

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

PEOPLE'S DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA

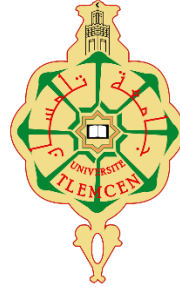
وزارة

التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

جامعة أبي بكر بلقايد
تلمسان

Aboubakr Belkaïd University – Tlemcen –
Faculty of TECHNOLOGY



THÈSE

Mémoire pour l'obtention d'un master

En : Génie Biomédical

Spécialité : Informatique Biomédicale et Hospitalière

Présenté par :

Tireche Abderrahmen

Draou Zineb

Sujet

**Conception d'un système d'aide au diagnostic de la maladie cœliaque par
une méthode d'apprentissage artificielle (CELIA SCAN)**

Encadré par : Dr. Hamza Cherif Souaad

Co-Enc : Dr. Kazi Tani Lamia

Membres du jury :

- Pr. Khemis Kamila (Présidente)
- Dr. Gaouar adil (Examineur)

2023/2024

Abstract

CeliaScan software presented in this thesis aims to enhance the efficiency and accuracy of diagnosing celiac disease within medical institutions. Designed to address common challenges in the field of gastroenterology, the CeliaScan software offers comprehensive functionalities, including advanced image processing, AI-assisted diagnosis, user-friendly interfaces, and seamless integration with existing medical systems. By streamlining these processes, the software significantly improves diagnostic workflows, reduces the burden on medical professionals, and enhances patient care.

Despite the numerous advantages, traditional diagnostic systems for celiac disease face several challenges, such as inconsistent diagnostic criteria, limited access to advanced diagnostic tools, and the need for specialized expertise. This thesis provides a detailed analysis of these issues and discusses solutions to overcome them through the implementation of CeliaScan.

Overall, this thesis demonstrates the vital role of AI-assisted diagnostic software in modernizing gastroenterology departments and underscores its potential to significantly contribute to the medical field. This work provides a comprehensive overview of the software's capabilities and its impact on healthcare delivery.

Key words: CeliaScan, Celiac Disease, Gastroenterology, Duodenum, Small Intestine, Gluten, Villous Atrophy, Biopsy, Endoscopy, CNN (Convolutional Neural Networks), Image Preprocessing, Image Segmentation, Cuckoo Search Algorithm, Advanced Image Processing, AI-Assisted Diagnosis, SVM (Support Vector Machine) ,ResNet18.

Résume

Logiciel CeliaScan présenté dans cette thèse vise à améliorer l'efficacité et la précision du diagnostic de la maladie cœliaque au sein des établissements médicaux. Conçu pour répondre aux défis courants dans le domaine de la gastroentérologie, le logiciel CeliaScan offre des fonctionnalités complètes, y compris le traitement avancé des images, le diagnostic assisté par IA, des interfaces conviviales et une intégration transparente avec les systèmes médicaux existants. En rationalisant ces processus, le logiciel améliore considérablement les flux de travail diagnostiques, réduit la charge des professionnels de la santé et améliore les soins aux patients.

Malgré ses nombreux avantages, les systèmes de diagnostic traditionnels pour la maladie cœliaque rencontrent plusieurs défis, tels que des critères de diagnostic incohérents, un accès limité aux outils de diagnostic avancés et la nécessité d'une expertise spécialisée. Cette thèse fournit une analyse détaillée de ces problèmes et discute des solutions pour les surmonter grâce à la mise en œuvre de CeliaScan.

Dans l'ensemble, cette thèse démontre le rôle essentiel des logiciels de diagnostic assisté par IA dans la modernisation des départements de gastroentérologie et souligne leur potentiel à contribuer de manière significative au domaine médical. Ce travail fournit un aperçu complet des capacités du logiciel et de son impact sur la prestation des soins de santé.

Mots clés : CeliaScan, maladie cœliaque, gastroentérologie, Duodénum, l'intestin grêle, gluten, Atrophie villositaire, biopsie, Endoscopie, CNN, Prétraitement des Images, Segmentation des Images, Algorithme Cuckoo Search, traitement avancé des images, diagnostic assisté par IA, SVM, ResNet18.

الملخص

يهدف برنامج في هذه الأطروحة إلى تحسين الكفاءة والدقة في تشخيص مرض السيلياك داخل المؤسسات الطبية. تم تصميم هذا البرنامج لمعالجة التحديات الشائعة في مجال أمراض الجهاز الهضمي، حيث يقدم وظائف شاملة تشمل معالجة الصور المتقدمة، التشخيص بمساعدة الذكاء الاصطناعي، واجهات سهلة الاستخدام، وتكامل سلس مع الأنظمة الطبية القائمة. من خلال تبسيط هذه العمليات، يُحسن البرنامج بشكل كبير سير العمل التشخيصي، ويقلل من عبء العمل على المتخصصين في الرعاية الصحية، ويحسن رعاية المرضى. على الرغم من المزايا العديدة، فإن الأنظمة التقليدية لتشخيص مرض السيلياك تواجه عدة تحديات، مثل معايير التشخيص غير المتسقة، والوصول المحدود إلى الأدوات التشخيصية المتقدمة، والحاجة إلى خبرة متخصصة. توفر هذه الأطروحة تحليلاً مفصلاً لهذه المشاكل وتناقش الحلول للتغلب عليها من خلال تطبيق برنامج. بشكل عام، تُظهر هذه الأطروحة الدور الأساسي لبرامج التشخيص بمساعدة الذكاء الاصطناعي في تحديث أقسام أمراض الجهاز الهضمي، وتؤكد على إمكاناتها الكبيرة في المساهمة في المجال الطبي. يقدم هذا العمل نظرة شاملة على قدرات البرنامج وتأثيره على تقديم الرعاية الصحية.

التشخيص معايير مثل، تحديات عدة تواجه السيلياك مرض لتشخيص التقليدية الأنظمة فإن، العديدة المزايا من الرغم على الأطروحة هذه توفر. متخصصة خبرة إلى والحاجة، المتقدمة التشخيصية الأدوات إلى المحدود والوصول، المتسقة غير برنامج تطبيق خلال من عليها للتغلب الحلول وتناقش المشاكل لهذه مفصلاً تحليلاً

بشكل عام، تُظهر هذه الأطروحة الدور الأساسي لبرامج التشخيص بمساعدة الذكاء الاصطناعي في تحديث أقسام أمراض الجهاز الهضمي، وتؤكد على إمكاناتها الكبيرة في المساهمة في المجال الطبي. يقدم هذا العمل نظرة شاملة على قدرات البرنامج وتأثيره على تقديم الرعاية الصحية.

، مرض السيلياك، CeliaScan الكلمات الدالة: معالجة الصور المتقدمة، مرض السيلياك، أمراض الجهاز الهضمي، المرضى أمراض الجهاز الهضمي، الاثنى عشر، الأمعاء الدقيقة، الجلوتين، ضمور الزغابات، خزعة، تنظير داخلي، الشبكات العصبية، المعالجة المسبقة للصور، تقسيم الصور، خوارزمية البحث عن الدغافيل، المعالجة المتقدمة للصور، التشخيص (CNN) الالتفافية ResNet18، المدعوم بالذكاء الاصطناعي، آلة الدعم التقديري

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu pour Son guidage constant et Ses bénédictions tout au long de ce parcours. Sans Son soutien divin, nous n'aurions pas atteint cette étape importante.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos familles pour leur soutien moral et financier indéfectible pendant nos études.

Nous sommes sincèrement reconnaissants envers le Département de Génie Biomédical et tous les professeurs pour leur contribution inestimable à notre parcours académique.

Un merci spécial à notre Examineur, Dr. Gaouar adil, et à notre Présidente, Pr. Khemis Kamila, pour avoir accepté gracieusement d'évaluer notre travail, c'est vraiment un honneur pour nous.

Un grand merci au Centre I2E pour la formation et l'orientation qu'ils nous ont fournies afin de compléter notre Business Model Canvas et améliorer nos connaissances économiques.

Nous tenons également à remercier chaleureusement notre encadreur, Dr. Hamza Cherif Souaad. Son inspiration et ses conseils opportuns ont été cruciaux pour mener à bien notre recherche de master. Son soutien a dépassé nos attentes.

Nous souhaitons également adresser nos remerciements à notre Co-Encadrante, Dr. Kazi Tani Lamia, et à Dr. Zineb Aziza Elaouabe pour leur aide précieuse tout au long de notre projet.

Un grand merci à Kassoul.A pour nous avoir mis en contact avec sa sœur, nutritionniste, qui nous a fourni des insights alimentaires essentiels pour notre recherche. Un merci spécial également à son frère, Kassoul.O, cardiologue à l'Hôpital Mustapha Bacha, pour son assistance dans la recherche de jeux de données pertinents et pour nous avoir présentés à des gastroentérologues à Blida.

Nous exprimons notre gratitude envers Dr. Gaouar Fethallah, Hépto-Gastro-Entérologue, pour son soutien généreux, ses conseils et ses contributions aux jeux de données, qui ont considérablement enrichi notre recherche.

Nous remercions également Dr. Boumahdi Sami, Gastro-entérologue, pour son temps précieux, ses contributions aux jeux de données et son accompagnement tout au long de notre parcours de recherche. De plus, nous reconnaissons l'aide apportée par Dr. Hassen Khodja, Gastro-entérologue, pour enrichir notre ensemble de données.

Enfin, nous apprécions les précieuses contributions de Dr. Tiir, Gastro-pédiatre, qui ont enrichi notre compréhension des aspects pédiatriques liés à notre recherche.

Enfin, nous remercions nos amis pour leur soutien indéfectible.

Merci à tous.

Table des matières

Abstract.....	1
Résumé	2
المخلص	3
Remerciements.....	4
Liste des Tables.....	9
Liste des Figure.....	10
Introduction Générale	12
Chapitre 1 : Maladie de cœliaque	13
Introduction.....	14
I.1 Pathologie de la maladie cœliaque	14
I.1.1 Définition	14
I.1.2 Historique	15
I.1.3 Protéine du gluten.....	16
I.1.4 Les causes de la maladie cœliaque	16
I.2 L'intestin grêle.....	16
I.2.1 Anatomie et fonctionnement de l'intestin grêle	17
I.2.2 Les villosités intestinales.....	17
I.2.3 Atrophie villositaire.....	18
I.4 Diagnostic.....	19
I.4.1 Les tests sanguins	19
I.4.2 Endoscopie.....	19
I.4.3 La biopsie	20
I.4.4 Test de restriction alimentaire.....	20
I.5 Système d'aide au diagnostic ou cad ou solution basée sur l'IA	21
Conclusion	21
Chapitre 2 : Conception et Implémentation de Celia Scan	22
Introduction.....	23
II.1 Conception de notre solution : CeliaScan.....	23
II.2 CeliaScan : L'Intelligence artificielle	25
II.2.1 Types d'algorithmes d'apprentissage	25
II.2.2 Introduction à l'Apprentissage Profond et aux CNN.....	26
II.2.3 Intégration de l'IA dans l'Analyse et le Traitement des Images Médicales.....	29
II.2.4 CeliaScan : Approche automatique pour la détection de l'atrophie villositaire	30
II.3 CeliaScan : Conception	36
II.3.1 Étude de l'existant.....	37
II.3.2 Identification des besoins	38
II.3.3 Objectif.....	38

II.3.4	Les écrans et Fonctionnalités de l'application	38
II.3.5	Conception de Bases de Données	42
	CONCLUSION.....	42
Chapitre 3 :	Évaluation et Résultats	43
Introduction.....		44
III.1	Matériel et Logiciel Utilisés	44
III.1.1	Matériel	44
III.1.2	Logiciel	44
III.1.3	Classification du Dataset.....	44
III. 2	Validation de notre Modèle	45
III.2.1	Métriques de Performance en IA.....	45
III.2.1	Résultats.....	46
III.3	Présentation de CeliaScan	46
III.3.1	Connexion	47
III.3.2	Accueil	47
III.3.3	Patient.....	48
III.3.4	Cabinet.....	50
III.3.5	CeliaScan	52
III.3.6	Compte.....	53
III.3.7	L'application de soignants	53
Conclusion		54
Chapitre 4 :	Business Model Canvas	55
Introduction.....		56
IV.1	Value Proposition	56
IV.1.1	Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?.....	56
IV.1.2	Comment notre outil de diagnostic améliore-t-il la précision du diagnostic de la maladie cœliaque ?.....	56
IV.1.3	Qu'est-ce qui distingue votre système de gestion d'armoires des solutions .. existantes ?	57
IV.1.4	Comment garantisiez-vous la sûreté et la sécurité des données des patients ?	57
IV.1.5	Comment notre application gère-t-elle les données de l'appareil d'endoscopie garantir qu'aucune donnée n'est perdue ?	pour 57
IV.1.6	Quels sont les avantages cliniques de l'utilisation de votre outil de diagnostic maladie cœliaque ?	de la 58
IV.1.7	En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?	58
IV.2	Segments de clients.....	58
IV.2.1	Quels sont nos clients principaux ?	58
IV.2.2	Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?.....	59
IV.2.3	Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts ?	60

IV.3 Relation avec les clients	61
IV.3.1 Service et assistance de haute qualité	61
IV.3.2 Parcours client	61
IV.3.3 L'intégration	62
IV.3.4 Programme d'affiliation	62
IV.4 Canaux de distribution	62
IV.4.1 Installation et déploiement	62
IV.4.2 Engagement et commentaires des clients	63
IV.4.3 Advertising and Affiliation	63
IV.4.4 Commodité de paiement	63
IV.4.5 Support client et gestion des relations	63
IV.5 Partenaires clés	63
IV.5.1 Qui sont nos partenaires clés ?	63
IV.5.2 De quelles ressources clés avons-nous besoin de la part de nos partenaires	63
IV.5.3 Comment envisageons-nous de collaborer avec nos partenaires ?	64
IV.5.4 Pourquoi nous engageons-nous dans ces partenariats ?	65
IV.6 Activités clés	65
IV.6.1 Quelles activités sont essentielles pour fournir les meilleurs services à nos clients ?	65
IV.6.2 Comment validons-nous l'exactitude et la fiabilité de notre modèle d'IA pour les machines d'endoscopie, et quelles mesures sont prises pour l'intégrer de manière transparente dans la pratique clinique ?	66
IV.6.3 Quelles mesures sont prises pour améliorer la sécurité des données des médecins et des patients ?	66
IV.6.4 Comment pouvons-nous améliorer la communication et les services à la clientèle pour nos clients ?	67
IV.7 Ressources clés	67
IV.7.1 Accords de partenariat avec les fabricants de machines d'endoscopie	67
IV.7.2 Ressources de calcul haute performance	68
IV.7.3 Expertise en sécurité et cryptage des données	68
IV.7.4 Protection du droit d'auteur et de la propriété intellectuelle	68
IV.7.5 Budget publicité et marketing	68
IV.7.6 Bibliothèques UI/UX et expertise en conception	68
IV.7.7 Solutions de stockage de données	68
IV.7.8 Expertise en gestion de bases de données	68
IV.7.9 Collaboration avec les professionnels de santé	69
IV.8 Charges et coûts	69
IV.8.1 Charges et coûts	69
IV.8.2 Frais de réalisation	70
IV.8.3 Objectif	70
IV.9 Revenus	70

pour mene

Conclusion	71
Conclusion Générale.....	72
Références.....	73

Liste des Tables

Tableau 1:Les catégories de la maladie cœliaque [3]	15
Tableau 2:Les différents stades de l'atrophie villositaire	19
Tableau 3:Médecins contributeurs à l'ensemble de données	31
Tableau 4:Vue d'ensemble du jeu de données d'images et de leur source d'acquisition	31
Tableau 5:Caractéristiques des Images Disponibles et des Appareils d'Endoscopie...	31
Tableau 6:Résultats des différents modèles	46
Tableau 7:Résultats des modèles sur les 40 images de test.....	46
Tableau 8: Tarification mensuelle des services de stockage selon la taille et le volume des opérations [41]	69
Tableau 9:Tarification annuel des services de stockage selon la taille et le volume des opérations.....	69
Tableau 10:Frais de réalisation pour chaque structure	70
Tableau 11: Répartition des objectifs et des montants totaux selon la taille des applications	70
Tableau 12: Répartition des objectifs, pourcentages par application et montants totaux selon la taille des applications	70
Tableau 13: Répartition des frais maximisés selon la taille des applications	70

Liste des Figure

Figure 1: Comparaison entre un Intestin Grêle Sain et un Intestin Atteint par la MC [4]	15
Figure 2: Anatomie de l'intestin grêle [9]	17
Figure 3: villosités intestinales [12]	18
Figure 4: Atrophie villositaire [14]	18
Figure 5: Endoscopie digestive haute [16]	20
Figure 6: Biopsie du duodénum [18]	20
Figure 7: Flux de traitement de CeliaScan	24
Figure 8: Objectifs de CeliaScan	24
Figure 9: Réseaux de Neurones [23]	26
Figure 10: SVM [24]	26
Figure 11: Convolution [28]	27
Figure 12: Couche d'activation [27]	27
Figure 13: Pooling [27]	28
Figure 14: Couches Entièrement Connectées [27]	28
Figure 15: Couche Dense [27]	29
Figure 16: Les étapes suivies pour la détection de l'atrophie villositaire	30
Figure 17: Images bruitées [48]	31
Figure 18: Bulles [48]	32
Figure 19: Images floues [48]	32
Figure 20: Image Originale (Normal) [48]	32
Figure 21: Image Originale (Celiac) [48]	32
Figure 22: Image après Prétraitement (Normal) [48]	33
Figure 23: Image après Prétraitement (Celiac) [48]	33
Figure 24: Figure 23 Segmentée [48]	33
Figure 25: L'architecture de ResNet18 [35]	34
Figure 26: couche de convolution initiale de ResNet18 [35]	34
Figure 27: blocs résiduels de ResNet18 [35]	35
Figure 28: les étapes que nous suivons pour obtenir nos caractéristiques	35
Figure 29: Les quatre grandes parties de CeliaScan	37
Figure 30: cycle de vie itératif et incrémental [37]	37
Figure 31: Exactitude formule [38]	45
Figure 32: Rappel formule [39]	45
Figure 33: Spécificité formule [39]	45
Figure 34: Précision formule [38]	45
Figure 35: F1-Score formule [38]	45
Figure 36: ROC-AUC formule [40]	46
Figure 37: Interface de Connexion [49]	47
Figure 38: Interface d'Accueil [49]	48
Figure 39: Interface Patient [49]	48
Figure 40: exemple d'interface des informations pour patient [49]	49
Figure 41: Interface plan de soins du patient [49]	49
Figure 42: Interface historique du patient [49]	50
Figure 43: Interface historique des images pour patient [49]	50
Figure 44: Interface cabinet [49]	51
Figure 45: Interface pour ajouter/modifier questionnaire de recherche [49]	51
Figure 46: Interface Consultation Médicale [49]	52
Figure 47: Interface CeliaScan [49]	52
Figure 48: Interface compte [49]	53
Figure 49: Interface de Connexion pour aides-soignants [49]	54
Figure 50: Interface Accueil pour aides-soignants [49]	54

Liste des acronymes

MC : maladie cœliaque
LIE+ : lymphocytes intra-épithéliaux
tTG : antitransglutaminase
EMA : anti-endomysium
CAD : systèmes de détection assistée par ordinateur
IA : L'intelligence artificielle
CNN : Réseaux Neuronaux Convolutionnels
MLP : perceptron multicouche
SVM : Machine à vecteurs de support
SNN : Réseau de Neurones Siamois
ReLU : Rectified Linear Unit
Dr: Doctor
CLAHE: Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization
LBP : les motifs binaires locaux
HOG : l'histogramme des gradients orientés
SURF : les caractéristiques robustes accélérées
GUI : Graphical User Interface
MCD : Modèle Conceptuel de Données
MLD : Modèle Logique de Données
ROC: Receiver Operating Characteristic
AUC: Area Under the Curve
UI : interfaces utilisateur
HD : High Definition
SD: Standard Definition
ONNX: Open Neural Network Exchange
GPU : Graphics Processing Unit
EXE : Fichier exécutable
SDK: Software Development Kit
API: Application Programming Interface
UX : User Experience
DZD : Algerian Dinar
Go : Gigaoctet

Introduction Générale

La maladie cœliaque est une affection auto-immune déclenchée par une réaction au gluten, une protéine présente dans le blé, l'orge et le seigle. Cette maladie chronique affecte principalement l'intestin grêle, où elle provoque une inflammation et une atrophie des villosités intestinales, ce qui perturbe l'absorption des nutriments. Les symptômes peuvent varier considérablement d'une personne à l'autre, rendant le diagnostic complexe et souvent tardif. Les méthodes traditionnelles de diagnostic incluent des tests sérologiques et des biopsies de l'intestin grêle, qui sont invasifs et coûteux.

Avec l'évolution rapide des technologies de l'information et de la communication, l'intelligence artificielle (IA) offre des solutions innovantes pour améliorer le diagnostic médical. L'application de l'IA dans le domaine de la gastro-entérologie, et plus particulièrement dans le diagnostic de la maladie cœliaque, promet d'augmenter la précision, de réduire le temps nécessaire pour obtenir un diagnostic et de minimiser l'invasivité des procédures.

Ce mémoire se concentre sur le développement de CeliaScan, un système de diagnostic assisté par ordinateur (CAD) qui utilise des techniques avancées d'IA pour analyser les images endoscopiques du duodénum. CeliaScan vise à aider les gastro-entérologues à prédire la présence d'atrophie villositaire et à identifier les meilleurs endroits pour effectuer des biopsies, optimisant ainsi le processus de diagnostic.

