurs, chercheurs ou techniciens) à partager leurs témoignages et expériences via nos plateformes digitales afin de renforcer notre crédibilité et la confiance du marché dans notre solution.
- Marketing d'influence : Identifier des experts et influenceurs dans le domaine de l'aquaculture ou des technologies agricoles (professeurs, techniciens d'instituts de pêche, YouTubers spécialisés, etc.) et collaborer avec eux pour valoriser notre solution auprès de leur audience.
- Relations publiques : Chercher à apparaître dans les médias spécialisés (agriculture, environnement, innovation), participer à des émissions ou interviews locales, et obtenir des articles dans les journaux scientifiques, économiques ou agricoles.
- Proposer des offres spéciales et des démonstrations : Offrir des réductions pour les premiers clients (formule de lancement), des démonstrations gratuites sur site ou en ligne, et des packages personnalisés pour les groupements d'éleveurs ou les coopératives.

Mesures promotionnelles :

1. **Partenariats** : Collaborer avec des entreprises, instituts et coopératives agricoles ou halieutiques (fermes aquacoles, instituts de pêche, centres de recherche en aquaculture) afin d'élargir notre visibilité et crédibilité dans le domaine.
2. **Événements et salons professionnels** : Participer à des salons, foires agricoles, journées scientifiques ou événements dédiés à la pisciculture, à l'innovation technologique ou à l'environnement en Algérie, afin de présenter notre solution aux professionnels du secteur.
3. **Programmes de parrainage ou de recommandation** : Mettre en place un système de parrainage où les pisciculteurs ou institutions partenaires satisfaits peuvent recommander notre produit à d'autres acteurs du secteur, avec à la clé des remises ou des services gratuits (formation, mise à jour logicielle, etc.).
4. **Marketing d'influence** : Collaborer avec des influenceurs dans les domaines de l'agriculture, de l'innovation technologique ou de l'environnement (YouTubers

- agricoles, chercheurs actifs en ligne, agritech bloggers), pour promouvoir notre technologie auprès d'une audience ciblée.
5. **Relations publiques** : Chercher à obtenir une couverture médiatique dans des journaux spécialisés (pêche, agriculture, innovation), ainsi que dans les médias locaux ou nationaux, en valorisant l'impact environnemental et économique de notre solution pour l'Algérie.
 6. **Offres spéciales et démonstrations** : Proposer des démonstrations gratuites dans des fermes pilotes ou coopératives, des remises de lancement pour les premiers clients, ou encore des packages avantageux pour les groupements d'éleveurs souhaitant adopter notre solution.

Stratégie Marketing :

Définir clairement notre public cible : Identifier les segments de marché les plus pertinents, notamment les pisciculteurs, les exploitants de bassins aquacoles, les coopératives de pêche, les centres de recherche en aquaculture et les institutions publiques en charge du développement halieutique.

Créer une présence en ligne forte : Développer un site web professionnel mettant en avant notre solution, ses avantages, son fonctionnement, ainsi que des études de cas. Optimiser ce site pour les moteurs de recherche (SEO) et créer des profils actifs sur les réseaux sociaux utilisés par les professionnels du secteur (Facebook, LinkedIn, YouTube).

Offrir du contenu informatif : Publier régulièrement du contenu éducatif (articles, vidéos, infographies) sur les maladies des poissons, l'importance de la détection précoce, les innovations en aquaculture et les bénéfices de l'automatisation via IA.

Solliciter des avis et témoignages : Encourager les premiers utilisateurs (fermes pilotes, chercheurs, techniciens) à partager leur expérience positive avec notre système via des témoignages vidéo ou écrits, renforçant ainsi la fiabilité et l'image professionnelle de notre produit.

4. Quatrième axe : Plan de production et organisation

4.1. Processus de productions :

La production de notre test passe par des étapes cruciales :

- Conception du boîtier 3D et du logiciel IA.
- Réception et vérification des composants (caméra, Raspberry Pi, etc.).

- Impression 3D du boîtier étanche.
- Assemblage et câblage des éléments électroniques.
- Installation et configuration du modèle d'intelligence artificielle.
- Tests fonctionnels en conditions simulées.
- Habillage final et vérification de l'étanchéité.
- Livraison du produit avec guide d'utilisation et assistance technique.