- **Chapitre 1** : Ce chapitre fournit une vue d'ensemble de la maladie cœliaque, de ses symptômes, de ses méthodes de diagnostic actuelles et des défis associés. Il explore également les progrès de l'IA dans le domaine médical et ses applications potentielles pour améliorer les diagnostics.
- **Chapitre 2** : Ce chapitre détaille la conception et le développement de CeliaScan, en expliquant les techniques de traitement d'images utilisées, les algorithmes d'apprentissage automatique implémentés, et l'architecture du système. Il décrit également le processus de collecte et de prétraitement des données endoscopiques nécessaires pour entraîner les modèles.
- **Chapitre 3** : Ce chapitre présente les résultats des tests et des évaluations de CeliaScan, comparant les performances des différents modèles de classification utilisés. Il discute des avantages et des limitations du système, ainsi que des perspectives futures pour son amélioration et son intégration dans la pratique clinique.
- **Chapitre 4** : Ce chapitre explore les ressources stratégiques clés, les coûts associés, les objectifs de vente, et les prévisions de revenus pour le projet CeliaScan. Il met en avant les partenariats avec les fabricants d'endoscopes, l'infrastructure informatique pour l'IA, la sécurité des données, le marketing digital, l'optimisation UI/UX, et la gestion des données.

En synthèse, ce mémoire met en lumière le potentiel des technologies d'IA pour révolutionner le diagnostic de la maladie cœliaque, offrant des solutions plus précises, rapides et moins invasives, contribuant ainsi à une meilleure prise en charge des patients.

Chapitre 1 : Maladie de cœliaque

Introduction

Aujourd'hui, malgré les avancées en technologie médicale et en recherche, le diagnostic précis et rapide des maladies demeure un défi majeur dans les soins de santé modernes. Un nombre significatif de patients souffrent encore de diagnostics erronés ou tardifs, ce qui entraîne des souffrances prolongées, une aggravation des symptômes et une pression accrue sur les ressources de santé. L'identification de certaines maladies est compliquée par des symptômes ambigus qui nécessitent des tests spécifiques pour être détectés. En outre, les méthodes traditionnelles de diagnostic, souvent longues et complexes, impliquent des procédures invasives, des interprétations expertes et des examens de laboratoire approfondis, demandant parfois des dizaines d'heures pour obtenir des résultats définitifs. De plus, certains symptômes peuvent ne se manifester qu'à un stade avancé de la maladie, telle que la maladie cœliaque (MC) qui est considérée comme l'une des maladies les plus difficiles à diagnostiquer. Caractérisée par une réaction immunitaire anormale au gluten. En Algérie, les statistiques montrent une prévalence croissante de la maladie cœliaque, avec environ 1 % de la population affectée [1], ce qui souligne l'importance d'un diagnostic précis et rapide.

Dans ce contexte, dans ce chapitre nous discuterons de la maladie cœliaque, en explorant ses symptômes, son diagnostic et son impact sur l'anatomie du duodénum et des villosités. Nous examinerons les changements physiologiques qui se produisent dans la muqueuse intestinale et les méthodes diagnostiques utilisées pour identifier cette condition. De plus, nous aborderons les recherches actuelles et les options de traitement disponibles pour la gestion de la maladie cœliaque.

I.1 Pathologie de la maladie cœliaque

I.1.1 Définition

La maladie cœliaque est une affection auto-immune courante déclenchée par une réaction au gluten, un ensemble de protéines présentes dans le blé, l'orge et le seigle. Cette maladie touche principalement l'intestin grêle et est souvent qualifiée d'épidémie silencieuse, car la majorité des personnes atteintes ne sont jamais diagnostiquées au cours de leur vie. Elle se manifeste par une inflammation de la muqueuse du duodénum et de la partie descendante de l'intestin grêle. À mesure que la maladie progresse, la muqueuse intestinale perd ses villosités, essentielles pour l'absorption des nutriments, et développe une hyperplasie des cryptes entériques, ce qui réduit la capacité d'absorption, entraînant une perte de poids et de la diarrhée [2]. Toutefois, les symptômes de la maladie cœliaque varient grandement, rendant son diagnostic précis particulièrement complexe. La plupart de ces problèmes peuvent être évités ou inversés en suivant un régime sans gluten à vie. La maladie cœliaque peut être classée en trois catégories selon l'Organisation mondiale de gastroentérologie [3] :

Catégories	Description
Classique	Cette forme se caractérise par des signes évidents de malabsorption, comme la perte de poids et la diarrhée.
Non classique	Dans ce cas, les patients présentent des symptômes gastrointestinaux légers sans signes évidents de malabsorption, ou des symptômes qui ne semblent pas être liés au système digestif.
Silencieuse	Également appelée maladie cœliaque asymptomatique, cette forme ne présente pas de symptômes apparents, mais les patients montrent une atrophie villositaire dans l'intestin grêle.

Tableau 1: Les catégories de la maladie cœliaque [3]

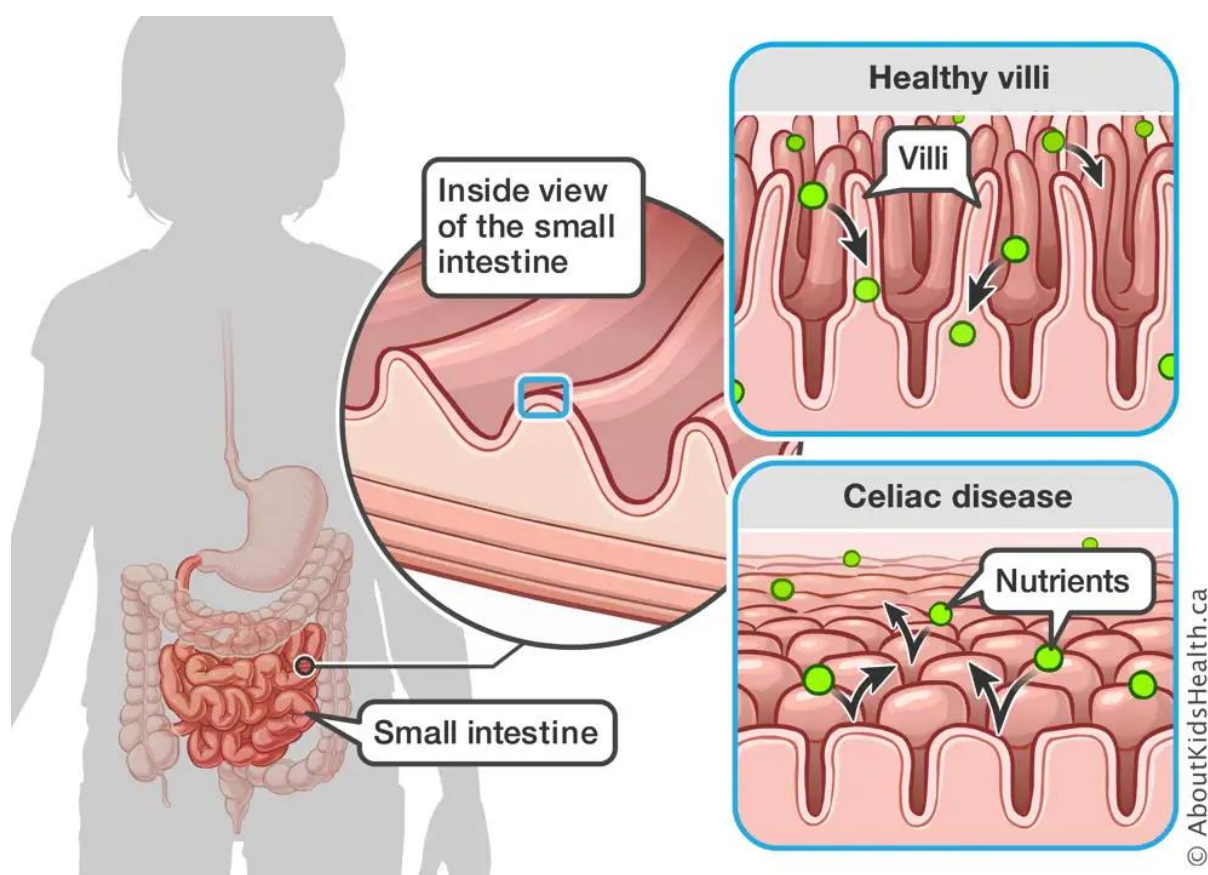


Figure 1: Comparaison entre un Intestin Grêle Sain et un Intestin Atteint par la MC [4]

I.1.2 Historique

L'origine du mot cœliaque vient du grec Koiliakos, qui signifie abdomen [2]. Le médecin anglais Samuel Gee est souvent reconnu comme le premier à avoir décrit la maladie cœliaque dans son célèbre article intitulé « On the Celiac Affection », publié dans le « St. Bartholomew's Hospital Report » en 1888. Cependant, dès le II^e siècle avant Jésus-Christ, le médecin romain Arétée de Cappadoce avait déjà décrit la maladie cœliaque et introduit sa nomenclature, bien avant que cette condition ne soit largement comprise.

La toxicité du gluten a été mise en évidence par la pédiatre néerlandaise Willem Karel Dicke en 1941. Dans les années 1980, la présence d'anticorps circulants a été découverte, et l'association avec un phénotype HLA a été établie en 1989. L'identification clé des anticorps dirigés contre la transglutaminase II, survenue il y a environ dix ans, a permis des avancées significatives dans la compréhension de la physiopathologie de la maladie et dans son diagnostic. Depuis une dizaine d'années, plus de 100 peptides toxiques du gluten ont été identifiés (Mouterde et al. 2008) [5].

I.1.3 Protéine du gluten

Le gluten est un mélange de protéines, principalement de gliadine et de gluténine, présentes dans les céréales telles que le blé, l'orge et le seigle [6]. Chez les individus atteints de la maladie cœliaque, la gliadine déclenche une réponse immunitaire qui endommage la muqueuse de l'intestin grêle. Cette réponse immunitaire inappropriée conduit à une inflammation et à une destruction des villosités intestinales, perturbant ainsi l'absorption normale des nutriments.

I.1.4 Les causes de la maladie cœliaque

Les causes de la maladie cœliaque sont multiples, impliquant différents facteurs influençant son développement. Parmi ceux-ci, on trouve :

- **Facteurs environnementaux** : Bien que la génétique soit un facteur majeur, les influences environnementales jouent également un rôle crucial dans le développement de la maladie cœliaque. Ces facteurs incluent la quantité et le moment de l'exposition au gluten durant la petite enfance, les infections gastro-intestinales, ainsi que d'autres éléments pouvant affecter la santé intestinale et la fonction immunitaire [7].
- **Événements déclencheurs** : La maladie cœliaque peut parfois être activée ou révélée à la suite d'événements spécifiques tels qu'une intervention chirurgicale, une grossesse, un accouchement, des infections virales ou un stress émotionnel intense. Ces situations peuvent agir comme des catalyseurs chez les individus génétiquement prédisposés à cette maladie [7].

Cela contribue à la progression de la maladie dans le corps humain, entraînant les symptômes suivants :

- **Anémie** : due à une malabsorption du fer et des vitamines.
- **Ostéoporose** : résultant d'une carence en calcium et en vitamine D.
- **Infertilité et fausses couches** : en raison de déficits nutritionnels.
- **Risque accru de certains cancers** : notamment le lymphome intestinal.
- **Troubles neurologiques** : comme l'ataxie et la neuropathie périphérique.
- **Diarrhée chronique** : avec des selles grasses, connue sous le nom de stéatorrhée, due à la malabsorption des graisses.

I.2 L'intestin grêle

La maladie cœliaque se manifeste spécifiquement dans l'intestin, affectant principalement le duodénum et les villosités intestinales. L'intestin grêle est une partie cruciale du tube digestif où se déroule la majeure partie de la digestion et de l'absorption des nutriments. Il est situé entre l'estomac et le gros intestin.

I.2.1 Anatomie et fonctionnement de l'intestin grêle

L'intestin grêle est un organe long et étroit du système digestif, mesurant environ 6 à 7 mètres de long chez un adulte [8]. Il joue un rôle crucial dans la digestion et l'absorption des nutriments. Il est divisé en trois sections principales :

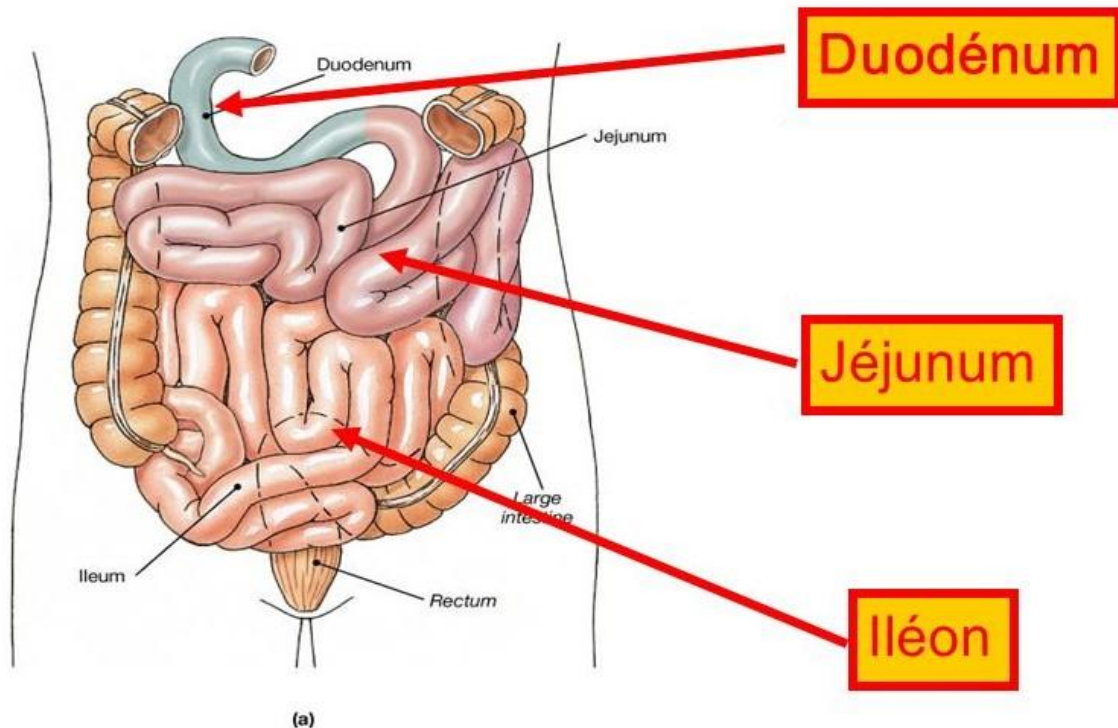


Figure 2: Anatomie de l'intestin grêle [9]

- **Duodénum** : La première partie de l'intestin grêle, qui est courte mais essentielle pour le début de la digestion. Le duodénum reçoit les sécrétions biliaires du foie et le suc pancréatique, qui contiennent des enzymes digestives cruciales pour la dégradation des graisses, des protéines et des glucides [10].
- **Jéjunum** : La section intermédiaire de l'intestin grêle, où se déroule la majeure partie de l'absorption des nutriments. Les parois du jéjunum sont tapissées de villosités et de microvillosités qui augmentent la surface d'absorption et facilitent le transfert des nutriments vers le système sanguin [10].
- **Iléon** : La partie terminale de l'intestin grêle, où l'absorption des nutriments se poursuit, notamment des vitamines B12 et des sels biliaires. L'iléon se termine à la valve iléo-caecale, qui régule le passage du contenu intestinal vers le gros intestin [10].

I.2.2 Les villosités intestinales

Les villosités intestinales sont de petites saillies de la muqueuse intestinale, mesurant entre 0,5 et 1 mm de hauteur. Leur forme et leur longueur varient selon la région spécifique de l'intestin grêle. Elles sont accompagnées des éléments suivants [11] :

- **Les glandes « cryptes » de Lieberkühn** : Constituent des glandes intestinales qui s'ouvrent entre les villosités, formant des invaginations de la muqueuse intestinale.
- **Les microvillosités du pôle apical des entérocytes** : Ce sont des extensions du domaine apical de ces cellules intestinales, visibles en microscopie électronique, se regroupant pour former un « plateau ».

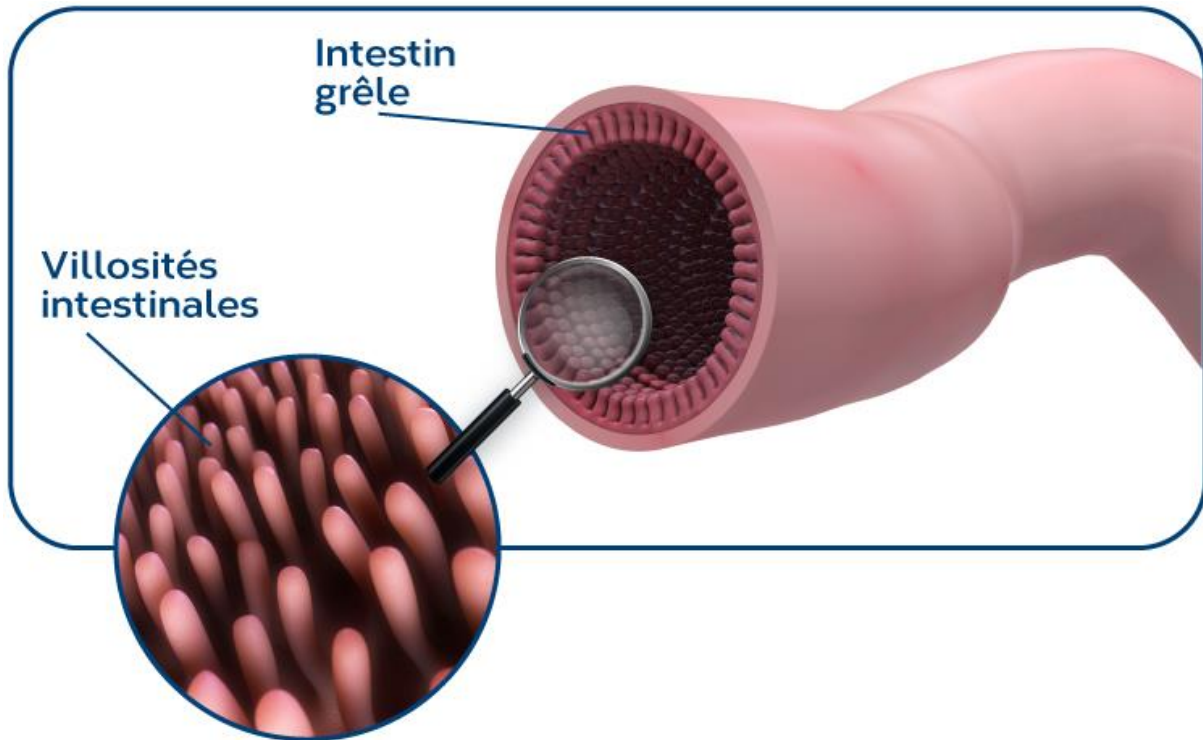


Figure 3:villosités intestinales [12]

I.2.3 Atrophie villositaire

Les villosités, formées de millions de projections en forme de doigts qui s'étendent depuis la muqueuse de l'intestin grêle, facilitent l'absorption efficace des nutriments provenant des aliments digérés. Lorsque ces villosités sont endommagées ou enflammées, elles s'aplatissent et perdent leur capacité d'absorption, entraînant ainsi une malabsorption des nutriments. Le gluten, et en particulier la gliadine, résiste aux endopeptidases présentes dans la muqueuse intestinale, laissant de grands fragments de peptides de gluten pouvant atteindre 33 acides aminés. Chez les personnes atteintes de la maladie cœliaque, une réponse immunitaire se déclenche contre ces peptides immunodominants. Les peptides de gliadine provoquent une réponse immunitaire qui endommage la muqueuse de l'intestin grêle, entraînant ainsi diverses manifestations de la maladie cœliaque [13] (Atrophie villositaire, Infiltration lymphocytaire, Hyperplasie des cryptes).

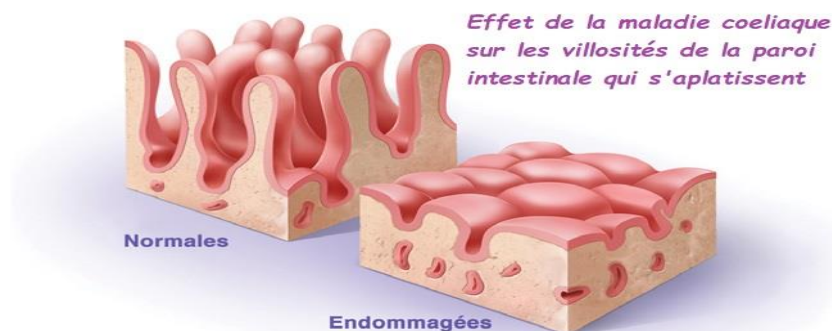


Figure 4:Atrophie villositaire [14]

L'atrophie villositaire peut être classée en plusieurs stades en fonction de la gravité des modifications histologiques observées dans la muqueuse intestinale. Cette classification permet de déterminer l'étendue des dommages et d'orienter les approches thérapeutiques. Voici les différents stades de l'atrophie villositaire [3] :

Stade	Description
Stade 0	Muqueuse pré-infiltrative avec une biopsie normale.
Stade 1	Augmentation des lymphocytes intra-épithéliaux (LIE+) tout en conservant une structure des villosités normale.
Stade 2	Raccourcissement de la structure des villosités, accompagné d'une augmentation des LIE+ et d'une hyperplasie des cryptes.
Stade 3a	Augmentation des LIE+ et hyperplasie des cryptes, Atrophie légère
Stade 3b	Augmentation des LIE+ et hyperplasie des cryptes, Atrophie marquée
Stade 3c	Augmentation des LIE+ et hyperplasie des cryptes, Muqueuse totalement aplatie

Tableau 2: Les différents stades de l'atrophie villositaire

I.4 Diagnostic

En pédiatrie, il est possible de diagnostiquer la maladie cœliaque uniquement sur la base des résultats sérologiques [15]. En revanche, chez les adultes, le processus diagnostique peut être similaire mais peut également inclure des étapes supplémentaires telles que :

I.4.1 Les tests sanguins

Les tests sanguins sont souvent le premier pas dans le diagnostic de la maladie cœliaque. Ils recherchent la présence d'anticorps spécifiques, tels que les anticorps anti-transglutaminase tissulaire (tTG) et les anticorps anti-endomysium (EMA). Un résultat positif indique généralement la nécessité de tests supplémentaires pour confirmer le diagnostic. Cependant, pour confirmer le diagnostic, une endoscopie avec biopsie de l'intestin grêle est souvent nécessaire.