4.2. L'approvisionnement :

L'approvisionnement se fait principalement auprès de fournisseurs locaux afin de garantir des délais rapides et de soutenir l'économie nationale. En cas d'indisponibilité de certains composants, nous nous tournons vers le marché international pour assurer la qualité et la continuité de la production.

4.3. La main d'œuvre :

On est sur une production a bas échelle dans on essaye de minimiser le nombre d'employer au début, on aura donc besoin de :

- Un informaticien.
- Un technicien électrique.
- Un manager et responsable marketing.
- Un Administrateur.

4.4. Principaux partenaires :

Nos partenaires clés sont les fournisseurs de composants, les ingénieurs en conception et développement, ainsi que les distributeurs. Leur expertise et leur fiabilité constituent la base essentielle de notre chaîne de production et de la réussite de notre produit.

5. Cinquième axe : Plan financier

5.1. Les coûts et les charges :

Désignation	Valeur (DA)
Location 60 m2	100000
Peinture	15000

Décoration		5000
Travaux divers		2500
Installations	Electricité	20000
	Eau	15000
	Internet	20000
	Autres	20000

Tableau 1 : CoutS du local et installation

Désignation	Valeur unitaire	Quantité	Valeur total DA
Bureau	20000	4	80000
Chaise	4000	12	48000
Imprimante Multi Fonction	3000	2	6000
Imprimante 3D	200000	1	200000
Table pour assemblage	50000	2	100000
ordinateur (i7 Associée avec imprimante 3D)	200000	1	200000
logiciel autodesk	25000	1	25000
Armoire de stokage	20000	2	40000
Ordinateur (i3)	30000	3	90000

Tableau 2 : CoutS d'équipements

Matières	Quantité	Prix DA\An
Filament impression 3D	100	4080000
Système électrique	150	540000
Encre imprimante	40	768000
Totale	390	5388000

Tableau 3 : Couts de matériels

Frais & Services divers	Nombre	Montant Mensuel (DA/An)	Montant Annuel (DA/An)
Abonnement internet	1	4500	54000
Abonnement electricite	1	14000	168000
Nettoyage	1	10000	120000
Licence Logiciel Microsoft	2	1500	36000
Licence Logiciel Antivirus	2	1000	24000
Licence Logiciel Développement	1	1000	12000
Licence Logiciel Design	2	1000	24000
Maintenance	1	1500	18000
Total	11	34500	456000

Tableau 4 : CoutS des frais et services divers

Poste	Nombre	Salaire Mensuel (DA/An)	Salaire Brut (DA/An)
Informaticien cao + impression	1	60000	720000
Technicien électrotechnicien	1	40000	480000
Responsable marketing	1	40000	480000
Administrateur	1	60000	720000
Total	4	200000	2400000

Tableau 6 : couts des salaires

	Mois												To tal
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Budget mensuel (×1000 DA)	60	40	20	15	15	15	15	15	15	15	15	15	255

Tableau 7 : Budget marketing

		Formule	Montant (DA)
A	Cout unitaire initial (DA)		125810.00
B	Charges fixes unitaire (DA)		3685.16
C	Dotation à l'amortissement unitaire (Sur 5 ans)		203.61
D	Dotation aux investissements unitaire (Sur 10 ans)		25.48
E	Cout Unitaire final (DA)	A+B+C+D	129724.26
F	Capacite de production (unités/an)		775
G	Budget Marketing (DA/an)		255000.00
H	Cout du projet annuel (DA)	(E*F)+G	100791301.24
I	Chiffre d'affaires annuel (DA)		155000000.00
J	Bénéfice annuel (DA)	I-H	54208698.76
K	Marge bénéficiaire (%)	J*100/I	34.97 %