I.4.2 Endoscopie

Une méthode ambulatoire effectuée sous sédation et anesthésie locale. Cette procédure permet d'explorer les organes et les cavités internes, comme l'intestin grêle, à l'aide d'un endoscope, un tube flexible équipé d'une lampe et d'une caméra à son extrémité. L'endoscope est inséré par la bouche du patient et dirigé vers l'intestin grêle, transmettant des images vidéo à un moniteur. Cela permet au médecin de visualiser et d'identifier les anomalies évidentes, telles que l'atrophie villositaire [16].

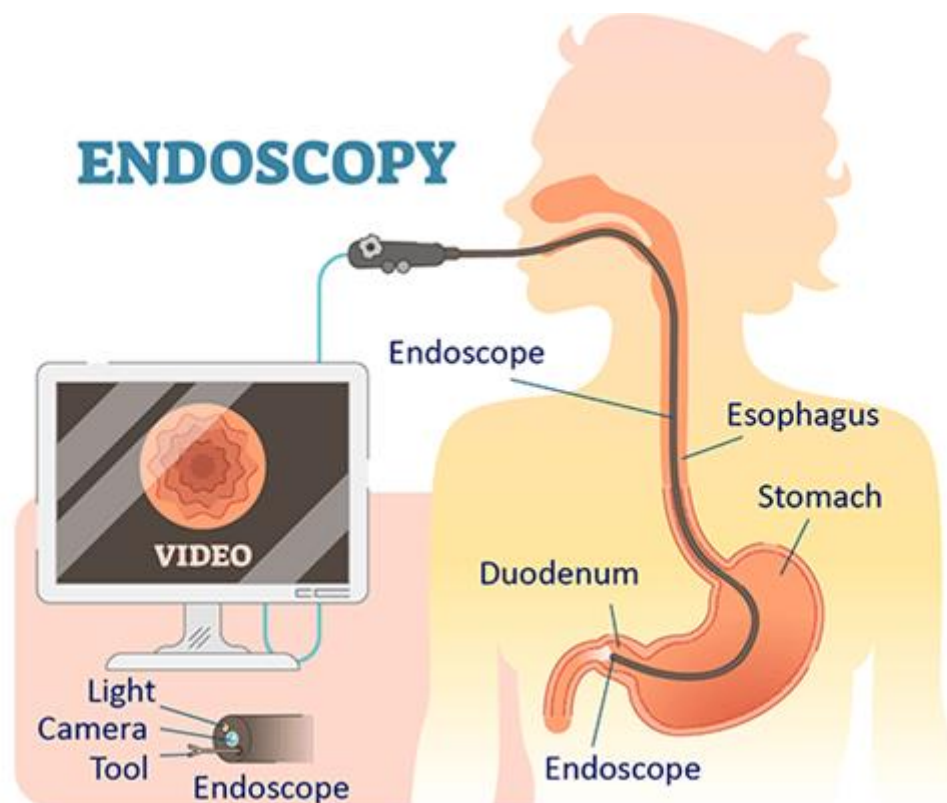


Figure 5: Endoscopie digestive haute [16]

I.4.3 La biopsie

La biopsie consiste à prélever de petits échantillons de la muqueuse de l'intestin grêle pour des examens médicaux. Ce prélèvement se fait à l'aide d'un endoscope. Les échantillons sont ensuite analysés au microscope par un pathologiste afin de détecter des signes de la maladie cœliaque [17].

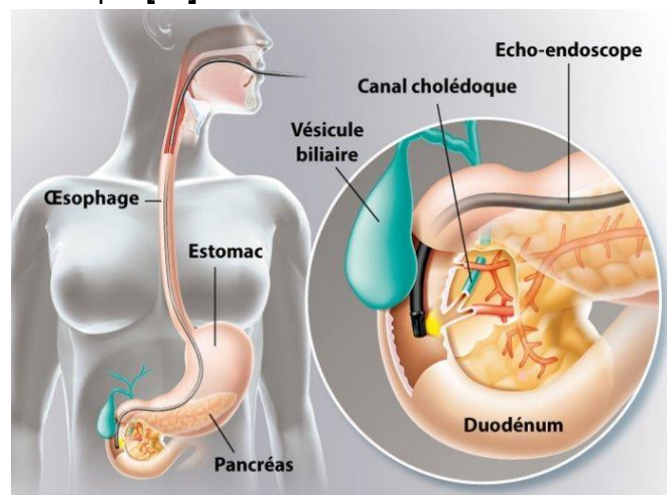


Figure 6: Biopsie du duodénum [18]

I.4.4 Test de restriction alimentaire

Un test de restriction alimentaire, sous la forme d'un régime strict sans gluten, peut être prescrit pour confirmer le diagnostic. Après une période sans gluten, une nouvelle

endoscopie est parfois réalisée pour observer les changements dans les altérations des villosités intestinales.

I.5 Système d'aide au diagnostic ou cad ou solution basée sur l'IA

Les systèmes de détection assistée par ordinateur (CAD) en endoscopie représentent une technologie émergente visant à accroître la précision diagnostique tout en économisant du temps et des ressources humaines, étant donné que 70 % des patients atteints de certaines maladies gastro-intestinales sont diagnostiqués à l'âge adulte et que le délai moyen entre l'apparition des symptômes et le diagnostic définitif est de 11 ans [19], et le temps et le coût pour le patient et les médecins, il est crucial d'innover pour améliorer le rendement diagnostique. L'intelligence artificielle (IA) a indéniablement transformé la pratique médicale dans divers domaines, y compris la gastro-entérologie. L'analyse d'image assistée par ordinateur a déjà été explorée pour les procédures endoscopiques, les échographies et les lames histologiques dans les pathologies luminales et hépato-bilio-pancréatiques. Dans ce contexte, les techniques d'IA ont prouvé leur efficacité dans l'amélioration des indicateurs de qualité des examens. L'objectif est d'améliorer la précision et l'efficacité des diagnostics à l'aide d'outils et de méthodes avancés. Cela permettrait non seulement d'assurer un diagnostic rapide et précis, mais aussi d'optimiser l'utilisation des ressources médicales, réduisant le fardeau sur les systèmes de santé. En priorisant les techniques diagnostiques non invasives, rapides et fiables, il devient possible d'identifier et de traiter les affections de manière plus efficace, ce qui conduit à de meilleurs résultats en matière de santé et à une meilleure qualité de vie pour les patients.

Conclusion

La maladie cœliaque représente un défi diagnostique significatif en raison de la diversité et de la non-spécificité de ses symptômes, ainsi que de la nécessité d'une confirmation précise pour guider un traitement approprié. Les erreurs de diagnostic peuvent entraîner des conséquences graves, notamment des traitements inappropriés, notamment des traitements inappropriés, une progression de la maladie et des complications évitables. Dans ce contexte, un système d'aide au diagnostic basé sur l'intelligence artificielle pourrait révolutionner la façon dont la maladie cœliaque est identifiée et gérée. En intégrant des algorithmes avancés et en analysant efficacement les données cliniques, ce système pourrait améliorer la précision, réduire les erreurs et accélérer le processus diagnostique. Ainsi, il répondrait non seulement à un besoin critique de diagnostic rapide et précis, mais contribuerait également à améliorer les résultats des patients et à réduire la charge économique et sociale associée à cette maladie chronique.

Chapitre 2 : Conception et Implémentation de Celia Scan

Introduction

Le diagnostic de la maladie cœliaque est un processus long et coûteux, laissant de nombreux patients non diagnostiqués et posant un problème de santé publique. L'intelligence artificielle (IA) offre des solutions prometteuses, notamment les systèmes de Détection Assistée par Ordinateur (CAD) qui aident les médecins dans l'imagerie médicale, comme le CAD-Eye pour la détection des polypes lors des coloscopies.

L'imagerie médicale, pilier de la médecine moderne, fournit des informations essentielles pour des diagnostics précis. Les systèmes CAD améliorent cette imagerie, conduisant à de meilleurs résultats pour les patients et une utilisation plus efficiente des ressources médicales.

Dans ce contexte, ce chapitre présente notre solution visant à améliorer le diagnostic de la maladie cœliaque à travers un système CAD. Ce système est conçu pour aider les gastroentérologues à analyser les images endoscopiques du duodénum afin de prédire la présence d'atrophie villositaire et d'identifier les meilleurs endroits pour effectuer des biopsies. Le développement de ce système repose sur des techniques avancées de traitement d'images et d'apprentissage automatique. Plusieurs études ont démontré l'efficacité des CAD dans le diagnostic automatisé de la maladie cœliaque. Par exemple, Wimmer et al [20]. Ont atteint un taux de classification d'environ 97 % en utilisant des architectures CNN profondes sur des images collectées par des endoscopes flexibles. De même, Zhou et al [21]. Ont utilisé le réseau GoogLeNet pour obtenir une sensibilité et une spécificité de 100 % dans la distinction entre les patients atteints de la maladie cœliaque et les témoins.

Le chapitre est divisé en deux sections : une vue d'ensemble de l'IA et de notre méthodologie pour créer le système CAD, et la conception spécifique de l'application intégrant ce système, montrant comment il assistera les médecins dans l'imagerie médicale.

II.1 Conception de notre solution : CeliaScan

Notre application, CeliaScan, est conçue pour analyser les images endoscopiques du duodénum et déterminer la présence ou l'absence d'atrophie villositaire. La décision finale revient au médecin, mais notre outil permet d'améliorer le diagnostic et le traitement, tout en permettant des économies de temps et d'argent grâce à des diagnostics précis. L'utilisation de notre application est simple : il suffit de charger l'image endoscopique suspecte, puis, à l'aide de techniques avancées d'analyse d'images, nous procédons au prétraitement et à l'amélioration de l'image pour segmenter et extraire les caractéristiques importantes. Enfin, notre modèle prédit la classe de l'image et fournit le résultat.

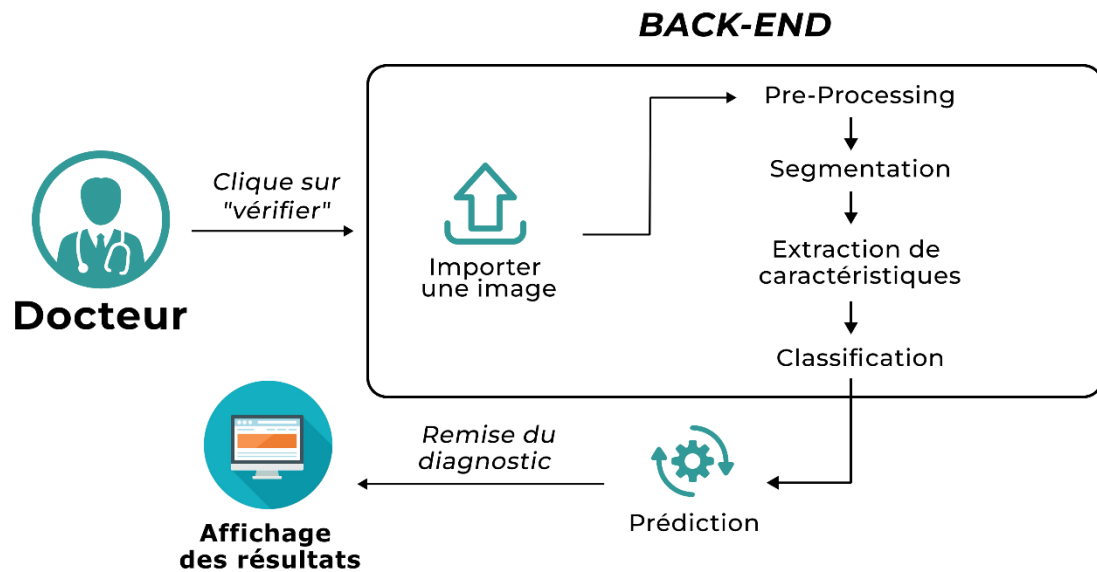


Figure 7:Flux de traitement de CeliaScan

En outre, notre application aidera les médecins à gérer leur cabinet de manière plus efficace en centralisant les informations des patients, y compris les images endoscopiques et les résultats d'analyse, pour un accès rapide et une gestion simplifiée. Elle facilitera également la coordination avec les soignants et réduira les tâches administratives grâce à la gestion numérique des dossiers et à l'automatisation des rapports, permettant ainsi aux médecins de se concentrer davantage sur les soins aux patients.

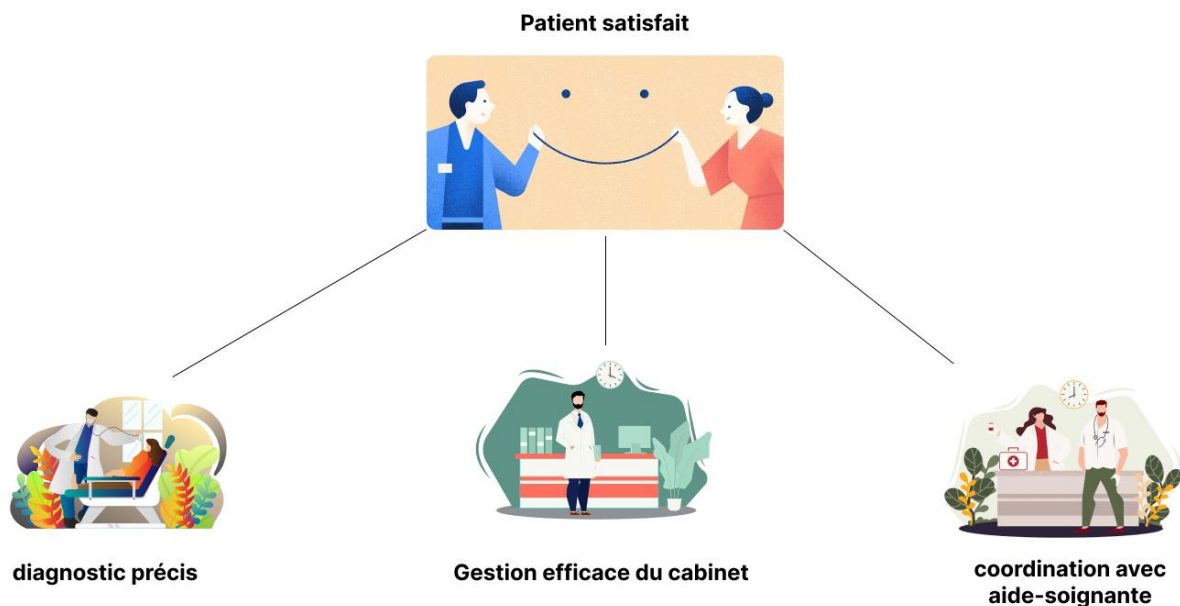


Figure 8: Objectifs de CeliaScan

II.2 CeliaScan : L'Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un domaine qui combine l'informatique et des ensembles de données robustes pour résoudre des problèmes complexes. Elle englobe les sous-domaines de l'apprentissage automatique (machine Learning) et de l'apprentissage profond (deep Learning), qui sont fréquemment mentionnés en conjonction avec l'intelligence artificielle. Ces disciplines utilisent des algorithmes sophistiqués pour créer des systèmes experts capables de faire des prédictions ou des classifications basées sur des données d'entrée.

L'IA joue un rôle de plus en plus crucial en permettant d'améliorer le diagnostic et le traitement des maladies grâce à une analyse précise et rapide des données médicales. Cette capacité à interpréter automatiquement les images médicales permet de faciliter et d'accélérer le diagnostic, améliorant ainsi la prise en charge des patients. Grâce aux techniques d'apprentissage profond, les systèmes continuent de s'améliorer en analysant de grandes quantités de données, rendant les diagnostics de plus en plus fiables et précis.

II.2.1 Types d'algorithmes d'apprentissage

Il existe cinq types d'apprentissage automatique : supervisé, non supervisé, auto-supervisé, par renforcement et semi-supervisé. Voici une brève description de chacun [22] :

- **Apprentissage supervisé** : Nécessite des données étiquetées. Les algorithmes apprennent à partir des exemples fournis pour faire des prédictions sur de nouvelles données.
- **Apprentissage non supervisé** : Ne nécessite pas de données étiquetées. Les algorithmes cherchent à trouver des structures ou des modèles sous-jacents dans les données.
- **Apprentissage auto-supervisé** : Utilise des données non étiquetées pour générer des étiquettes artificielles et entraîne les modèles de manière similaire à l'apprentissage supervisé.
- **Apprentissage par renforcement** : L'agent apprend à prendre des décisions en recevant des récompenses ou des pénalités en fonction des actions qu'il entreprend. Ne nécessite pas de données étiquetées.
- **Apprentissage semi-supervisé** : Combine une petite quantité de données étiquetées avec une grande quantité de données non étiquetées pour améliorer la précision du modèle.

Dans notre cas, nous avons besoin de données étiquetées ou d'une petite quantité de données étiquetées pour entraîner notre modèle. Voici quelques algorithmes bien connus :

- **Réseaux de Neurones** : Inspirés du cerveau humain, ces réseaux sont composés de couches de nœuds (neurones artificiels) et sont au cœur de l'apprentissage profond. Ils permettent de classer et de regrouper les données à grande vitesse, par exemple, pour la reconnaissance vocale ou d'images. Deux types principaux de réseaux de neurones sont le perceptron et le perceptron multicouche (MLP) [23].

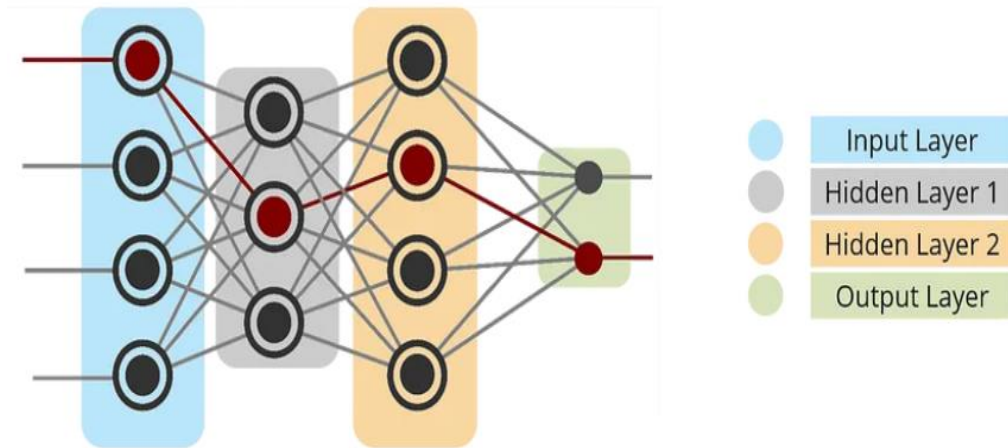


Figure 9: Réseaux de Neurones [23]

- **SVM (Machine à vecteurs de support)** : Est un algorithme d'apprentissage automatique supervisé qui peut être utilisé pour des problèmes de classification ou de régression. Cependant, il est principalement utilisé dans les problèmes de classification [24].

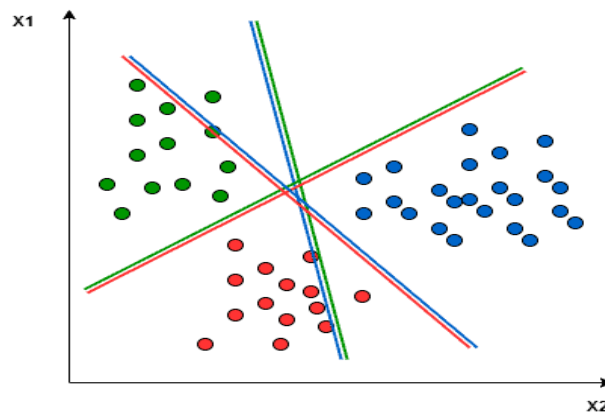


Figure 10:SVM [24]

- **Réseau de Neurones Siamois (SNN)** : Est une classe d'architectures de réseaux de neurones comprenant deux ou plusieurs sous-réseaux identiques. "Identiques" signifie qu'ils ont la même configuration, avec les mêmes paramètres et poids. Les réseaux siamois peuvent obtenir de meilleures prédictions en utilisant seulement quelques images. Leur capacité à apprendre à partir de très peu de données a rendu les réseaux siamois particulièrement populaires ces dernières années [25].