Tableau 8 : Bilan Final

6. Sixième axe : Business model canva

BUSINESS MODEL CANVAS		Conçu par : CHOUCHAOUI Ferdaous		Version : 01
Partenaires clés - Centres de recherche en aquaculture - Fournisseurs de données (images de poissons malades) - Experts en biologie marine et aquaculture - Éleveurs de poissons et fermes piscicoles.	Activités Clés - Collecte et annotation des données d'images de poissons - Développement et entraînement de modèles IA (ex. : ResNet, VGG, etc.) - Tests, validation et amélioration des modèles - Déploiement de l'application (web ou mobile) - Sensibilisation des pisciculteurs à l'utilisation de l'outil	Propositions de valeur - Moins coûteux. - Disponible. - Précis - Efficace - Préventive - Augmenter l'élevage	Relation Client - Support technique (chat, hotline) - Formation à l'utilisation de l'outil - Mises à jour régulières basées sur les retours utilisateurs - Enquêtes de satisfaction et amélioration continue.	Clients - Fermes piscicoles (eau douce et eau salée) - Éleveurs indépendants - Coopératives d'aquaculture - Ministères ou offices de pêche - Universités et laboratoires de recherche - Startups ou entreprises du secteur bleu
	Ressources clés - Base de données d'images annotées de poissons malades - Modèles IA pré-entraînés (VGG, ResNet, etc.)		Canaux - Plateforme en ligne (application web ou mobile) - Réseaux sociaux, salons de l'aquaculture	

	- Développeurs spécialisés IA / traitement d'image - Experts en maladies des poissons - Plateforme d'accès à l'outil (web/app)		- Partenariats avec coopératives piscicoles - Visites de terrain et démonstrations - Publications spécialisées en aquaculture	
Coûts - Recherche et développement - Matériels et matières premières - Marketing. - Charges du local et maintien de l'équipement. Cout du projet annuel : 100791301.24DA Charges Fixe : 2856000 DA Charges Variable : 125810 DA		Revenus - Promotions - Vente		
Incubateur de Oran 1 Université – Ahmed Ben Bella				

Conclusion générale

Les maladies des poissons représentent un défi majeur pour la durabilité et la rentabilité de l'aquaculture moderne. Face à cette problématique, l'émergence de nouvelles technologies comme l'Intelligence Artificielle (IA) et l'Internet des Objets (IoT) offre des solutions innovantes pour automatiser la surveillance, le diagnostic et la gestion des maladies aquacoles.

Ce mémoire a été structuré en trois chapitres complémentaires. Dans le premier chapitre, nous avons présenté l'aquaculture intelligente et les apports de l'IoT pour le suivi des environnements aquacoles. Nous y avons également défini les technologies utilisées, l'architecture système proposée, et la manière dont l'IoT permet d'assurer une surveillance proactive de la santé des poissons.

Dans le deuxième chapitre, nous avons abordé les principales maladies affectant les poissons d'élevage, tout en introduisant les concepts fondamentaux de l'apprentissage profond (deep learning). Nous avons étudié les réseaux neuronaux convolutifs (CNN) et présenté des travaux antérieurs utilisant ces approches pour détecter automatiquement les pathologies à partir d'images.

Dans le troisième chapitre, nous avons implémenté plusieurs modèles de deep learning (AlexNet, VGG, ResNet, MobileNet) sur dataset d'images collecté en aquaculture. Les modèles ont été évalués selon plusieurs métriques, et les résultats expérimentaux ont montré que VGG et AlexNet ont atteint une précision exceptionnelle de 99,86 %, confirmant l'efficacité de ces architectures pour la classification automatique des maladies aquacoles.

Ce travail nous a permis de mieux comprendre l'utilité des réseaux neuronaux pour le diagnostic automatisé et leur impact potentiel sur la gestion durable des élevages aquacoles. Malgré les résultats satisfaisants obtenus, notre projet reste perfectible et pourra évoluer selon plusieurs axes, notamment :

- Intégrer les modèles à un système de détection en temps réel basé sur caméra embarquée.
- Tester les performances sur des images capturées en conditions réelles (lumière variable, turbidité...).
- Étendre l'approche à d'autres espèces aquacoles et types de pathologies.
- Augmenter la précision du modèle en identifiant la localisation de la maladie

Ainsi, ce mémoire constitue une première étape vers la modernisation des pratiques aquacoles par l'intelligence artificielle, au service d'une aquaculture plus intelligente, résiliente et productive.

Bibliographie

- [1] Cookie connecté, IoT : L'internet des objets expliqué en emoji, (29 mai 2016). Consulté le: 14 mai 2025. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=8sgmHTHSqxw>
- [2] E. Baccelli, Internet des Objets: Défis sociétaux et domaines de recherche scientifique pour l'Internet des Objets (IoT). 2021. Consulté le: 14 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://inria.hal.science/hal-03474906>
- [3] « Résultats Google Recherche d'images ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/imgres>
- [4] « Qu'est-ce que l'Internet des objets | L'IoT expliqué », SAP. Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sap.com/suisse/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [5] « Accélérez vos opérations grâce à l'IoT ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.oracle.com/africa-fr/internet-of-things/>
- [6] « Qu'est-ce que l'Internet des objets | L'IoT expliqué », SAP. Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sap.com/france/products/technology-platform/what-is-iot.html>
- [7] H. Zhang et F. Gui, « The Application and Research of New Digital Technology in Marine Aquaculture », J. Mar. Sci. Eng., vol. 11, n° 2, Art. n° 2, févr. 2023, doi: 10.3390/jmse11020401.
- [8] M. S. Ahmed, T. T. Aurpa, et Md. A. K. Azad, « Fish Disease Detection Using Image Based Machine Learning Technique in Aquaculture », J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci., vol. 34, n° 8, Part A, p. 5170-5182, sept. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.003.
- [9] « Aquaculture IoT : une technologie intelligente pour une production piscicole durable ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fnb.tech/fr/iot-aquaculture/>

- [10] « Cutting-edge technologies for detecting and controlling fish diseases: Current status, outlook, and challenges ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/jwas.13051>
- [11] « The Application and Research of New Digital Technology in Marine Aquaculture ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/2/401>
- [12] « Aquaculture IoT : une technologie intelligente pour une production piscicole durable ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fnb.tech/fr/iot-aquaculture/>
- [13] « la technologie de localisation iot aquaculture - Recherche Google ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=70b5c3d27dd6e643&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zowUOJ8RVmt79gpC85QS2oE_rOxQg:1747339041837&q=la+technologie+de+localisation+iot+aquaculture&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5flcnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwlRhdNfno-CIRh0PKqyvFYyTkflfJOoyi6rL2ScSJ67dNoiLlma6nffqoENgGX1Qo-QK1HD9UIm2kfR573vrTDjRRRG7OFRWp4GjMVYYazaqcxmstZ1xoXIV-gPTWbBpxebs62rJxciSRxVKPRaYHWSVhMLhdkDYNJw_qbYAlPhgDM6OpQ4II4w&sa=X&ved=2ahUKEwjkiJCXoaaNAxUISaQEHX01GNYQtKgLegQIERAB&biw=911&bih=405&dpr=1.5#vhid=76QW47Obx86MEM&vssid=mosaic
- [14] « Fish Disease Detection using Deep Learning and Machine Learning », ResearchGate. Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.researchgate.net/publication/374952216_Fish_Disease_Detection_using_Deep_Learning_and_Machine_Learning
- [15] « Recherche Google ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.google.com/search?q&hl=fr-DZ&udm=2&tbs=ring:CTI4pqjzugf0YaTzKC73GB5rsgIAwAIA2AIA4AIA&sa=X&ved=0CBoQuIIBahcKEwjwsbmOpqaNAxUAAAAAHQAAAAAQFg&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=gWCSleSsh9VxOM&vssid=mosaic>

- [16] « Comment traiter efficacement la maladie des taches rouges chez les poissons - FnB Tech ». Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fnb.tech/fr/how-to-treat-red-spot-disease-in-fish-effectively/>
- [17] « Les maladies bactériennes des poissons d’eau douce », Wanimovéto. Consulté le: 15 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://conseils.wanimoveto.com/veterinaire/les-maladies-des-poissons/les-maladies-bacteriennes-des-poissons-deau-douce.html>
- [18] « Freshwater Fish Disease Aquaculture in south asia ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kaggle.com/datasets/subirbiswas19/freshwater-fish-disease-aquaculture-in-south-asia>
- [19] « Home | Food and Agriculture Organization of the United Nations ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/home/en/>
- [20] « PROJET REGIONAL MEDITERRANEEN DE DEVELOPPEMENT DE L’AQUACULTURE MEDITERRANEAN REGIONAL AQUACULTURE PROJECT ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/4/ac910f/AC910F11.htm>
- [21] « PARASITES, INFECTIONS ET MALADIES DU POISSON EN AFRIQUE ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/aquaculture/a0844t/docrep/008/AD792F/AD792F04.htm>
- [22] « Pourriture des nageoires - Érosion de la bouche - Maladies poissons & traitements ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aquariophilie-pratique.net/columnariose.htm#gsc.tab=0>
- [23] « Les Maladies des Poissons et Solutions - Laboratoire Francodex », Francodex. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.francodex.com/nos-conseils-veterinaires/maladies-poissons-solutions>
- [24] « Pourriture des nageoires – Association Française du Poisson Rouge ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.lepoissonrouge.org/pourriture-des-nageoires/>