II.2.2 Introduction à l'Apprentissage Profond et aux CNN

L'apprentissage profond est un sous-ensemble de l'apprentissage automatique (ML), où des réseaux de neurones artificiels – des algorithmes conçus pour fonctionner comme le cerveau humain – apprennent à partir de grandes quantités de données [26].

Les réseaux neuronaux convolutionnels (CNN) sont un type de modèle d'apprentissage profond spécialement conçu pour traiter des données structurées en grille, comme les images [27]. Les CNN se composent de plusieurs types de couches qui jouent des rôles spécifiques :

- **Couches de Convolution** : Elles appliquent des filtres (ou noyaux) sur l'image d'entrée pour détecter des caractéristiques locales comme les bords, les textures, et les motifs. Ces filtres glissent sur l'image et produisent des cartes de caractéristiques en appliquant des opérations de convolution [28].

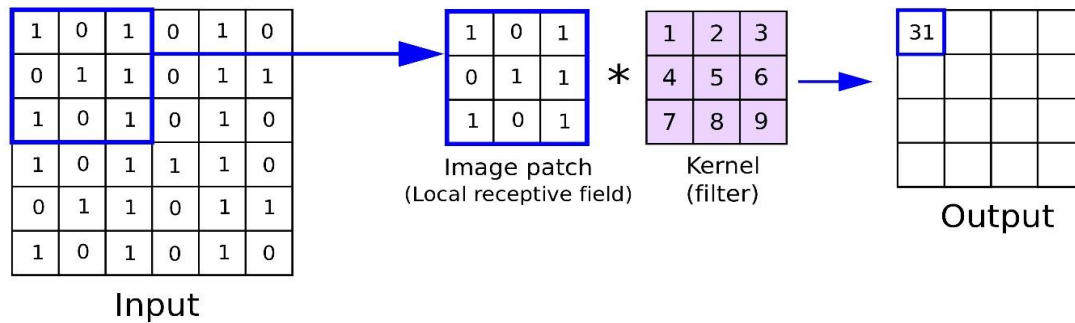


Figure 11: Convolution [28]

- **Couches d'Activation** : Après la convolution, une fonction d'activation comme ReLU (Rectified Linear Unit) est appliquée pour introduire la non-linéarité, permettant au réseau de modéliser des relations complexes [27].

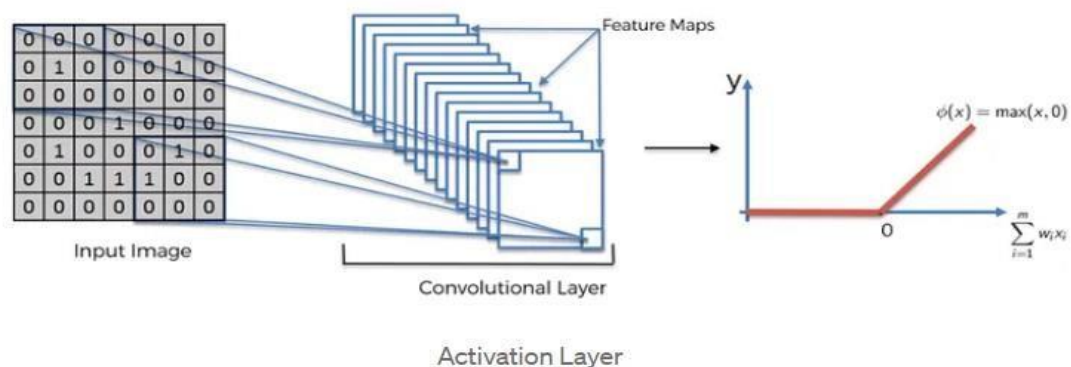


Figure 12: Couche d'activation [27]

- **Couches de Pooling** : Utilisées pour réduire la dimensionnalité des cartes de caractéristiques et rendre le modèle plus robuste aux variations des données d'entrée. Le pooling maximal est une méthode courante où seule la valeur maximale d'une région spécifique de la carte de caractéristiques est conservée [27].

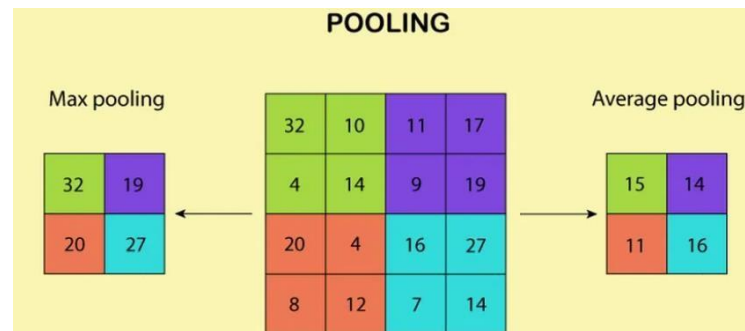


Figure 13: Pooling [27]

- **Couches Entièrement Connectées** : À la fin du réseau, les cartes de caractéristiques sont aplaties en un vecteur et passées à travers des couches entièrement connectées, similaires aux réseaux neuronaux traditionnels. Ces couches sont responsables des décisions finales ou des prédictions [27].

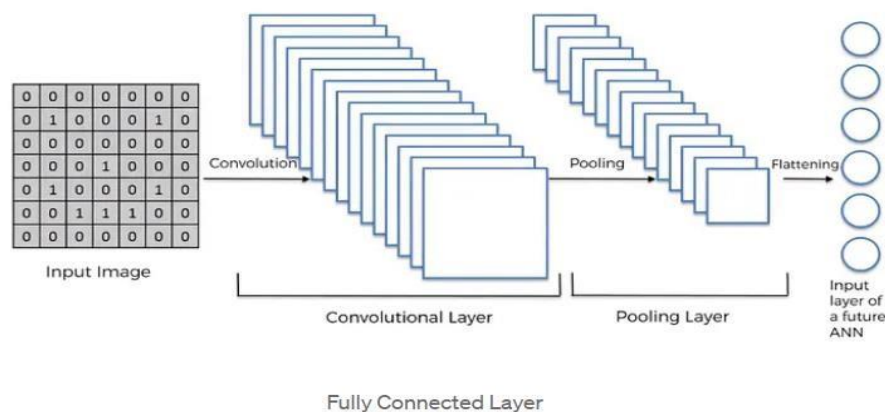


Figure 14: Couches Entièrement Connectées [27]

- **Couche de Normalisation** : La couche de normalisation effectue des opérations de normalisation, telles que la normalisation par lots ou la normalisation de couche, afin de garantir que les activations de chaque couche sont bien conditionnées et de prévenir le surapprentissage [27].
- **Couche de Dropout** : La couche de dropout est utilisée pour prévenir le surapprentissage en abandonnant de manière aléatoire des neurones pendant l'entraînement. Cela aide à s'assurer que le modèle ne mémorise pas les données d'entraînement mais généralise plutôt aux nouvelles données non vues [27].
- **Couche Dense** : Après que les couches de convolution et de pooling ont extrait des caractéristiques de l'image d'entrée, la couche dense peut être utilisée pour combiner ces caractéristiques et faire une prédiction finale. Dans un CNN, la couche dense est généralement la dernière couche et est utilisée pour produire les prédictions de sortie. Les activations des couches précédentes sont aplaties et transmises en entrée à la couche dense, qui effectue une somme pondérée des entrées et applique une fonction d'activation pour produire la sortie finale [27].

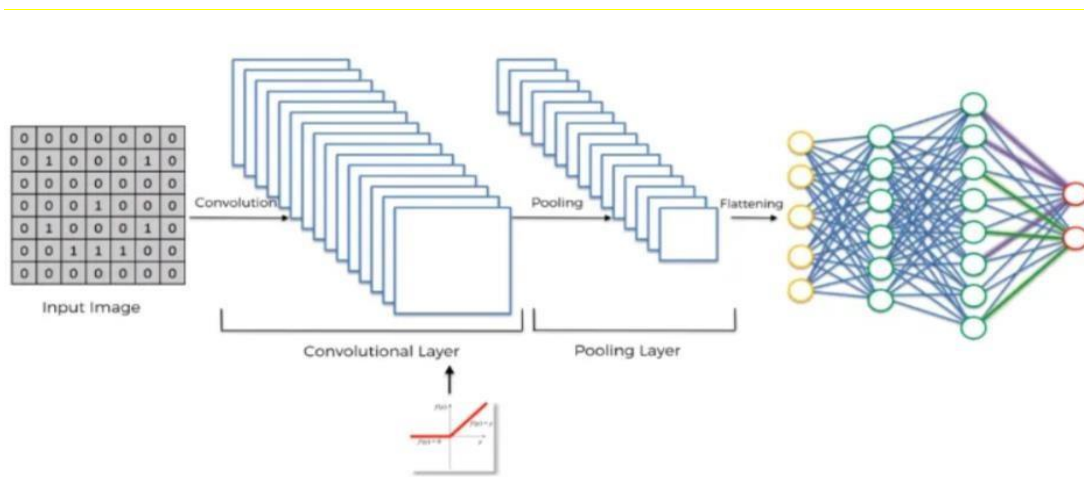


Figure 15: Couche Dense [27]

Ces composants permettent aux CNN de capturer efficacement des caractéristiques pertinentes des images, éliminant ainsi le besoin d'ingénierie manuelle des caractéristiques. Leur capacité à maintenir l'invariance spatiale leur permet de reconnaître les objets indépendamment de leur position, taille ou orientation, ce qui les rend idéaux pour la reconnaissance d'objets. Les CNN sont également robustes au bruit et aux variations de qualité d'image, adaptés aux applications réelles. De plus, ils facilitent le transfert d'apprentissage en utilisant des modèles pré-entraînés, réduisant ainsi les besoins en données et en ressources computationnelles pour former de nouveaux modèles.

II.2.3 Intégration de l'IA dans l'Analyse et le Traitement des Images Médicales

L'intégration de l'intelligence artificielle dans l'analyse et le traitement des images représente une avancée significative dans le domaine de la vision par ordinateur et de la médecine. Cette section explore comment la compréhension des types d'images et de leurs représentations numériques est essentielle pour développer des modèles d'IA robustes. En comprenant comment les données visuelles sont structurées et interprétées, il devient possible d'optimiser les algorithmes d'IA pour détecter avec précision des caractéristiques subtiles et complexes dans les images médicales.

- **Définition des Images et Types** : Une image est une représentation visuelle d'un objet, d'une scène, d'une personne ou d'une abstraction, souvent créée en capturant la lumière sur un capteur photographique ou numérique.
Dans le contexte des images numériques, les principaux types font référence à la manière dont les données de l'image sont représentées ou structurées. Voici les types fondamentaux :
 - **Grayscale (NG)** : Images composées de nuances de gris, allant du noir au blanc.
 - **RGB** : Images utilisant le modèle de couleurs Rouge, Vert et Bleu pour représenter les couleurs. Chaque pixel d'une image RGB est une combinaison de ces trois couleurs.
 - **Représentation Numérique des Images** : Discussion sur la façon dont les images sont représentées numériquement, y compris les valeurs des pixels et la résolution des images.

- **Prétraitement des Images** : Le prétraitement des images joue un rôle crucial dans le traitement et l'amélioration des données visuelles. Les images bruyantes peuvent affecter négativement les résultats finaux et conduire à des prédictions incorrectes. Afin d'optimiser les images avant de les soumettre à notre modèle pour classification, Parmi les filtres couramment utilisés :
 - **Filtres** : Description des filtres d'image couramment utilisés, tels que le flou gaussien, le filtre médian et les filtres de détection des contours comme Sobel et Canny [29].
 - **Prétraitement des Images** : Discussion sur les techniques telles que la normalisation, l'égalisation d'histogramme et la réduction du bruit pour améliorer la qualité des images et les préparer à une analyse ultérieure [30].
- **Segmentation des Images** : La segmentation d'images nous aide à identifier les zones sur lesquelles nous devons nous concentrer et à les rendre plus claires en divisant l'image en différentes régions distinctes. Cette technique est essentielle pour analyser efficacement les données visuelles. Voici quelques techniques de segmentation bien connues :
 - **Seuillage** : La méthode de segmentation la plus simple, où les valeurs des pixels sont divisées en différentes plages [31].
 - **Seuillage d'Otsu** : Une méthode de sélection de seuil automatique qui minimise la variance intra-classe [31].
 - **Segmentation Basée sur les Contours** : Utilise la détection des contours pour trouver les limites dans une image [32].
 - **Segmentation Basée sur les Régions** : Divise une image en régions basées sur des critères prédéfinis tels que l'intensité ou la couleur [31].
 - **Méthodes de Clustering** : Telles que le clustering k-means, qui groupe les pixels en fonction de leur similarité de caractéristiques [33].

II.2.4 CeliaScan : Approche automatique pour la détection de l'atrophie villositaire

L'atrophie villositaire, une caractéristique clé de la maladie cœliaque, peut être détectée automatiquement à l'aide de techniques avancées d'apprentissage automatique et de traitement d'images. Nous avons suivi une série d'étapes méthodiques, depuis la collecte des données jusqu'au déploiement du modèle final. Chaque étape est cruciale pour assurer la précision et la fiabilité du système, notamment pour l'analyse d'images endoscopiques dans le cadre de CeliaScan.

L'image ci-dessous illustre visuellement les étapes que nous avons suivies. Nous examinerons chacune de ces étapes en détail pour expliquer leur rôle dans le processus global d'analyse des images endoscopiques.

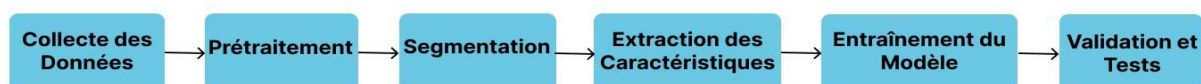


Figure 16: Les étapes suivies pour la détection de l'atrophie villositaire

- **Collecte des données** : Nous avons d'abord commencé par rechercher sur internet des ensembles de données publics d'images d'endoscopie du duodénum, mais nous n'avons trouvé qu'une quantité limitée de données et quelques vidéos qui ne suffisaient pas pour entraîner notre modèle. Nous avons alors collaboré avec les médecins suivants, qui nous ont fourni des images pour notre ensemble de données :

Docteur	Spécialité	Wilaya
Dr GAOUAR	Hépto-Gastro-Entérologue	Tlemcen
Dr BOUMAHDI	Gastro-entérologue	Blida
Dr Hassen khodja	Gastro-entérologue	Blida

Tableau 3: Médecins contributeurs à l'ensemble de données

Nous avons découvert un ensemble de données provenant d'un cabinet à Mascara, comprenant 311 images d'endoscopie du duodénum, de l'estomac et du côlon. Cependant, ces images étaient initialement non étiquetées, ce qui rendait difficile l'identification spécifique des images du duodénum. Heureusement, avec l'aide du Dr F. Gaouar de Tlemcen, nous avons pu identifier et classer ces images.

Docteur	Normal	Cœliaque	Doute	Non duodénum	Total
Dr GAOUAR	44	34	23	32	133
Dr BOUMAHDI	30	29	0	0	59
Dr Hassen khodja	0	12	0	0	12

Tableau 4: Vue d'ensemble du jeu de données d'images et de leur source d'acquisition

Caractéristiques des Images Disponibles et des Appareils d'Endoscopie :

Appareil d'endoscopie	Résolution	Taille
Fujifilm EG-600WR	HD	1280 x 1024
EG - 2990k (k121436)	HD	1296 x 990
Fujinon EPX-4400	SD	720 X 576

Tableau 5: Caractéristiques des Images Disponibles et des Appareils d'Endoscopie

- **Prétraitement** : Le prétraitement des images est une étape cruciale pour améliorer la qualité des données et faciliter les étapes de segmentation et de classification. Avant de pouvoir analyser les images endoscopiques du duodénum dans CeliaScan, il est essentiel de corriger les imperfections courantes, certaines peuvent contenir du bruit provenant des capteurs ou d'autres sources, tandis que d'autres peuvent être floues ou présenter des artefacts tels que des bulles. De plus, dans les images SD en particulier, le contraste peut être insuffisant, rendant les caractéristiques anatomiques cruciales moins visibles.

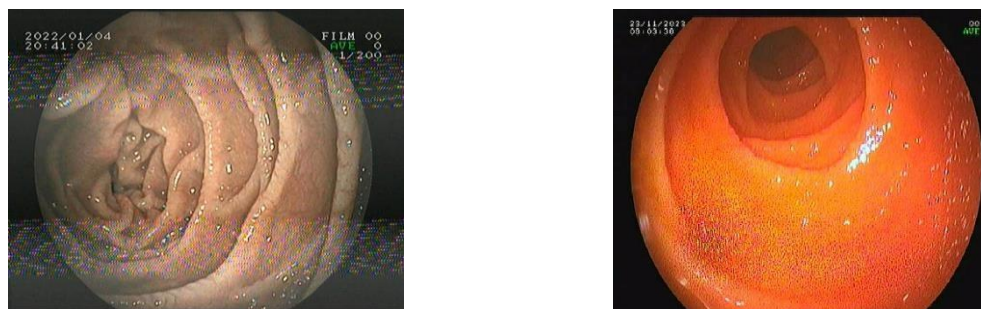


Figure 17: Images bruitées [48]



Figure 18: Bulles [48]

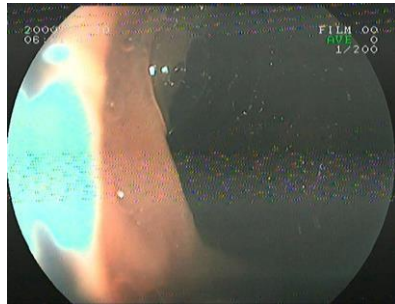


Figure 19: Images floues [48]

Les médecins cherchent souvent à identifier les zones plates dans le duodénum, indiquant l'absence de villosités. Ainsi, il est essentiel d'améliorer la détection des bords dans les images. Pour ce faire, les techniques suivantes ont été utilisées [34] :

- **Filtrage Médian** : Pour réduire le bruit présent dans les images. Un filtre médian de taille ajustée a été appliqué pour lisser les images tout en conservant les bords importants
- **CLAHE (Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization)** : Pour améliorer le contraste des images et rendre les caractéristiques importantes plus visibles. Cette technique adapte le contraste localement et prévient la suramplification du bruit.

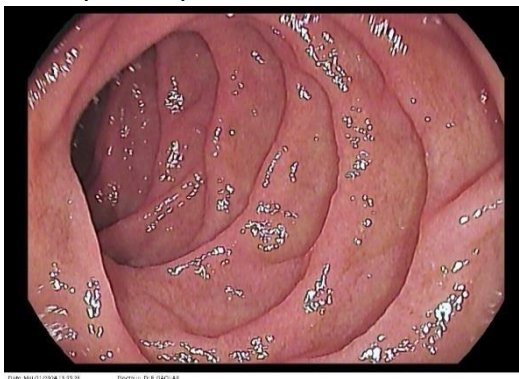


Figure 20: Image Originale (Normal) [48]



Figure 21: Image Originale (Celiac) [48]



Figure 22:Image après Prétraitement (Normal)
[48]



Figure 23:Image après Prétraitement (Celiac)
[48]

- **Segmentation** : Avant de procéder à la classification, une étape cruciale consiste à améliorer la précision du modèle en segmentant et en améliorant les bords des images avant de les utiliser comme entrées. Cependant, nous faisons face à plusieurs défis avec nos images : l'absence de masques pour une segmentation sémantique et la variabilité des seuils optimaux d'une image à l'autre. De plus, nos images sont en RGB, ce qui rend difficile l'utilisation de seuils fixes pour la segmentation.

La segmentation d'une image implique de diviser celle-ci en régions distinctes pour permettre une analyse et une classification précises de chaque partie. Pour notre projet, nous avons combiné plusieurs techniques afin d'obtenir les meilleurs résultats [34] :

- **Algorithme Cuckoo Search** : Inspiré par le comportement de reproduction des coucous, cet algorithme d'optimisation est utilisé pour déterminer les seuils de segmentation. Il commence par générer des seuils initiaux de manière aléatoire, puis utilise des Lévy flights pour explorer de nouvelles solutions potentielles. Les seuils sont ensuite mis à jour en remplaçant les solutions par des améliorations, et des mutations sont appliquées pour diversifier les seuils.
- **Méthode d'Otsu** : Utilisée en conjonction avec l'Algorithme Cuckoo Search, cette méthode évalue les courbes d'énergie calculées pour chaque canal RGB de l'image. Son objectif est de déterminer le seuil optimal qui sépare efficacement le premier plan (foreground) du second plan (background) en utilisant les courbes d'énergie des images.

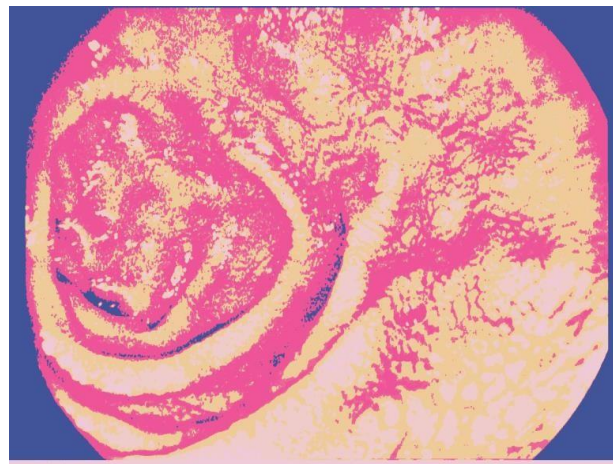


Figure 24:Figure 23 Segmentée [48]

En intégrant ces approches, notre système de segmentation peut identifier et isoler précisément les différentes régions d'une image en fonction de leur distribution de couleur. Cette capacité est essentielle dans des applications telles que la détection de la maladie cœliaque à partir d'images endoscopiques, où une segmentation précise peut conduire à des diagnostics plus fiables et à des traitements améliorés pour les patients.

- **Extraction des caractéristiques** : L'extraction de caractéristiques est une étape essentielle qui joue un rôle crucial dans la classification des images. En identifiant et en isolant les caractéristiques pertinentes des images, nous pouvons améliorer considérablement la précision de notre modèle de classification. Cependant, en raison du temps limité et de la petite taille de notre jeu de données, nous n'avons pas pu explorer toutes les méthodes d'extraction de caractéristiques disponibles. Parmi les nombreuses méthodes existantes telles que la transformée en ondelettes, les motifs binaires locaux (LBP) [34], l'histogramme des gradients orientés (HOG) [34], et les caractéristiques robustes accélérées (SURF) [34], nous avons choisi d'utiliser ResNet18 en raison de son efficacité prouvée dans l'extraction de caractéristiques via les réseaux de neurones convolutifs (CNN).

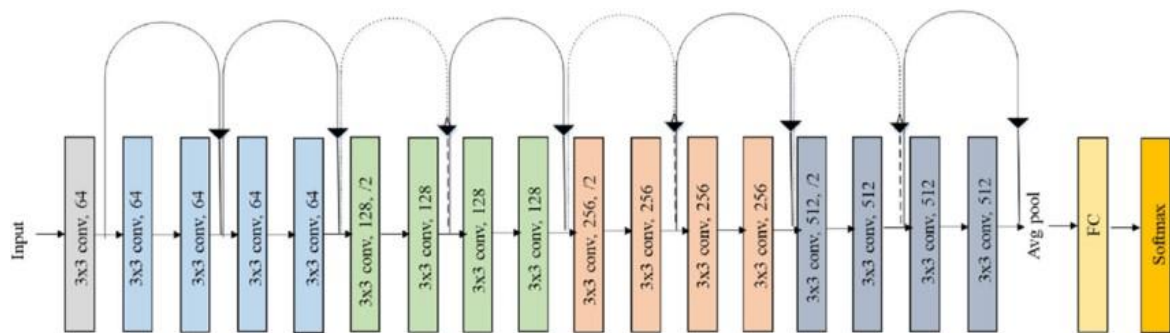


Figure 25: L'architecture de ResNet18 [35]

L'architecture de ResNet18 comprend [36] :

- 1 couche de convolution initiale avec 64 filtres, un noyau de taille 7x7 et un pas de 2, suivie d'une couche de mise en pool maximum (max-pooling) de taille 3x3 avec un pas de 2.

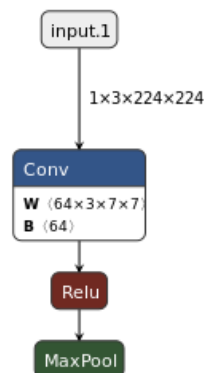


Figure 26: couche de convolution initiale de ResNet18 [35]

- 4 blocs résiduels principaux, chacun composé de 2 sous-couches résiduelles. Chaque sous-couche inclut :

- Une couche de convolution avec un noyau de taille 3x3, suivie d'une normalisation par lots (batch normalization) et d'une activation ReLU.
- Une deuxième couche de convolution avec un noyau de taille 3x3, suivie d'une normalisation par lots.

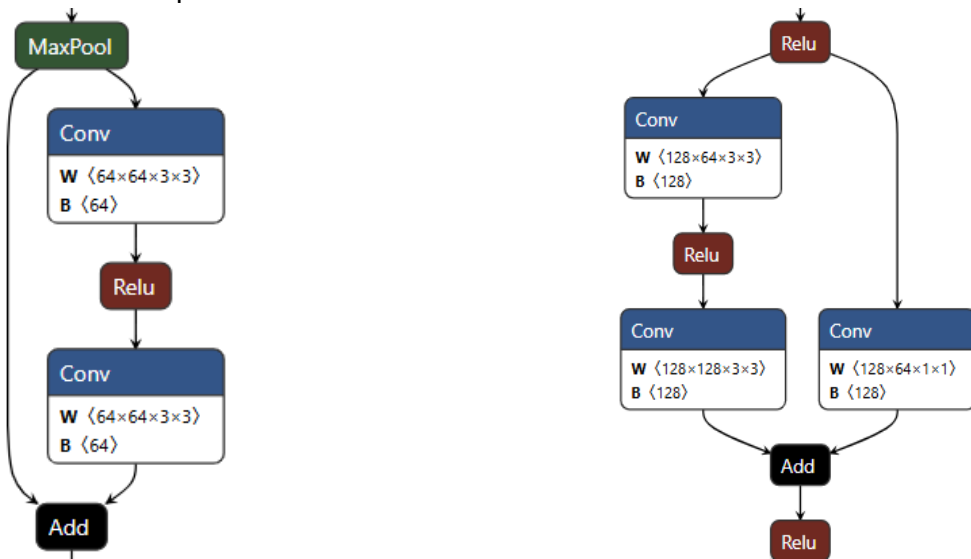


Figure 27: blocs résiduels de ResNet18 [35]

- Chaque bloc résiduel double le nombre de filtres à chaque étape (64, 128, 256, 512) avec des couches de mise en pool maximum insérées entre certains blocs pour réduire la dimension spatiale.
- 1 couche de mise en pool globale (global average pooling) qui réduit la dimension spatiale de chaque carte de caractéristiques à une taille 1x1.
- Enfin, la dernière couche entièrement connectée est retirée dans notre modèle pour conserver uniquement l'extracteur de caractéristiques.

ResNet18 (Residual Network) est un modèle CNN avancé conçu pour surmonter les problèmes de gradient qui apparaissent dans les réseaux profonds. Son architecture se distingue par l'utilisation de connexions résiduelles (skip connections), permettant au réseau d'apprendre efficacement même avec un grand nombre de couches. Voici les étapes que nous suivons pour obtenir nos caractéristiques :



Figure 28: les étapes que nous suivons pour obtenir nos caractéristiques

- **Image d'entrée** : Commencez avec une image segmentée dans son format d'origine.
- **Transformation des données** :
 - Redimensionner** : Redimensionnez l'image à une taille spécifiée, souvent 224x224 pixels.
 - ToTensor()** : Convertissez l'image en un tenseur PyTorch.

Normalize: Normalisez le tenseur d'image avec des moyennes et des écarts-types prédéfinis.

- **Initialisation :**

Utilisez un modèle ResNet18 pré-entraîné

Supprimez la dernière couche entièrement connectée pour conserver l'extracteur de caractéristiques convolutionnelles.

- **Passage avant :**

Faites passer l'image transformée à travers le modèle : Extrayez des caractéristiques de haut niveau de l'image à l'aide du modèle ResNet18.

Aplatissez la sortie pour créer un vecteur de caractéristiques.

- **Résultat :**

Obtenez un vecteur de caractéristiques de 512 dimensions représentant l'image.

En utilisant ResNet18, nous avons pu exploiter la puissance des CNN pour extraire des caractéristiques riches et informatives des images endoscopiques, améliorant ainsi la performance de notre modèle de classification.

- **Entraînement du modèle :**

Après avoir extrait les caractéristiques des images, nous les avons utilisées pour entraîner notre modèle de classification. Nous avons choisi d'explorer trois modèles différents pour maximiser les performances et obtenir des résultats comparatifs. Les modèles sélectionnés sont :

- **ResNet18 (pré-entraîné) :** Utilisé directement pour la classification des images endoscopiques. En utilisant un modèle pré-entraîné, nous avons pu tirer parti des connaissances acquises sur de grandes bases de données, ce qui a permis d'améliorer les performances de notre modèle avec un nombre limité de données.
- **ResNet18 pour l'extraction de caractéristiques + SVM pour la classification :** Dans cette approche, ResNet18 est utilisé pour extraire des caractéristiques des images, qui sont ensuite classifiées à l'aide d'une machine à vecteurs de support (SVM). Cette combinaison permet de bénéficier de la capacité de ResNet18 à extraire des caractéristiques pertinentes et de la robustesse des SVM pour la classification.
- **Réseau siamois :** Utilisé pour la comparaison d'images et l'apprentissage de similarités entre paires d'images endoscopiques. Les réseaux siamois sont particulièrement efficaces pour les tâches où il est nécessaire de mesurer la similitude entre deux images, ce qui est essentiel dans certaines applications de diagnostic médical.

II.3 CeliaScan : Conception

Nous avons choisi pour notre projet de concevoir un logiciel de gestion de cabinet intégrant un système CAD de détection des atrophies villositaires par les images endoscopiques. Ce travail nous engage à concevoir un produit fiable, robuste et répondant complètement aux besoins du client. Notre choix a été influencé par les outils informatiques que nous allons mettre en œuvre pour ce logiciel à savoir la conception d'une base de données, d'une GUI (Graphical User Interface) et de toute la programmation qu'il y a derrière pour satisfaire le cahier de charge du client et aboutir à une application simple, utile, performante, ergonomique et fiable. Le travail que nous avons effectué se décompose en quatre grandes parties :

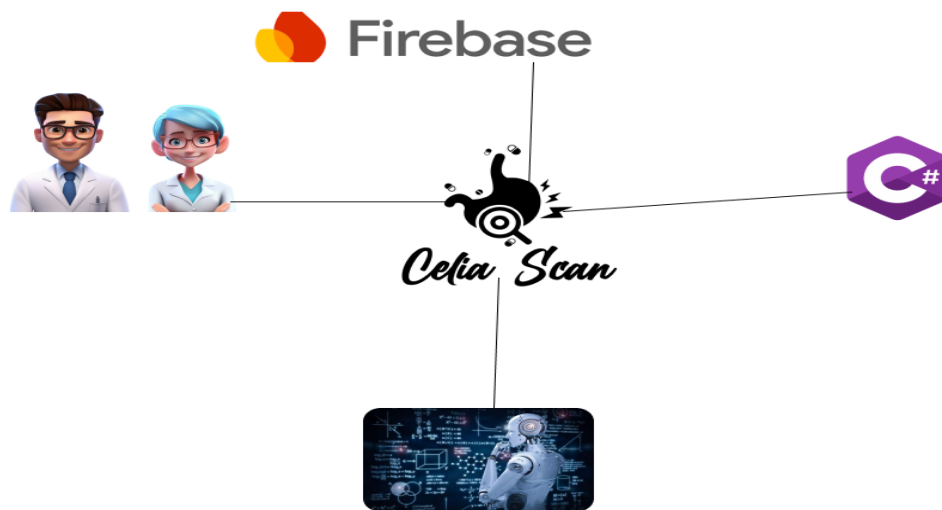


Figure 29: Les quatre grandes parties de CeliaScan

Premièrement, l'analyse du cahier de charge et des besoins du client. Deuxièmement, la conception de la base de données du logiciel en utilisant le Firebase. Troisièmement, la conception de l'application avec sa GUI, ses fonctionnalités et ses tests d'intégration et de validation en utilisant C#. Et quatrièmement intègre le model de l'IA. Dans ce rapport nous allons détailler toutes les étapes de conception de notre logiciel.

Pour la création de ce logiciel, nous avons opté pour un cycle de vie itératif et incrémental. Ce modèle présente plusieurs avantages, notamment la possibilité de recevoir rapidement des retours d'expérience, d'améliorer continuellement le produit à chaque itération, et de gérer les risques de manière plus efficace [37]. Nous avons commencé par une étude de l'existant afin de bien comprendre les problèmes et d'identifier les besoins. Ensuite, nous avons trouvé une solution à ces problèmes en commençant par créer l'interface de ce logiciel. Dans ce rapport, nous allons détailler toutes les étapes de conception de notre logiciel.

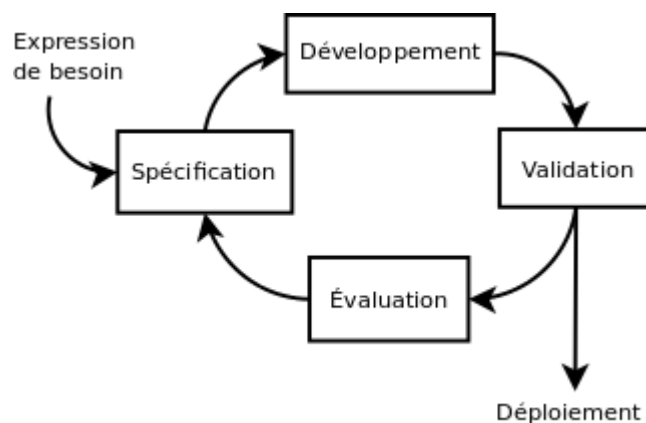


Figure 30: cycle de vie itératif et incrémental [37]

II.3.1 Étude de l'existant

Nous avons commencé par une étude de l'existant pour bien comprendre les problèmes existants et identifier les besoins. Cette étape nous a permis de collecter des informations

essentielles sur les défis auxquels sont confrontés les médecins en gastroentérologie, notamment en matière de gestion des procédures endoscopiques et de choix des sites de biopsie.

II.3.2 Identification des besoins

Dans le domaine médical, en particulier en gastroentérologie, l'endoscopie est une procédure essentielle permettant aux médecins d'inspecter visuellement les surfaces internes des organes. Malgré les avancées technologiques, plusieurs défis subsistent, notamment en ce qui concerne l'efficacité et la précision des procédures telles que les biopsies.

Les médecins doivent gérer efficacement leurs pratiques, en s'assurant de pouvoir mener des opérations rapidement tout en maintenant des normes élevées de soins. La capacité à détecter rapidement et avec précision les zones préoccupantes dans le tractus digestif lors d'une endoscopie est cruciale. Cependant, plusieurs problèmes persistent :

- **Contraintes de temps** : Lors des procédures endoscopiques, le temps est un facteur critique. Des procédures prolongées peuvent entraîner un inconfort pour le patient et un risque accru de complications. Il est donc essentiel de réaliser ces procédures rapidement et avec précision.
- **Choix du site de biopsie** : L'un des défis majeurs auxquels les médecins sont confrontés est l'identification du site optimal pour la biopsie. Une sélection précise du site est cruciale pour diagnostiquer des conditions telles que le cancer, où une détection précoce et précise peut avoir un impact significatif sur les résultats du traitement.
- **Incertitude diagnostique** : Même les médecins expérimentés peuvent parfois être incertains quant au meilleur site pour la biopsie. Cette incertitude peut entraîner des diagnostics manqués ou des biopsies inutiles, ce qui peut causer de l'anxiété chez les patients et des coûts supplémentaires pour les soins de santé.

Pour relever ces défis, l'intégration d'un système de détection assistée par ordinateur (CAD) dans le flux de travail endoscopique peut considérablement améliorer le processus de prise de décision.

II.3.3 Objectif

Notre système CAD proposé vise à :

- **Améliorer la qualité de l'image** : Utiliser des techniques de prétraitement avancées telles que le CLAHE et le filtrage médian pour améliorer la clarté des images et mettre en évidence les caractéristiques critiques.
- **Automatiser l'identification des sites de biopsie** : Mettre en œuvre des algorithmes de segmentation automatisée et des méthodes d'extraction de caractéristiques pour identifier les sites de biopsie optimaux, réduisant ainsi le temps des procédures et améliorant la précision.
- **Faciliter la gestion des informations des patients** : Développer un système de base de données robuste intégré au système de CAD pour stocker en toute sécurité les informations des patients, permettre un accès rapide pendant les procédures et rationaliser les tâches administratives.

II.3.4 Les écrans et Fonctionnalités de l'application

Après avoir terminé toutes les étapes précédentes, nous avons déterminé que les interfaces suivantes sont nécessaires pour notre logiciel CeliaScan afin de rationaliser le

processus de diagnostic et d'améliorer les soins aux patients. Voici un aperçu détaillé des différents écrans et fonctionnalités intégrés :

1. Confidentialité :

Dans notre système CAD proposé pour les procédures endoscopiques, garantir la confidentialité des patients est primordial. Voici les mesures clés mises en place :

- **Authentification sécurisée** : Les médecins doivent s'authentifier en utilisant un mot de passe et des identifiants par e-mail pour accéder à l'application CAD. Cette exigence de connexion garantit que seules les personnes autorisées peuvent accéder aux informations des patients.
- **Accès restreint** : Un contrôle d'accès basé sur les rôles est mis en œuvre pour limiter l'accès aux données des patients. Les soignants et le personnel médical ne peuvent consulter que les informations pertinentes à leurs rôles, empêchant ainsi l'accès non autorisé aux dossiers d'autres patients.

2. Accueil :

La page d'accueil de notre système CAD pour les procédures endoscopiques est conçue pour fournir aux médecins des outils complets pour gérer leur pratique de manière efficace et sécurisée. Voici les fonctionnalités clés :

- **Tableau de bord des statistiques** : Les médecins peuvent consulter des statistiques sur leur pratique, telles que le nombre total de patients vus, le nombre de patients actuellement en attente, et d'autres métriques pertinentes. Ce tableau de bord offre un aperçu rapide des performances de la pratique.
- **Gestion de la liste d'attente** : La page d'accueil affiche la liste d'attente, montrant les patients en attente de consultations. Les médecins peuvent prioriser et gérer cette liste directement depuis l'interface.
- **Options de consultation** : Les médecins ont la possibilité de lancer des consultations régulières ou des consultations express directement depuis la page d'accueil. Cette fonctionnalité simplifie le processus de gestion du flux de patients et de planification.
- **Accès aux informations des patients** : Les médecins peuvent accéder à des informations détaillées sur les patients directement depuis une vue en tableau affichée sur la page d'accueil. Cela inclut les antécédents médicaux, les procédures précédentes et toutes les notes pertinentes pour les soins du patient.
- **Ajout de nouveaux patients** : Si un patient n'est pas déjà dans le système, les médecins peuvent l'ajouter directement depuis la page d'accueil. Cette fonctionnalité garantit que tous les dossiers des patients sont centralisés et facilement accessibles.

3. Patient :

La page des Patients de notre système CAD pour les procédures endoscopiques est conçue pour fournir aux médecins un accès complet aux informations des patients et des capacités de gestion. Voici les fonctionnalités clés :

- **Liste des patients et détails** : Les médecins peuvent consulter une liste de tous les patients, avec des détails importants tels que le nom, l'âge, les coordonnées et un résumé des antécédents médicaux. Cet aperçu permet un accès rapide aux informations essentielles des patients.
- **Consulter les détails des patients** : En sélectionnant un patient dans la liste, les médecins peuvent accéder à des informations détaillées, y compris :
 - **Antécédents médicaux** : Conditions médicales antérieures, chirurgies et allergies.
 - **Médications** : Médicaments actuellement prescrits au patient.
 - **Résultats d'analyse** : Résultats récents de tests de laboratoire et conclusions diagnostiques.

- **Images** : Images endoscopiques et autres scans médicaux associés au patient.
- **Historique des consultations** : Enregistrement des consultations passées, traitements administrés et notes des visites précédentes.
- **Ajouter un nouveau patient** : Les médecins ont la capacité d'ajouter un nouveau patient directement depuis la page des Patients. Cette fonctionnalité garantit que tous les dossiers des patients sont centralisés dans le système.
- **Supprimer le dossier du patient** : Les médecins peuvent supprimer des dossiers de patients si nécessaire, en respectant les politiques de conservation des données et les règlements de confidentialité des patients.

4. Cabinet :

La page Cabinet de notre système CAD pour les procédures endoscopiques offre aux médecins des outils pour gérer les questions de recherche, effectuer des consultations et documenter les soins aux patients. Voici les fonctionnalités clés :

- **Gestion des questions de recherche** : Les médecins peuvent consulter les questions de recherche existantes et ont la possibilité d'ajouter de nouvelles questions ou de modifier celles existantes. Cette fonctionnalité permet aux médecins d'adapter leurs intérêts de recherche et leurs enquêtes cliniques.
- **Consultation spécifique au patient** : Lorsqu'un médecin sélectionne un patient spécifique depuis la page des Patients pour une consultation, il est redirigé vers la page Cabinet.
 - **Sélectionner une question de recherche** : Les médecins choisissent une question de recherche pertinente pour la consultation parmi une liste de questions prédéfinies ou personnalisées.
 - **Options de consultation** : Les médecins peuvent lancer une consultation régulière ou une consultation express directement depuis la page Cabinet.
- **Page de consultation** :
 - **Documentation** : Pendant la consultation, les médecins peuvent documenter des détails tels que les médicaments prescrits, les résultats d'analyse, les recommandations diététiques et d'autres notes pertinentes.
 - **Prescription** : Les médecins peuvent ajouter des prescriptions avec des médicaments directement depuis la page de consultation.
 - **Imprimer et enregistrer** : Les détails de la consultation peuvent être imprimés pour les dossiers des patients et enregistrés dans le système pour référence future.
- **Intégration du flux de travail** : Une intégration transparente avec les dossiers des patients garantit que tous les détails de la consultation sont liés au profil du patient respectif, maintenant ainsi la continuité des soins.