- [25] « Reconnaître, traiter et prévenir l'hydropisie chez les poissons ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.zooexperte.com/recherche-de-leau-du-ventre-chez-les-poissons>
- [26] « Aquaculture into the 21st century in Southern Africa ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.fao.org/4/ad792f/AD792F06.htm>
- [27] « Chapitre 6 : Maladies parasitaires | Guides médicaux MSF ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://medicalguidelines.msf.org/fr/viewport/CG/francais/chapitre-6-maladies-parasitaires-16689753.html>
- [28] « Présentation des infections parasitaires - Infections », Manuels MSD pour le grand public. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.msdmanuals.com/fr/accueil/infections/infections-parasitaires-présentation/présentation-des-infections-parasitaires>
- [29] « Chapitre 8 : Maladies virales | Guides médicaux MSF ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://medicalguidelines.msf.org/fr/viewport/CG/francais/chapitre-8-maladies-virales-16689962.html>
- [30] « Les faits en bref: Présentation des infections virales », Manuels MSD pour le grand public. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.msdmanuals.com/fr/accueil/les-faits-en-bref-infections/présentation-des-infections-virales/présentation-des-infections-virales>
- [31] « Deep Learning ou Apprentissage Profond : qu'est-ce que c'est ? » Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://datascientest.com/deep-learning-definition>
- [32] « Deep Learning - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zooIC1e3UK02NLwksW0rLiR4U6IOA:1747396866487&q=Deep+Learning&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5f1cnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwIRhdNfno-CIRh0PKqyvFYyTkflDhnnjeNcIEBNkvpwlZ1p9VUS7-

7w5t6A3qSO9gO7JHHrq4B5ZsWetFUi51z01-

FneddEUlbPStKajznYx5QCLuWJlmx7MGyzck8meCcPo5whei0v-

GCGOCBxJRDxcWeh1_JB69dHSid84InB8JqyomvE1I9A&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwjDz4jM-

KeNAXmSvEDHWnmHH0QtKgLegQIExAB&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=7uv
sZVmAdhUsGM&vssid=mosaic

[33] « Lien_8_principales_maladies_cle0dab1e.pdf ». Consulté le: 14 mai 2025. [En ligne].
Disponible sur:

https://agriculture.gouv.fr/sites/default/files/documents/pdf/Lien_8_principales_maladies_cle0dab1e.pdf

[34] « Qu'est-ce qu'une couche de convolution ? », Databricks. Consulté le: 16 mai 2025.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.databricks.com/fr/glossary/convolutional-layer>

[35] « CNN | Introduction to Pooling Layer | GeeksforGeeks ». Consulté le: 16 mai 2025.
[En ligne]. Disponible sur: <https://www.geeksforgeeks.org/cnn-introduction-to-pooling-layer/>

[36] « What is Fully Connected Layer in Deep Learning? | GeeksforGeeks ». Consulté le:
16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.geeksforgeeks.org/what-is-fully-connected-layer-in-deep-learning/>

[37] « cnn deep learning - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne].
Disponible sur:

https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&biw=1366&bih=607&sxsrf=AHTn8zrLiP2FW004CzLyFIcH9NwhKF8Bbw:1747397258196&q=cnn+deep+learning&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5flcnRvZiloEzC9Z2SN5Zmit1UHYF_iECit9HwlcazCNSdLTKcLCSzlis1KzerK-gxHbwmCjIvuYOwll4EGndyeOlinhRDJnjATqyCsvujA-avdTWMgbF4YcJzaq0Gg0vkv7PkIDskrszMqI2n9koub3V3z62jw9B6q65Akf9o9iKz3nd3QV0kIDJl28Ubwdvx3XEWWijl0Lw&sa=X&ved=2ahUKEwjN0OyG-qeNAXXvRPEDHfsoNlsQtKgLegQIChAB#vhid=VAifiUCSEzyZLM&vssid=mosaic