5. CeliaScan :

La page CeliaScan de notre système CAD pour les procédures endoscopiques intègre notre modèle CAD pour aider les médecins à prédire les conditions médicales à partir des images endoscopiques. Voici comment cela fonctionne :

- **Sélection du patient** : Les médecins commencent par sélectionner un patient spécifique dans la liste des patients. Cela garantit que toutes les prédictions sont associées au dossier médical correct du patient.
- **Chargement des images** : Le médecin charge l'image endoscopique d'intérêt directement dans le système CAD. Cette image provient généralement d'un examen endoscopique récent du patient sélectionné.
- **Prédiction du modèle CAD** : Notre modèle CAD traite l'image chargée en utilisant des algorithmes avancés pour prédire la classe ou la condition. Cette prédiction est basée

sur les caractéristiques extraites de l'image lors des étapes de prétraitement et de segmentation.

- **Affichage des résultats de prédiction** : Le système affiche la classe ou la condition prédite au médecin. Cela peut inclure des diagnostics potentiels, des anomalies ou des zones de préoccupation identifiées par le modèle CAD.
- **Interaction et support à la décision** : Les médecins peuvent interagir avec les résultats de la prédiction pour examiner les détails et prendre des décisions éclairées sur la gestion et les plans de traitement des patients.

6. Compte :

La page Compte de notre système CAD pour les procédures endoscopiques fournit aux médecins des outils pour gérer leurs informations personnelles et les détails des soignants. Voici un aperçu de ses fonctionnalités :

- **Gestion des informations personnelles** :
 - **Mise à jour des informations** : Les médecins peuvent mettre à jour leurs informations personnelles telles que le nom, les coordonnées et la spécialité directement via la page Compte.
- **Gestion des soignants** :
 - **Ajouter un nouveau soignant** : Les médecins ont la possibilité d'ajouter un nouveau soignant pour aider à la gestion des patients ou aux tâches administratives. Ils peuvent saisir les détails du soignant tels que le nom, les coordonnées et le rôle.
 - **Supprimer un soignant** : Si nécessaire, les médecins peuvent supprimer des soignants de leur compte. Cette action garantit que seules les personnes autorisées ont accès aux informations des patients et aux fonctionnalités du système.
- **Paramètres de sécurité** :
 - **Mise à jour du mot de passe** : Les médecins peuvent changer leur mot de passe pour maintenir la sécurité et le contrôle d'accès au système CAD.

7. Application Soignante :

L'application Soignante est conçue pour compléter le système CAD pour les procédures endoscopiques, en fournissant aux soignants des fonctionnalités spécifiques pour aider les médecins à gérer efficacement les soins aux patients. Voici un aperçu des fonctionnalités de la page d'accueil de l'application Soignante :

- **Identifiants de connexion** : Les soignants se connectent en utilisant leur nom d'utilisateur et leur mot de passe. Cette authentification garantit que seuls les soignants autorisés peuvent accéder aux informations des patients et effectuer les tâches désignées.
- **Accès aux informations des patients** : Les soignants peuvent consulter des informations spécifiques aux patients pertinentes pour leurs responsabilités. Cela inclut des détails tels que le nom du patient, l'âge et toute information médicale essentielle nécessaire aux tâches de soins.
- **Ajouter des patients à la liste d'attente** : Les soignants ont la capacité d'ajouter des patients à la liste d'attente pour les consultations. Cette fonctionnalité aide à rationaliser le flux de patients et garantit que les médecins sont informés des patients en attente de leur attention.
- **Ajouter un nouveau patient à la liste d'attente** : En plus de gérer les patients existants, les soignants peuvent ajouter de nouveaux patients directement à la liste d'attente. Cette action facilite la planification efficace des rendez-vous et garantit que toutes les informations des patients sont capturées dans le système.

II.3.5 Conception de Bases de Données

Pour assurer une gestion efficace des données et une structure bien définie de notre application, nous avons élaboré plusieurs diagrammes de conception. Ces diagrammes permettent de visualiser la structure de la base de données ainsi que les interactions entre les différentes classes de notre application. Voici une description de chaque type de diagramme utilisé :

- **Diagramme de Classe :**



Classe UML.pdf

Ce diagramme est utilisé pour modéliser les classes de notre application ainsi que leurs relations. Il définit les attributs et les méthodes de chaque classe, ainsi que les interactions entre elles. Le diagramme de classe est crucial pour la conception orientée objet de l'application et aide à assurer que toutes les fonctionnalités nécessaires sont bien couvertes par les classes définies.

En intégrant ces diagrammes dans notre processus de conception, nous avons pu créer une base de données bien structurée et une architecture logicielle solide, assurant ainsi la robustesse et la maintenabilité de notre application CeliaScan.

- **Diagramme de cas d'utilisation :**



Diagramme de cas d'utilisation.pdf

Le diagramme de cas d'utilisation décrit les interactions entre les utilisateurs (ou acteurs) et le système. Il permet de visualiser les fonctionnalités principales de l'application CeliaScan du point de vue des utilisateurs finaux, tels que les gastroentérologues et les techniciens de laboratoire. Chaque cas d'utilisation représente une tâche ou un processus que l'utilisateur peut accomplir à l'aide du système, comme le chargement d'images d'endoscopie, l'exécution d'une analyse pour détecter l'atrophie villositaire, ou la génération d'un rapport de diagnostic. Ce diagramme est essentiel pour s'assurer que toutes les exigences fonctionnelles sont correctement implémentées dans l'application.

CONCLUSION

Ce projet nous a permis d'avoir une approche complète du développement logiciel. Il nous a permis de nous initier au contact avec le client et à l'analyse des besoins et du cahier de charge. Nous avons aussi pu nous familiariser au cycle complet du développement logiciel, de la conception à la validation, en passant par les différentes étapes incrémentales de codage et de tests. Ce travail nous a appris à concevoir une base de données complète en nous basant sur les besoins de l'application à réaliser.

En conclusion, cette étude démontre la capacité de l'intelligence artificielle à transformer efficacement des données brutes en informations cliniquement pertinentes, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'amélioration des diagnostics médicaux et des soins aux patients. L'intégration réussie de ces méthodologies souligne l'importance croissante de l'IA dans le domaine de la médecine et illustre comment ces avancées peuvent potentiellement révolutionner les pratiques de santé actuelles.

Chapitre 3 : Évaluation et Résultats

Introduction

Dans ce chapitre, nous explorerons un système innovant de diagnostic assisté par intelligence artificielle pour la maladie cœliaque, visant à améliorer la précision et l'efficacité du diagnostic clinique. Ce système intègre des technologies avancées pour analyser les images endoscopiques du duodénum et détecter les anomalies spécifiques associées à cette maladie.

Nous détaillerons les différentes interfaces et types d'images utilisés dans ce processus, ainsi que le fonctionnement et les résultats obtenus par notre module d'intelligence artificielle. L'objectif principal de ce chapitre est de fournir une compréhension approfondie du développement et de l'application de ce système dans le domaine clinique.

III.1 Matériel et Logiciel Utilisés

Pour mener à bien ce projet, nous avons utilisé divers matériels et logiciels essentiels au développement et à l'évaluation de notre modèle.

III.1.1 Matériel

- **Ordinateur personnel** : Utilisé pour le développement local et la gestion des fichiers.
- **Google Colab** : Plateforme en ligne permettant l'utilisation de GPU pour l'entraînement des modèles, accélérant considérablement le processus.

III.1.2 Logiciel

- **Python** : Langage de programmation principal utilisé pour le développement du projet.
- **Bibliothèques Python** : TensorFlow, Keras, OpenCV, NumPy, Matplotlib, et SciPy pour le traitement d'images, l'entraînement des modèles et l'analyse des données.
- **Google Drive** : Utilisé pour le stockage des données et des résultats intermédiaires.
- **Studio Community** : Utilisé pour le développement d'applications logicielles, y compris l'interface utilisateur, la gestion de données, et l'intégration avec d'autres services Microsoft.

III.1.3 Classification du Dataset

Nous avons classifié notre dataset d'images endoscopiques de manière aléatoire afin d'assurer une répartition équilibrée entre les images normales et celles de patients atteints de la maladie cœliaque. Sur un total de 124 images, nous avons sélectionné aléatoirement 80 % des images pour constituer nos ensembles d'entraînement et de validation. Les 20 % restants ont été répartis équitablement entre l'ensemble de validation et l'ensemble de test.

Pour améliorer la robustesse de notre modèle, nous avons également appliqué une augmentation des données sur les images d'endoscopie. Des techniques telles que le recadrage, le zoom, la rotation, et les transformations d'images nous ont permis de générer jusqu'à quatre images supplémentaires à partir d'une seule, enrichissant ainsi notre dataset tout en conservant la diversité des caractéristiques. Cela a contribué à éviter le surapprentissage et à renforcer la capacité généralisante du modèle.

Pour confirmer l'exactitude et la robustesse de notre modèle, nous avons utilisé un ensemble de test supplémentaire composé de 40 images. Cet ensemble de test réel, distinct de notre ensemble de validation, nous permet de tester notre modèle sur des données

nouvelles et non vues lors de l'entraînement et de la validation, offrant ainsi une évaluation plus rigoureuse de ses performances.

Après avoir organisé notre dataset, nous avons prétraité les images, les avons segmentées, extrait les caractéristiques importantes, et enfin les avons alimentées au modèle pour la classification.

III. 2 Validation de notre Modèle

Avant de présenter les résultats obtenus après l'entraînement de notre modèle, nous détaillerons la validation de celui-ci à travers :

III.2.1 Métriques de Performance en IA

Lors de l'évaluation des modèles d'IA, en particulier dans l'imagerie médicale et d'autres applications critiques, plusieurs métriques de performance sont cruciales pour comprendre leur efficacité et leur fiabilité.

- **Exactitude** : Le rapport des instances correctement prédites au nombre total d'instances. C'est une mesure générale mais qui peut être trompeuse dans le cas de jeux de données déséquilibrés.

$$\text{Exactitude} = \frac{\text{Vrais positifs (VP)} + \text{Vrais négatifs (VN)}}{\text{Nombre Total d'instances}}$$

Figure 31: Exactitude formule [38]

- **Sensibilité (Rappel)** : Le rapport des instances positives correctement prédites sur toutes les instances positives réelles. Elle mesure la capacité du modèle à identifier les instances positives.

$$\text{Rappel (Sensibilité)} = \frac{\text{Vrais positifs (VP)}}{\text{Vrais positifs (VP)} + \text{Faux négatifs (FN)}}$$

Figure 32: Rappel formule [39]

- **Spécificité** : Le rapport des instances négatives correctement prédites sur toutes les instances négatives réelles. Elle mesure la capacité du modèle à identifier les instances négatives.

$$\text{Spécificité} = \frac{\text{Vrais négatifs (VN)}}{\text{Vrais négatifs (VN)} + \text{Faux positifs (FP)}}$$

Figure 33: Spécificité formule [39]

- **Précision** : Le rapport des instances positives correctement prédites sur toutes les instances prédites positives. Elle mesure l'exactitude des prédictions positives.

$$\text{Précision} = \frac{\text{Vrais positifs (VP)}}{\text{Vrais positifs (VP)} + \text{Faux positifs (FP)}}$$

Figure 34: Précision formule [38]

- **F1-Score** : La moyenne harmonique de la précision et du rappel. Elle fournit une métrique unique qui équilibre les deux préoccupations.

$$\text{F1-Score} = 2 \times \frac{\text{Précision} \times \text{Rappel}}{\text{Précision} + \text{Rappel}}$$

Figure 35: F1-Score formule [38]

- **ROC-AUC (Receiver Operating Characteristic - Area Under the Curve)**: La courbe ROC est un tracé du taux de vrais positifs (sensibilité) contre le taux de faux positifs (1

- spécificité) à différents seuils. L'AUC mesure toute la surface bidimensionnelle sous la courbe ROC, fournissant une mesure globale de performance sur tous les seuils.
 $ROC-AUC = \text{Surface sous la courbe ROC}$

Figure 36: ROC-AUC formule [40]

III.2.1 Résultats

Nous présenterons maintenant les résultats obtenus après l'entraînement du modèle. Cette analyse des performances du système mettra en lumière les réussites notables ainsi que les défis rencontrés tout au long du processus.

Modèle	Exactitude	Précision	Rappel	F1-Score	ROC-AUC
ResNet18 (préentraîné)	0.8800	0.7500	1.0000	0.8571	0.9062
ResNet18 (préentraîné) + SVM	0.8421	0.8000	0.6667	0.7273	0.9359
Réseau siamois	0.5000	/	/	/	/

Tableau 6: Résultats des différents modèles

Pour confirmer l'exactitude et la robustesse de notre modèle, nous avons utilisé un ensemble de test supplémentaire composé de 40 images. Les résultats sur ces 40 images sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Modèle	Images Correctes	Images Incorrectes
ResNet18 (préentraîné)	27	13
ResNet18 (préentraîné) + SVM	34	6
Réseau siamois	10	30

Tableau 7: Résultats des modèles sur les 40 images de test

Observations :

1. ResNet18 (pré-entraîné) :

- **Performance** : Taux élevé de précision et de rappel.
- **Problème** : Risque de surapprentissage (overfitting) observé malgré les bonnes métriques.

2. ResNet18 pour l'extraction de caractéristiques + SVM pour la classification :

- **Performance** : Bonne performance globale avec une meilleure généralisation comparée à l'utilisation de ResNet18 seul.
- **Observations** : Cette combinaison réduit le risque de surapprentissage tout en offrant un ROC-AUC élevé, indiquant une bonne séparation des classes.

3. Réseau siamois :

- **Limitation** : Ne peut pas être totalement dépendant pour la classification des images endoscopiques de la maladie coeliaque en raison de la diversité des aspects de la maladie qui peuvent ne pas être tous visibles dans une seule image.

III.3 Présentation de CeliaScan

Après avoir mené une étude approfondie et collaboré étroitement avec des médecins, nous avons développé CeliaScan en utilisant le langage de programmation C#. Ce choix s'explique par la popularité et la robustesse de C# dans le développement d'applications de bureau, ainsi que par la facilité d'utilisation de ses frameworks pour les interfaces utilisateur (UI) et ses bibliothèques pour la gestion des bases de données et l'analyse d'images.

Nous avons converti notre modèle entraîné, basé sur ResNet18 et SVM, en un fichier ONNX que nous avons intégré à notre application. Pour utiliser CeliaScan, il vous suffit de vous connecter à Internet, saisir votre email et votre mot de passe, et vous pourrez commencer à utiliser notre logiciel. Voici un aperçu de nos principales interfaces :

III.3.1 Connexion

L'interface de connexion permet aux médecins d'entrer leur email et leur mot de passe fournis (modifiable ultérieurement). En cliquant sur "Connexion", ils accèdent à l'application CeliaScan. En cas d'oubli de leur mot de passe, ils peuvent saisir leur email et cliquer sur "Mot de passe oublié". Un email sera envoyé à leur boîte de réception avec les instructions pour réinitialiser leur mot de passe.

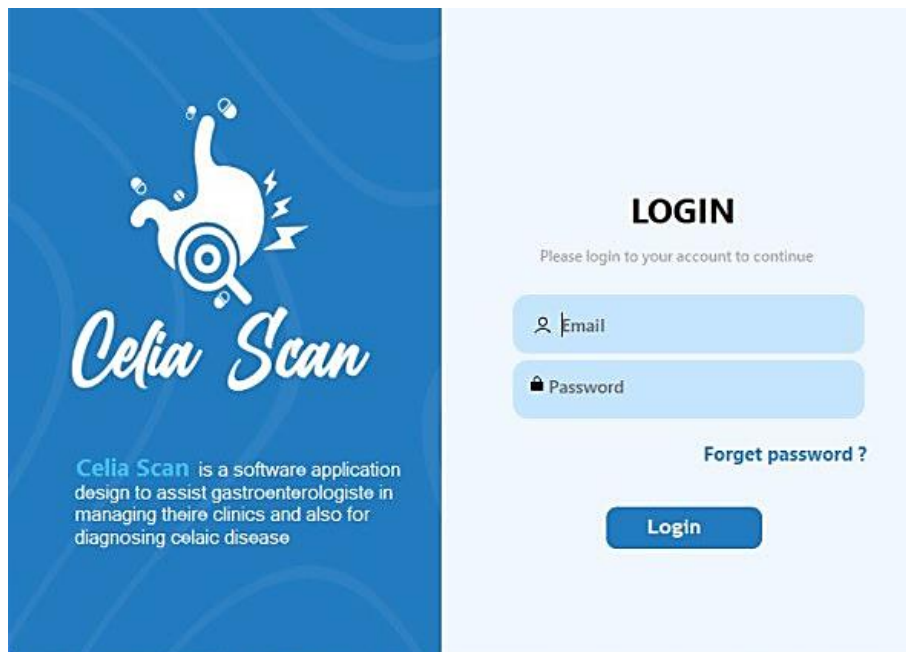


Figure 37: Interface de Connexion [49]

Cette interface garantit un accès sécurisé et pratique à CeliaScan, facilitant ainsi l'utilisation quotidienne pour l'analyse d'images endoscopiques du duodénum.

III.3.2 Accueil

L'interface d'accueil offre aux médecins un aperçu statistique de leur cabinet, incluant le nombre de consultations effectuées aujourd'hui, le nombre total de patients présents dans leur cabinet, ainsi que le nombre de patients en attente de consultation. Ils peuvent également visualiser la liste d'attente des patients, ajoutés par les soignants, où ils ont la possibilité de réaliser une consultation express ou normale, consulter les informations détaillées des patients, et supprimer les patients de la liste d'attente.

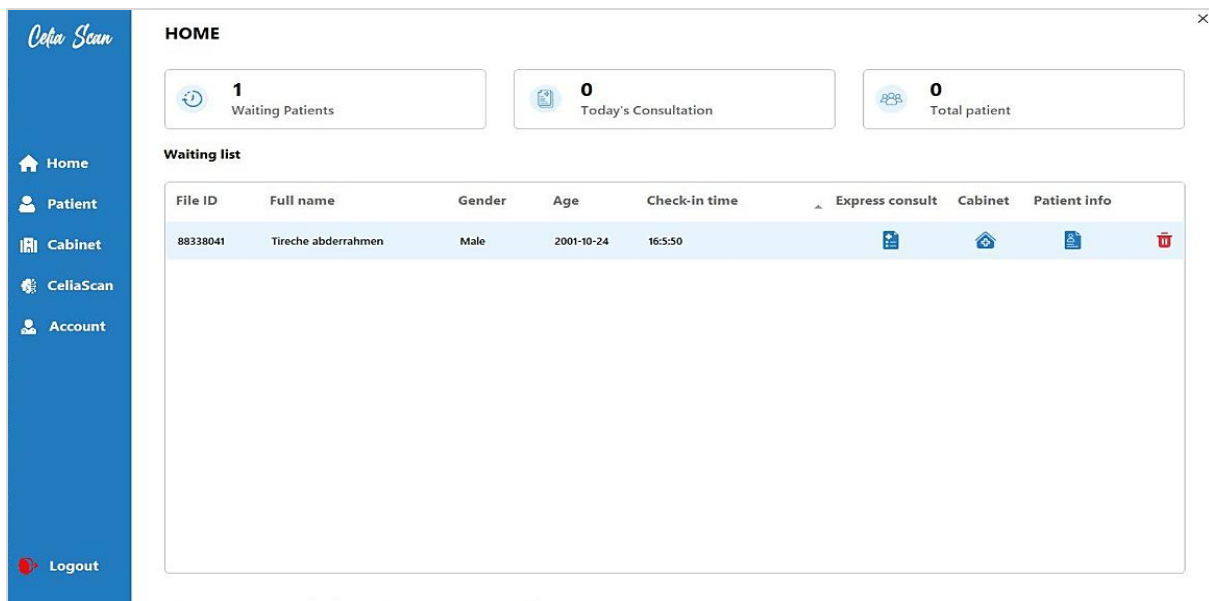


Figure 38: Interface d'Accueil [49]

Cette interface centralise les informations critiques pour une gestion efficace du flux de patients et assure une prise en charge rapide et organisée au sein du cabinet médical.

III.3.3 Patient

Dans l'interface "Patient", les médecins peuvent accéder à la liste complète des patients dans leur cabinet. Ils peuvent gérer les informations des patients en double-cliquant sur un patient spécifique pour consulter et modifier ses informations détaillées. De plus, les médecins ont la possibilité d'ajouter un nouveau patient directement à partir de cette interface.