- [38] A. Haleem, M. Javaid, M. Asim Qadri, R. Pratap Singh, et R. Suman, « Artificial intelligence (AI) applications for marketing: A literature-based study », *Int. J. Intell. Netw.*, vol. 3, p. 119-132, janv. 2022, doi: 10.1016/j.ijin.2022.08.005.
- [39] C. Palaioikostas, « Predicting for disease resistance in aquaculture species using machine learning models », *Aquac. Rep.*, vol. 20, p. 100660, juill. 2021, doi: 10.1016/j.aqrep.2021.100660.
- [40] M. S. Ahmed, T. T. Aurpa, et Md. A. K. Azad, « Fish Disease Detection Using Image Based Machine Learning Technique in Aquaculture », *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 34, n° 8, Part A, p. 5170-5182, sept. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.003.
- [41] K. Yue et Y. Shen, « An overview of disruptive technologies for aquaculture », *Aquac. Fish.*, vol. 7, n° 2, p. 111-120, mars 2022, doi: 10.1016/j.aaf.2021.04.009.
- [42] M. S. U. Chowdury et al., « IoT Based Real-time River Water Quality Monitoring System », *Procedia Comput. Sci.*, vol. 155, p. 161-168, janv. 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.08.025.
- [43] C. Clément et É. Demont, « Chapitre 2. Le concept de développement », *Gd. Notions Psychol.*, vol. 3, p. 29-33, 2021.
- [44] K. Nagasawa, « Research and training on fish diseases at the SEAFDEC Aquaculture Department in 2000-2004: A review », *Transbound. Fish Dis. Southeast Asia Occur. Surveill. Res. Train.*, p. 41, 2004.
- [45] « Journal of Aquatic Science ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciepub.com/journal/jas/aimsandscope>
- [46] « I- Les facteurs du développement [e_Géographie 1ère_Leçon 5 : Les facteurs du développement et du sous-développement] ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://fasoeducation.bf/cours_esu/secondaire/premiere/hg/geographie/facteurs_developpement_sous_developpement/co/module_conception_2.html
- [47] D. Li, X. Li, Q. Wang, et Y. Hao, « Advanced Techniques for the Intelligent Diagnosis of Fish Diseases: A Review », *Anim. Open Access J. MDPI*, vol. 12, n° 21, p. 2938, oct. 2022, doi: 10.3390/ani12212938.

- [48] « Journal of Aquatic Science ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciepub.com/journal/jas/aimsandscope>
- [49] C. Clément et É. Demont, « Chapitre 2. Le concept de développement », Gd. Notions Psychol., vol. 3, p. 29-33, 2021.
- [50] Z. Mao, M. Li, et J. Chen, « Draft Genome Sequence of *Pseudomonas plecoglossicida* Strain NB2011, the Causative Agent of White Nodules in Large Yellow Croaker (*Larimichthys crocea*) », Genome Announc., vol. 1, n° 4, p. e00586-13, août 2013, doi: 10.1128/genomeA.00586-13.
- [51] « Freshwater Aquarium Disease Prevention, Recognition and Treatment ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aqueon.com/articles/aquarium-disease-prevention>
- [52] M. M. Blanco, A. Gibello, et J. F. Fernandez-Garayzabal, « Influence of fish health management: Bases, procedures and economic implications », Cah. Options Méditerranéennes, vol. 51, p. 45-9, 2000.
- [53] R. Ranjan, K. Sharrer, S. Tsukuda, et C. Good, « MortCam: An Artificial Intelligence-aided fish mortality detection and alert system for recirculating aquaculture », Aquac. Eng., vol. 102, p. 102341, août 2023, doi: 10.1016/j.aquaeng.2023.102341.
- [54] K. M. Knausgård et al., « Temperate fish detection and classification: a deep learning based approach », Appl. Intell., vol. 52, n° 6, p. 6988-7001, avr. 2022, doi: 10.1007/s10489-020-02154-9.
- [55] M. S. Ahmed, T. T. Aurpa, et Md. A. K. Azad, « Fish Disease Detection Using Image Based Machine Learning Technique in Aquaculture », J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci., vol. 34, n° 8, Part A, p. 5170-5182, sept. 2022, doi: 10.1016/j.jksuci.2021.05.003.
- [56] M. R. I. Mamun, U. S. Rahman, T. Akter, et M. A. Azim, « Fish disease detection using deep learning and machine learning », Int. J. Comput. Appl., vol. 975, p. 8887, 2023.
- [57] R. Ranjan, K. Sharrer, S. Tsukuda, et C. Good, « MortCam: An Artificial Intelligence-aided fish mortality detection and alert system for recirculating aquaculture », Aquac. Eng., vol. 102, p. 102341, août 2023, doi: 10.1016/j.aquaeng.2023.102341.