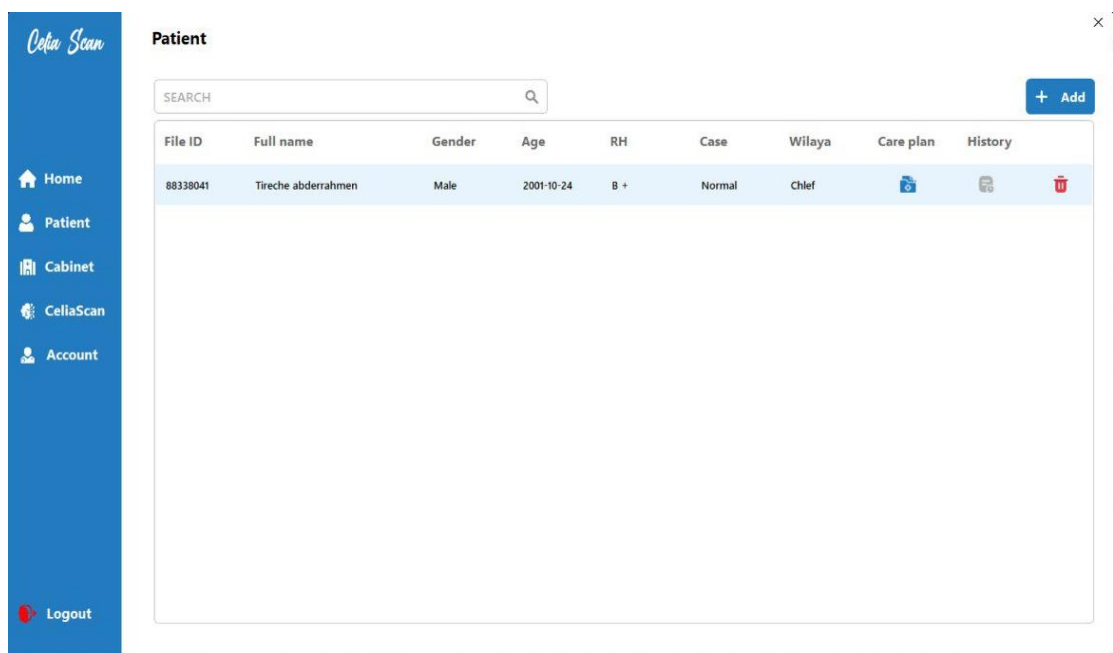


Figure 39: Interface Patient [49]

Celia Scan
Home
Patient
Cabinet
CeliaScan
Account
Logout

Patient info

Autoimmune diseases
ADD+

Family History
ADD+

Surgical history
ADD+

Comments

Back

File ID: 88338041
Full Name: Tireche abderrahmen
Phone: 0540334888
Wilaya: Chief
Age: 2001-10-24 Birth: 05 July 2024
Case: Normal RH: B +
Diet: celiac
☒ Male ☐ Female

Modify
Save

Figure 40: exemple d'interface des informations pour patient [49]

Les fonctionnalités de cette interface incluent également la consultation du plan de soins du patient, comprenant les médicaments prescrits, les analyses planifiées, ainsi que l'historique médical du patient. Les médecins peuvent accéder aux prescriptions antérieures, aux résultats d'analyses et aux entretiens médicaux précédents pour une meilleure compréhension du dossier médical du patient.

Celia Scan
Home
Patient
Cabinet
CeliaScan
Account
Logout

Care Plan

Medical analysis
Medicament
Images

Tireche abderrahmen
SEARCH

Requested Analysis	Type	Date	State	Result
Complete blood count	hematological	2024-07-05	waiting	
Antibody testing	serological	2024-07-05	waiting	

Back
MODIFY
SAVE

Figure 41: Interface plan de soins du patient [49]

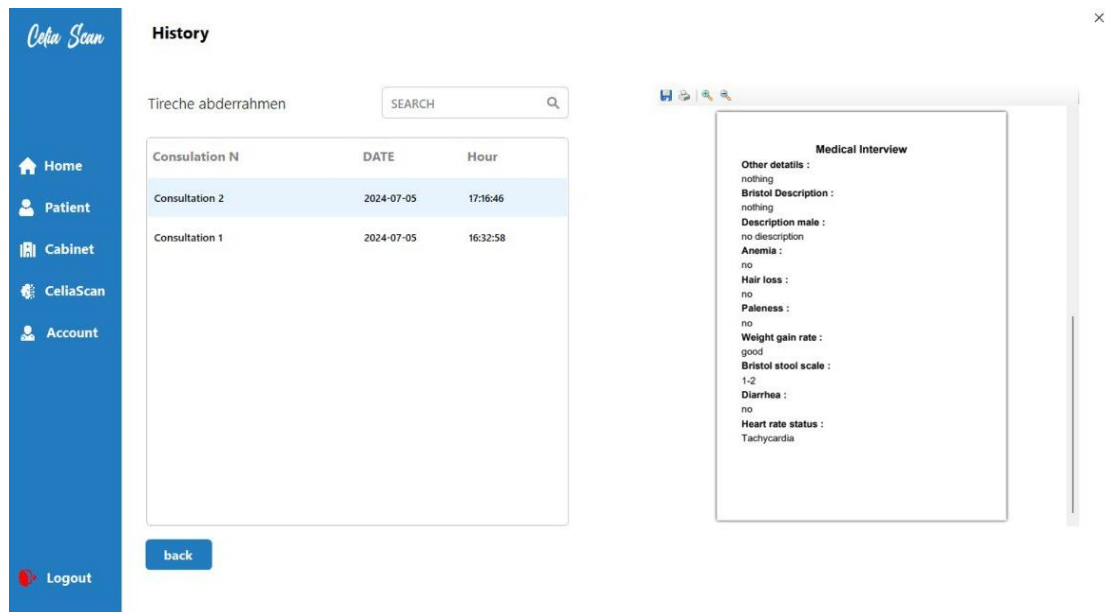


Figure 42: Interface historique du patient [49]

De plus, les médecins peuvent visualiser les images endoscopiques des patients pour une évaluation clinique complète, contribuant ainsi à une prise en charge médicale intégrée et efficace au sein de CeliaScan.

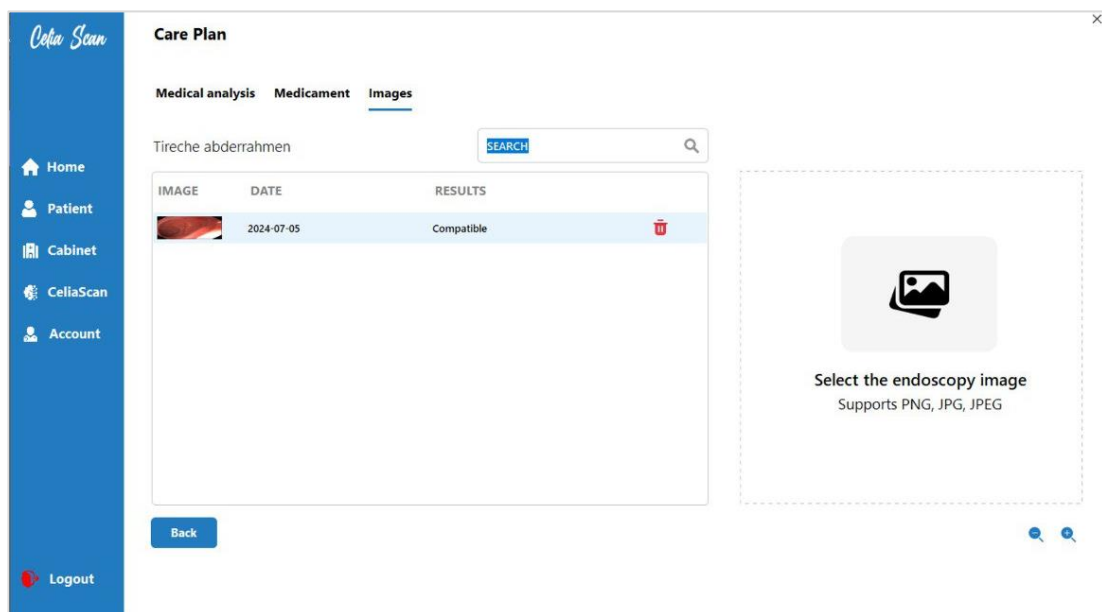


Figure 43: Interface historique des images pour patient [49]

III.3.4 Cabinet

Interface "Cabinet" comprend deux pages principales pour faciliter la gestion et les consultations médicales :

- **Gestion des Questions de Recherche** : Dans cette première page, les médecins peuvent gérer leurs questions de recherche pour faciliter les consultations. Ils peuvent ajouter, supprimer et mettre à jour des questions. Chaque question peut être nommée avec un type spécifique (par exemple, diagnostic, traitement, suivi) et associée à un genre (homme, femme, autre).

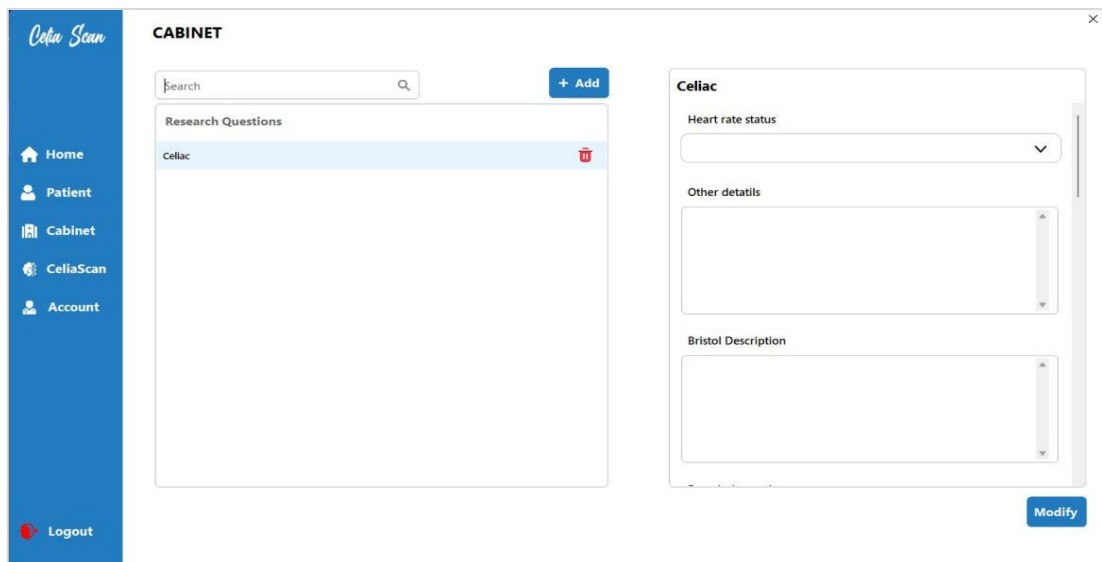


Figure 44:Interface cabinet [49]

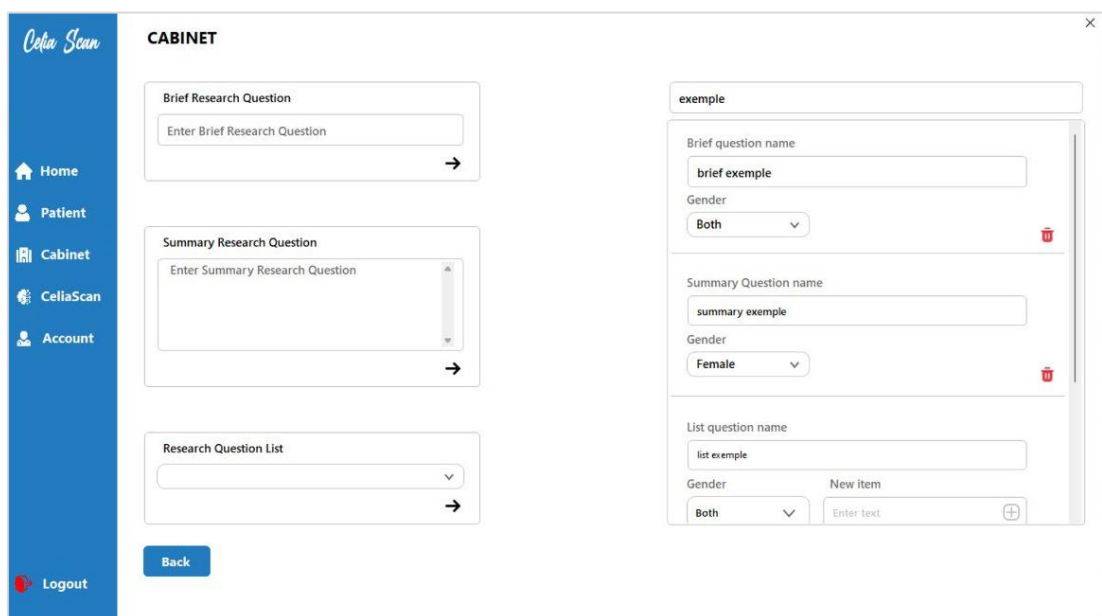


Figure 45: Interface pour ajouter/modifier questionnaire de recherche [49]

- **Consultation Médicale** : Les médecins peuvent accéder à cette page en sélectionnant un patient depuis la liste d'attente dans l'accueil ou en choisissant une question de recherche spécifique depuis la liste disponible. Ils peuvent répondre à la question choisie et passer à la deuxième étape de la consultation. Dans cette deuxième partie, ils peuvent ajouter des analyses, des prescriptions, et des recommandations diététiques. De plus, ils ont la possibilité d'imprimer et de sauvegarder les informations de la consultation.

CABINET

Medicine Analysis Diet

Tیرهche abderrahmen

Ranitidine

Dosage: 1cps/day Quantity: 3 box Time: Morning

Ibuprofen

Dosage: 1 cps / week Quantity: 1 box Time: Noon

Acetaminophen

Dosage: 1 cps / day Quantity: 1 box Time: Night

PRESCRIPTION

1 - Ranitidine
1cps/day Morning 3 box

2 - Ibuprofen
1 cps / week Noon 1 box

3 - Acetaminophen
1 cps / day Night 1 box

chlef

Figure 46: Interface Consultation Médicale [49]

Ce module centralise les outils nécessaires pour une gestion efficace des consultations médicales et des données patientes au sein de CeliaScan.

III.3.5 CeliaScan

Dans l'interface "CeliaScan", les médecins trouveront une liste de patients. Ils peuvent sélectionner un patient, charger l'image endoscopique correspondante, remplir les questions pertinentes si nécessaire, puis appuyer sur "Vérifier". L'image sera pré-traitée et segmentée, puis le modèle prédira la classe de l'image. Le résultat sera affiché et l'image avec le résultat et l'heure seront sauvegardés.

CeliaScan

Search

File ID	Full name
88338041	Tیرهche abderrahmen

Genetic study

HLA DQ 2 DQ 8

Serological study

Serum anti-tTG anti-EMA

Compatible

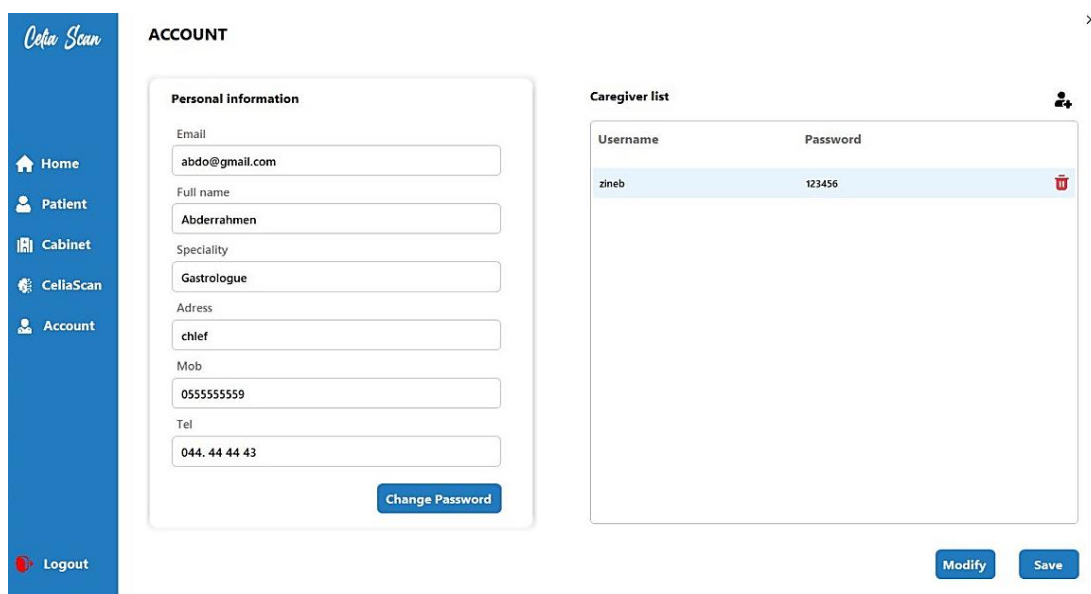
Clear Check

Figure 47: Interface CeliaScan [49]

Cette interface permet une analyse rapide et précise des images endoscopiques, intégrant toutes les étapes essentielles pour une prédiction fiable et une documentation complète des résultats.

III.3.6 Compte

Dans l'interface "Account", les médecins peuvent mettre à jour leurs informations personnelles et gérer leurs soignants en ajoutant ou supprimant des membres de l'équipe.



The screenshot shows the 'ACCOUNT' page with a blue sidebar on the left containing links: Home, Patient, Cabinet, CeliaScan, Account (selected), and Logout. The main content area is titled 'ACCOUNT' and contains two sections:

- Personal information:** A form with fields for Email (abdo@gmail.com), Full name (Abderrahmen), Speciality (Gastrologue), Address (chief), Mob (055555559), and Tel (044. 44 44 43). A 'Change Password' button is at the bottom right of this section.
- Caregiver list:** A table with columns 'Username' and 'Password'. It contains one entry: 'zineb' with password '123456'. A red trash icon is next to the entry. Below the table are 'Modify' and 'Save' buttons.

Figure 48: Interface compte [49]

III.3.7 L'application de soignants

Dans l'application pour les soignants, le soignant s'identifie en entrant le numéro de téléphone du médecin ainsi que son nom d'utilisateur et son mot de passe, puis clique sur "Se connecter". Une fois connecté, il accède à la page d'accueil où il trouve la liste des patients du médecin avec des informations spécifiques et limitées. Le soignant peut ajouter un nouveau patient à la liste d'attente de deux manières : en ajoutant directement un nouveau patient à la liste d'attente (et non à la liste des patients ou en double-cliquant sur un patient de la liste des patients pour l'ajouter à la liste d'attente

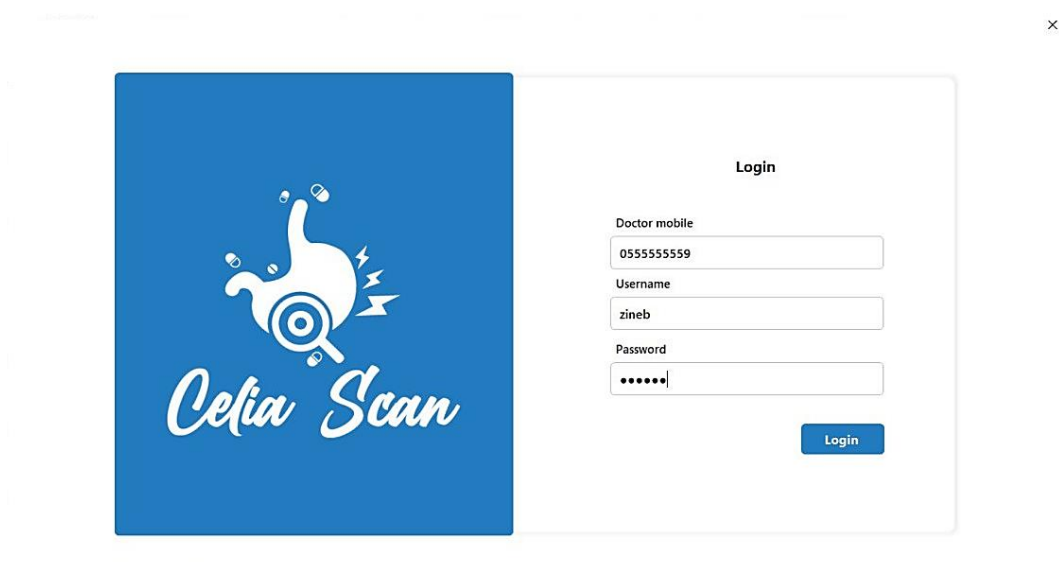


Figure 49: Interface de Connexion pour aides-soignants [49]

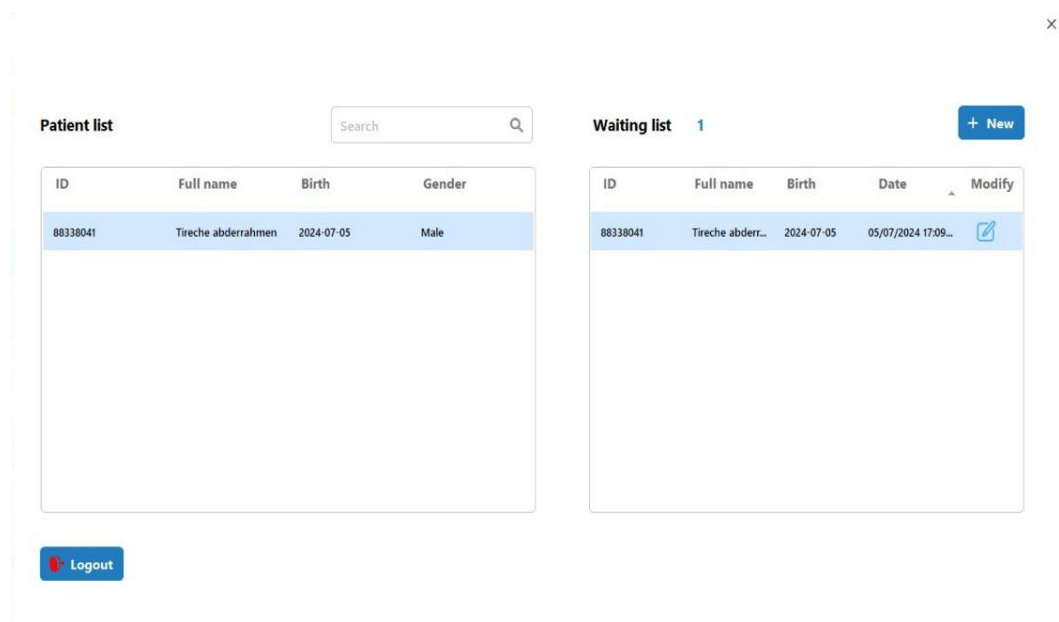


Figure 50: Interface Accueil pour aides-soignants [49]

Conclusion

Ce chapitre a présenté en détail les résultats et les fonctionnalités de CeliaScan, un système de diagnostic assisté par intelligence artificielle conçu pour améliorer la précision et la rapidité du diagnostic de la maladie cœliaque. En combinant des techniques avancées de traitement d'images et des algorithmes de l'IA, CeliaScan analyse les images endoscopiques du duodénum pour détecter les anomalies caractéristiques de la maladie cœliaque avec une grande précision.