- [58] « Fish Disease ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kaggle.com/datasets/alaamahmoud2010/fish-disease>
- [59] « Freshwater Fish Disease Aquaculture in south asia ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.kaggle.com/datasets/subirbiswas19/freshwater-fish-disease-aquaculture-in-south-asia>
- [60] M. S. Ahmed, « SalmonScan: A Novel Image Dataset for Machine Learning and Deep Learning Analysis in Fish Disease Detection in Aquaculture », vol. 3, avr. 2024, doi: 10.17632/x3fz2nfm4w.3.
- [61] « Fish disease detection - v2 2023-11-06 1:05pm ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://universe.roboflow.com/iot-uiah0/fish-disease-detection-n4fho/dataset/2>
- [62] « seg Semantic Segmentation Dataset by smarttech ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://universe.roboflow.com/smarttech/seg-hevpd>
- [63] « Classification - v2 2023-04-18 9:46pm », Roboflow. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/classification-vfybf/dataset/2>
- [64] « fish Classification Dataset and Pre-Trained Model by Aquaculture », Roboflow. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/fish-av5bm>
- [65] « finspy - v1 2023-04-07 8:33pm », Roboflow. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://universe.roboflow.com/aquaculture-dd5er/finspy/dataset/1>
- [66] « Qu'est ce qu'un dataset ? Comment le manipuler ? » Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://datascientest.com/dataset-definition>
- [67] « Qu'est ce qu'un dataset ? Comment le manipuler ? » Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://datascientest.com/dataset-definition>
- [68] « Logo Anaconda - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zq0O6t7uuJgJ6tV1t6z1OnbGzemCQ:1747399557960&q=Logo

+Anaconda&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5flcnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwl
 RhdNfno-CIRh0PKqyvFYyTkflfJOoyi6rL2ScSJ67dNoiLlma6nffqoENgGX1Qo-
 QK1HEFg3ItZnm6x0TVwu0vcGVKWcexg6trYxsbU4W-
 yOXrb9bpvWaw41YIQMMVvZPQCUC4uF8k_Itl4JP-
 ws_2BXbhez7iRlXdrIvwxTIJdPbtTztOEFA&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwitjbvPgqiNA
 xXxQ_EDHTEOJIwQtKgLegQIEhAB&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=ZoQgybQw
 GQHqfM&vssid=mosaic

[69] « Jupiter logo anaconda - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne].
 Disponible sur:

https://www.google.com/search?q=Jupiter+logo+anaconda&sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&udm=2&biw=1366&bih=607&sxsrf=AHTn8zrwcBYz2K4Q2XWZmeya6m4XE80T8Q%3A1747399617943&ei=wTMnaK-iOaSNxc8PmJDI4Qo&ved=0ahUKEwjvhojsgqiNaxWkRvEDHRgIMqwQ4dUDCBQ&uact=5&oq=Jupiter+logo+anaconda&gs_lp=EgNpbWciFUp1cGl0ZXIgbG9nbyBhbmFjb25kYUiALiDxAlWK3ABeACQAQCYAbkBoAHLc6oBAzAuObgBA8gBAPgBAZgCBKAClQTCagYQABgHGB7CaggQABgHGAoYHsICChAAGIAEGEMYigXCAGUQABiABMICBBAAGB7CagYQABgIGB6YAwCIBgGSBwMxLjOgB80JsgcDMC4zuAeMBA&sclient=img#vhid=eHmx0JP-9AavUM&vssid=mosaic

[70] « Google Colab : la force du cloud pour l'apprentissage automatique ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://datascientest.com/google-colab-tout-savoir>

[71] « NumPy ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://numpy.org/>

[72] « pandas - Python Data Analysis Library ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne].
 Disponible sur: <https://pandas.pydata.org/>

[73] « OS Module in Python with Examples | GeeksforGeeks ». Consulté le: 16 mai 2025.
 [En ligne]. Disponible sur: <https://www.geeksforgeeks.org/os-module-python-examples/>

[74] « PyTorch ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://pytorch.org/>

[75] « AlexNet – PyTorch ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur:
https://pytorch.org/hub/pytorch_vision_alexnet/

- [76] « alexnet - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zr5GZ3QW8nFGYVDuFS20QOgRBSM2g:1747400988270&q=alexnet&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5flcnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwlRh dNfno-ClRh0PKqyvFYyTkflfJOoyi6rL2ScSJ67dNoiLlma6nffqoENgGX1Qo-QK1HEFg3ItZnm6x0TVwu0vcGVKWcexg6trYxsbU4W-yOXrb9bpvWaw41YIQMMVvZPQCUC4uF8k_Itl4JP-ws_2BXbhez7iRlXdrIvwxTIJdPbtTztOEFA&sa=X&ved=2ahUKEwiBnL75h6iNAXWcSPEDHZIRO6oQtKgLegQIExAB&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=b3d4gQKX_xjreM&vssid=mosaic
- [77] S. Bangar, « VGG-Net Architecture Explained », Medium. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://medium.com/@siddheshb008/vgg-net-architecture-explained-71179310050f>
- [78] « VGGNet - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zrY2yvI67afqQ3obA5Xzl3Q2y-o_g:1747400712857&q=VGGNet&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5flcnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwlRh dNfno-ClRh0PKqyvFYyTkflfJOoyi6rL2ScSJ67dNoiLlma6nffqoENgGX1Qo-QK1HEFg3ItZnm6x0TVwu0vcGVKWcexg6trYxsbU4W-yOXrb9bpvWaw41YIQMMVvZPQCUC4uF8k_Itl4JP-ws_2BXbhez7iRlXdrIvwxTIJdPbtTztOEFA&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwi6r5T2hqiNAXVmQ_EDHU6rNGgQtKgLegQIFRAB&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=Qrgm9i6msWX6jM&vssid=mosaic
- [79] « ResNet (Residual Networks) expliqué | Ultralytics ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ultralytics.com/fr/glossary/residual-networks-resnet>
- [80] « ResNet - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zolt1sOfglgtC7m7MXiUjgvrBcPjw:1747401890224&q=ResNet

&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5f1cnRvJ3SHQcDVxkdpDyHwlRhDNfno-
ClRh0PKqyvFYyTkfleCoWIR5C1jUN_wgcDJ8Cdwgf887IFxRCsZbfrfzJNeHjWTo4tZj
qWjLBo-iu6kdXXHLi2Mov2Dk3vSJLyYUGSHwChkLxliLjfDuNMCYqVp9SqbWQ-
e8qhTyBoKcrIV8GXTAovAL1XfiFVVUWOLRL2Cl8tCwg&sa=X&sqi=2&ved=2ahU
KEwjNk8mni6iNAXXRS_EDHcjRKSyQtKgLegQIExAB&biw=1366&bih=607&dpr=1
#vhid=jMu3ciQ9ekdkwM&vssid=mosaic

[81] Redaction, « MobileNet, optimisation de la convolution pour les réseaux de neurones embarqués. », Quantmetry. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quantmetry.com/blog/mobilenet-optimisation-de-la-convolution-pour-les-reseaux-de-neurones-embarques/>

[82] « MobileNet - Recherche Google ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur:

https://www.google.com/search?sca_esv=9a5e0d52e8e6d667&rlz=1C1GCEA_enDZ1148DZ1152&sxsrf=AHTn8zpC-d_SFHmjv_FkNVZoUFqPDJVUlw:1747401993740&q=MobileNet&udm=2&fbs=ABzOT_BnMAgCWdhr5zilP5f1cnRvZiloEzC9Z2SN5Zmit1UHYF_iECit9HwlcacNSdLTkfbX1v4j5rOi8ow-5Wwm8MStlAAVflxeYNFyY6cDpSnNsCwh9hboRJSAAOlNuhW9eq646DRecdPImAyEtl__-3y_ZktDnrTHdLm4P_KhPCG9-sjQRoO5NvYh_xD7Ge-5mF8LUT-FLTjORyLgv31jspdYUd1EQ&sa=X&sqi=2&ved=2ahUKEwjhnvFYi6iNAXV1BNsEHWD2L6EQtKgLegQIEhAB&biw=1366&bih=607&dpr=1#vhid=AdE9L0RFHuJnWM&vssid=mosaic

[83] « Data Augmentation ou comment diversifier vos datasets ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.innovatiana.com/post/data-augmentation-for-ai>

[84] « resizing images for deep learning ». Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://kaggle.com/code/alrzsgh/resizing-images-for-deep-learning>