Nous avons inclus dans ce chapitre les interfaces de notre application, en expliquant chaque interface pour montrer comment les utilisateurs peuvent interagir avec CeliaScan pour télécharger des images, effectuer des analyses automatiques et interpréter les résultats. Les interfaces utilisateur intuitives et conviviales facilitent l'accès aux informations critiques et améliorent l'efficacité des processus diagnostiques.

Chapitre 4 : Business Model Canvas

Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les éléments fondamentaux nécessaires pour soutenir et faire avancer le projet CeliaScan. Nous identifions les ressources cruciales, les investissements stratégiques et les cadres opérationnels essentiels pour optimiser l'efficacité, assurer la sécurité des données et améliorer la pénétration sur le marché. En alignant stratégiquement les partenariats, en tirant parti des technologies haute performance et en mettant l'accent sur un design centré sur l'utilisateur, nous posons les bases pour une intégration technologique robuste et une croissance durable dans le secteur du diagnostic médical.

IV.1 Value Proposition

Dans le cadre de ce projet innovant, nous proposons un outil de diagnostic avancé pour améliorer la précision et l'efficacité du diagnostic de la maladie cœliaque en intégrant une technologie prédictive en temps réel aux appareils d'endoscopie, associée à un système de gestion de cabinet convivial pour les médecins. La solution proposée garantit une sélection précise du site de biopsie, rationalise la gestion du cabinet et protège les données des patients.

IV.1.1 Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

a. Expérience et engagement des patients :

Les patients sont souvent confrontés à de longs délais d'attente, à une coordination des soins incohérente et à une communication incohérente de la part des prestataires de soins de santé. Le diagnostic de la maladie de cœliaque peut être un processus assez lourd et peut être confus dans certain cas.

b. Précision du diagnostic et rapidité du traitement :

Les erreurs de diagnostic, les retards dans le début du traitement et l'utilisation inefficace des ressources de diagnostic peuvent avoir un impact sur les résultats pour les patients.

c. Évolutivité et flexibilité :

Systèmes de santé sont souvent confrontés à des problèmes d'évolutivité, en particulier lorsqu'ils étendent les services ou s'adaptent à l'évolution des besoins des patients.

d. Maîtrise des coûts et optimisation des ressources :

- **Coûts de diagnostic** : réduit le besoin d'endoscopies répétées et de tests inutiles, réduisant ainsi le coût global du diagnostic pour les patients.
- **Économies opérationnelles** : aide les hôpitaux et les cliniques à économiser sur les coûts associés aux durées de procédure prolongées et aux diagnostics répétés.

IV.1.2 Comment notre outil de diagnostic améliore-t-il la précision du diagnostic de la maladie cœliaque ?

a. Précision diagnostique améliorée :

- **Guidage en temps réel** : notre outil utilise des algorithmes avancés et l'apprentissage automatique pour analyser les images endoscopiques en temps réel, identifiant les sites de biopsie optimaux.
- **Réduction des erreurs de diagnostic** : garantit que les biopsies sont prélevées aux emplacements corrects, réduisant ainsi le risque de faux négatifs et améliorant la fiabilité du diagnostic.

b. Efficacité accrue :

- **Procédures permettant de gagner du temps :** fournit des conseils en temps réel pendant l'endoscopie, minimisant ainsi le temps passé par les médecins à rechercher des sites de biopsie.
- **Flux de travail rationalisés :** s'intègre parfaitement aux flux de travail existants, permettant aux médecins d'effectuer des procédures plus rapides et de voir plus de patients.

c. Économies de coûts :

- **Coûts de diagnostic inférieurs :** réduit le besoin d'endoscopies répétées et de tests inutiles, réduisant ainsi le coût global du diagnostic pour les patients.
- **Économies opérationnelles :** aide les hôpitaux et les cliniques à économiser sur les coûts associés aux durées de procédure prolongées et aux diagnostics répétés.

d. Résultats améliorés pour la santé des patients :

- **Traitement précoce :** Des diagnostics plus rapides et plus précis permettent aux patients de commencer un traitement approprié plus tôt, évitant ainsi les complications et améliorant les résultats de santé à long terme.

IV.1.3 Qu'est-ce qui distingue votre système de gestion d'armoires des solutions existantes ?

Contrairement à de nombreux systèmes de gestion d'armoires existants qui sont complexes et difficiles à utiliser, notre système est conçu pour être simple, fiable et rapide. Il s'intègre parfaitement à notre outil de diagnostic, offrant aux médecins une plateforme unifiée pour le diagnostic des patients et la gestion du cabinet. Cette intégration rationalise les flux de travail, permettant aux médecins de gérer plus facilement et efficacement leur cabinet.

IV.1.4 Comment garanteez-vous la sûreté et la sécurité des données des patients ?

- **Protection des données des patients :** Met fortement l'accent sur la sécurité des données en utilisant des protocoles de cryptage robustes pour garantir que les données des patients et des médecins sont protégées contre les violations.
- **Conformité :** adhère aux normes les plus élevées en matière de sécurité des données et de réglementation en matière de confidentialité pour maintenir la confiance et la fiabilité.

IV.1.5 Comment notre application gère-t-elle les données de l'appareil d'endoscopie pour garantir qu'aucune donnée n'est perdue ?

- **Intégration sécurisée :** Notre système prend uniquement des images vidéo de la caméra d'endoscopie sans interférer avec la machine ou le patient.
- **Intégrité des données :** Garantit que les données (images vidéo) sont transmises en toute sécurité à l'application sans perte en utilisant des protocoles de transmission de données avancés et des mécanismes de vérification des erreurs pour garantir l'intégrité des données, permettant au modèle de prédire avec précision les sites de biopsie.

IV.1.6 Quels sont les avantages cliniques de l'utilisation de votre outil de diagnostic de la maladie cœliaque ?

Les avantages cliniques de notre outil de diagnostic incluent un diagnostic plus rapide et plus précis de la maladie cœliaque, ce qui permet aux patients de commencer un traitement approprié plus tôt. Un traitement précoce peut prévenir les complications associées à la maladie cœliaque non traitée, améliorant ainsi les résultats de santé à long terme. De plus, l'outil réduit le fardeau des prestataires de soins de santé en rationalisant le processus de diagnostic et en augmentant l'efficacité.

IV.1.7 En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?

- **Technologie de pointe** : Nos développements futurs amélioreront la précision prédictive de notre modèle de diagnostic de la maladie cœliaque.
- **Intégration améliorée** : À l'avenir, nous visons à affiner notre système de gestion d'armoires pour qu'il soit encore plus convivial et intégré de manière transparente aux flux de travail de soins de santé existants. Cela inclut des interfaces intuitives et des fonctionnalités d'automatisation améliorées pour une gestion efficace du cabinet.
- **Facilité d'utilisation et formation minimale** : Nos efforts continus viseront à rendre notre plateforme encore plus intuitive et à nécessiter une formation minimale.
- **Améliorations continues de la sécurité** : Nous nous engageons à améliorer continuellement nos mesures de sécurité des données pour répondre à l'évolution des exigences réglementaires et des normes de l'industrie. Les futures mises à jour incluront des protocoles de cryptage avancés et des capacités de détection proactive des menaces pour protéger les informations des patients.
- **Partenariats stratégiques** : Nous continuerons à forger des partenariats stratégiques avec des leaders de l'industrie et des prestataires de soins de santé pour accéder à des ressources et à une expertise spécialisée.
- **Service client réactif** : Engagement envers l'excellence : notre stratégie future comprend des investissements supplémentaires dans un service client et une assistance réactive.
- **Flexibilité et adaptabilité** : Les futures mises à jour se concentreront sur l'offre de solutions encore plus personnalisables, adaptées pour répondre aux besoins uniques des différents établissements de soins de santé.
- **Infrastructure évolutive** : L'évolutivité de notre plateforme sera encore optimisée pour prendre en charge une expansion transparente à mesure que les cliniques et les services des prestataires de soins de santé se développent. Les futures mises à jour incluront des fonctionnalités d'évolutivité améliorées qui facilitent l'intégration dans des réseaux de soins de santé plus vastes et de nouvelles installations.

IV.2 Segments de clients

IV.2.1 Quels sont nos clients principaux ?

1. Gastro-entérologues en pratique privée :

- **Attention et concentration** : Ces professionnels s'efforcent de fournir des soins personnalisés de haute qualité à leurs patients. Ils souhaitent adopter des technologies innovantes susceptibles d'améliorer la précision et l'efficacité du diagnostic.

- **Niveau social** : Très respecté dans la communauté, souvent considéré comme un leader d'opinion clé dans son domaine.
- **Revenu moyen** : Généralement dans une tranche de revenus plus élevée, ce qui leur permet de pouvoir se permettre des technologies médicales avancées.
- **Traits psychologiques** : Ils valorisent l'autonomie professionnelle, l'apprentissage continu et le fait de rester à la pointe de la technologie médicale. Ils sont souvent motivés par le désir d'améliorer les résultats pour les patients et de rationaliser les opérations de leur cabinet.

2. Cliniques spécialisées en gastroentérologie :

- **Attention et concentration** : Les cliniques donnent la priorité à une gestion efficace du flux de travail, à la satisfaction des patients et à des solutions rentables. Ils s'intéressent aux technologies susceptibles de réduire les délais de procédure et d'améliorer les capacités de diagnostic.
- **Niveau social** : Considérés comme des prestataires de soins de santé spécialisés au sein de la communauté, s'adressant souvent aux patients des classes moyennes et supérieures.
- **Revenu moyen** : Les cliniques disposent généralement de revenus suffisants pour investir dans des technologies et des solutions médicales innovantes.
- **Traits psychologiques** : Les administrateurs de cliniques et les prestataires de soins de santé se concentrent sur l'efficacité opérationnelle, la qualité des soins aux patients et la compétitivité sur le marché des soins de santé. Ils apprécient les solutions qui peuvent s'intégrer de manière transparente à leurs systèmes existants et améliorer les performances globales de la clinique.

3. Services de gastroentérologie dans les hôpitaux :

- **Attention et concentration** : Les services hospitaliers se concentrent sur les soins complets aux patients, la collaboration multidisciplinaire et le respect des directives cliniques. Ils recherchent des technologies qui améliorent la précision du diagnostic, réduisent la durée des séjours à l'hôpital et soutiennent la prise de décision clinique.
- **Niveau social** : En tant que membres d'établissements de santé plus vastes, ils exercent une influence significative et font partie intégrante du fonctionnement des hôpitaux. Ils s'adressent à un large éventail de patients, y compris ceux ayant des besoins médicaux complexes.
- **Revenu moyen** : Les gastro-entérologues et les services hospitaliers disposent généralement des ressources financières nécessaires pour investir dans la technologie médicale de pointe.
- **Traits psychologiques** : Les professionnels de la santé en milieu hospitalier apprécient la fiabilité, la pratique fondée sur des données probantes et la coordination interministérielle. Ils sont motivés par l'amélioration des résultats pour les patients, l'avancement des connaissances médicales et l'optimisation de l'utilisation des ressources.

IV.2.2 Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?

1. Gastro-entérologues en pratique privée :

- **Haute précision diagnostique** : Des outils pour garantir un diagnostic précis et fiable de la maladie cœliaque, réduisant ainsi le risque d'erreurs.
- **Efficacité des procédures** : Technologies permettant de gagner du temps pour améliorer le flux de travail et le débit des patients.

- **Technologie conviviale** : Des systèmes intuitifs qui s'intègrent parfaitement aux équipements existants et nécessitent une formation minimale.
- **Rentabilité** : Des solutions qui offrent un bon retour sur investissement sans compromettre la qualité.
- **Autonomie professionnelle** : Des outils qui leur permettent de garder le contrôle de leurs processus de diagnostic et d'améliorer leurs capacités de prise de décision clinique.

2. Cliniques spécialisées en gastroentérologie :

- **Gestion efficace du flux de travail** : Des systèmes qui rationalisent les flux de travail administratifs et cliniques pour réduire les goulots d'étranglement.
- **Satisfaction des patients** : Des technologies qui améliorent les résultats et la satisfaction des patients en fournissant des diagnostics plus rapides et plus précis.
- **Solutions rentables** : Des technologies abordables qui réduisent les coûts opérationnels, par exemple en minimisant le besoin de procédures répétées.
- **Intégration avec les systèmes existants** : Compatibilité avec les systèmes médicaux et administratifs actuels pour assurer une transition en douceur.
- **Évolutivité** : Des solutions qui peuvent évoluer avec la clinique à mesure que le volume de patients et les offres de services augmentent.

3. Services de gastroentérologie dans les hôpitaux :

- **Soins complets aux patients** : Des technologies qui soutiennent une approche multidisciplinaire et améliorent la qualité globale des soins aux patients.
- **Outils de collaboration** : Des systèmes qui facilitent la collaboration entre les services et les prestataires de soins de santé.
- **Optimisation des ressources** : Des outils qui aident à optimiser l'utilisation des ressources, comme la réduction de la durée des séjours à l'hôpital et la minimisation des tests inutiles.
- **Outils de diagnostic avancés** : Des technologies de pointe qui fournissent un guidage précis en temps réel pendant les procédures.
- **Sécurité des données** : Mesures de sécurité robustes pour protéger les données sensibles des patients et garantir le respect des réglementations en matière de protection des données.

IV.2.3 Comment pouvons-nous catégoriser nos clients en groupes distincts ?

1. Par type de pratique :

- **Gastro-entérologues en pratique privée** : Gastro-entérologues individuels ou petits groupes exerçant de manière indépendante. Focus sur les soins personnalisés et l'efficacité dans leurs pratiques.
- **Cliniques de gastroentérologie** : Cliniques spécialisées dédiées à la gastro-entérologie, employant souvent plusieurs gastro-entérologues et personnel de soutien. L'accent est mis sur la gestion du flux de travail, la satisfaction des patients et les solutions rentables.
- **Services de gastroentérologie dans les hôpitaux** : Départements au sein de grands systèmes hospitaliers qui fournissent des services spécialisés de gastro-entérologie. Exiger des solutions globales et multidisciplinaires et le respect des directives cliniques.

2. Par emplacement géographique :

- **Marché Local (Algérie) :** Marché cible initial avec des conditions culturelles, réglementaires et économiques spécifiques. Concentrez-vous sur la compréhension des infrastructures et des besoins locaux en matière de soins de santé.
- **Marchés internationaux :** Objectifs d'expansion dans d'autres pays avec différents niveaux d'adoption technologique, de conditions économiques et d'environnements réglementaires.

3. Par taille et échelle :

- **Petits cabinets et cliniques :** Praticiens solitaires ou petites cliniques avec un personnel limité. Exigez des solutions abordables, faciles à utiliser et pouvant être rapidement mises en œuvre.
- **Cliniques de taille moyenne :** Cliniques plus grandes avec plusieurs praticiens et besoins administratifs plus complexes. Besoin de solutions évolutives qui s'intègrent bien aux systèmes et flux de travail existants.
- **Grands services hospitaliers :** Services complets de gastro-entérologie au sein des grands hôpitaux. Besoin de systèmes robustes, fiables et hautement intégrés prenant en charge un large éventail de procédures de diagnostic et de traitement.

IV.3 Relation avec les clients

IV.3.1 Service et assistance de haute qualité

a. Comment garantissons-nous une installation et une configuration rapides pour nos clients ?

- **Installation et configuration rapides :** Fournissez un fichier exécutable facile à utiliser pour l'application. Offrez une assistance complète pour la configuration de l'application dans leur clinique, leur machine ou leur service.
- **Intégration transparente :** Assurez-vous que l'application s'intègre facilement à leurs systèmes existants, y compris toutes les applications de gestion (gestion) existantes ou les modèles d'IA connectés à leurs machines d'endoscopie.

b. Quelles mesures prenons-nous pour fournir un service client réactif ?

- **Service client réactif :** Nous offrirons un support client rapide et fiable par téléphone, e-mail et assistance en personne pour résoudre rapidement tout problème.
- **Formation et ressources :** Nous fournirons des sessions de formation et des ressources approfondies pour garantir que les clients sont à l'aise avec l'application et ses fonctionnalités.

IV.3.2 Parcours client

a. Quel est le processus lorsqu'un client achète l'application ?

- **Fichier exécutable :** Les clients reçoivent un fichier exécutable pour l'application.
- **Prise en charge de l'installation :** Aider au processus d'installation et de configuration au sein de leur clinique, machine ou service.
- **L'intégration :** Assurez-vous que l'application fonctionne de manière transparente avec toutes les applications de gestion ou modèles d'IA existants et leurs machines d'endoscopie.

b. Comment pouvons-nous garantir un soutien continu et une satisfaction après l'achat ?

- **Répondre aux besoins des clients** : Adapter et améliorer continuellement l'application pour répondre aux besoins changeants des clients.
- **Assistance en temps réel** : Fournissez une assistance en temps réel pour aider les clients à naviguer dans l'application et à utiliser efficacement ses fonctionnalités.
- **Mises à jour régulières** : Publiez des mises à jour régulières pour améliorer les fonctionnalités et intégrer les commentaires des utilisateurs.
- **Résolution rapide des problèmes** : Offrez un dépannage rapide et une assistance technique par téléphone, e-mail ou visites personnelles.
- **Service client continu** : Maintenir une équipe de service client dédiée pour résoudre tout problème en cours et assurer la satisfaction du client.
- **Boucle de rétroaction** : Solliciter activement les commentaires des clients pour comprendre leurs expériences et les domaines à améliorer.

IV.3.3 L'intégration

a. Comment pouvons-nous garantir une intégration transparente de notre application avec les systèmes existants ?

- **Compatibilité fluide** : Assurez-vous que l'application s'intègre parfaitement aux applications de gestion existantes utilisées par les clients.
- **Fonctionnalités améliorées** : Fournir des fonctionnalités supplémentaires qui complètent et améliorent les capacités de leurs systèmes actuels.
- **Traitement des données en temps réel** : Assurez-vous que l'application peut traiter et gérer les données des machines d'endoscopie en temps réel sans perdre aucune image.
- **Prédictions précises** : Utilisez des modèles d'IA pour prédire les sites compatibles pour les biopsies, améliorant ainsi la précision du diagnostic.
- **Sécurité des données** : Donnez la priorité à la sécurité des données pour protéger les données des clients contre toute violation ou perte. Programme d'affiliation.

IV.3.4 Programme d'affiliation

a. Comment pouvons-nous encourager les références et les partenariats avec nos clients ?

- **Gains d'affiliation** : Offrez une commission de 20 % sur le prix total de l'application à tout nouveau client référé par les clients existants.
- **Réduction de prix pour la coopération** : Réduisez le prix des services si les clients acceptent de coopérer en partageant des informations, des expériences, des images ou des données pour améliorer l'application.

IV.4 Canaux de distribution

IV.4.1 Installation et déploiement

Comment les clients installent-ils notre application dans leurs cliniques, cabinets ou services ?

- **Installation directe** : Fournissez aux clients un fichier exécutable (exe) pour une installation facile dans leurs cabinets, cliniques ou services.
- **Livraison en ligne** : Proposez des options de paiement en ligne permettant aux clients d'acheter et de recevoir l'application sous forme numérique.

IV.4.2 Engagement et commentaires des clients

Comment recueillons-nous les commentaires des clients pour améliorer nos services ?

- **Mécanisme de rétroaction** : Encouragez les clients à évaluer nos services et à fournir des commentaires via l'application, permettant une amélioration continue.
- **Essai gratuit** : Nous proposerons une période d'essai gratuite de 30 jours pour permettre aux clients de découvrir l'application avant de prendre une décision d'achat.

IV.4.3 Advertising and Affiliation

Comment faire connaître notre application auprès des clients potentiels ?

- **Affiliation clients** : Incitez les clients existants à parrainer de nouveaux clients via un programme d'affiliation, en leur offrant des récompenses telles que des remises ou des commissions.
- **Campagnes publicitaires** : Utilisez des publicités ciblées pour faire connaître notre application auprès des gastroentérologues, des cliniques et des services hospitaliers.

IV.4.4 Commodité de paiement

Quelles méthodes de paiement sont disponibles pour que les clients achètent notre application ?

- **Paiement en ligne** : Facilitez les méthodes de paiement en ligne pour garantir la commodité et la sécurité des clients qui achètent notre application.
- **Options de livraison** : Nous offrirons une flexibilité dans les méthodes de livraison, permettant aux clients de choisir entre une livraison immédiate en ligne ou une livraison physique avec paiement à réception.

IV.4.5 Support client et gestion des relations

Comment pouvons-nous fournir une assistance continue aux clients après qu'ils ont installé notre application ?

- **Assistance proactive** : Nous maintiendrons des canaux de communication ouverts permettant aux clients de signaler des problèmes ou de demander de l'aide, garantissant ainsi une résolution rapide.
- **Opportunités d'affiliation** : Nous offrirons des opportunités d'affiliation continues où les clients pourront gagner des commissions pour les références et les collaborations.

IV.5 Partenaires clés

IV.5.1 Qui sont nos partenaires clés ?

- **Médecins** : Ces professionnels de la santé utilisent notre application dans leur cabinet médical, fournissant ainsi de précieux commentaires et garantissant son efficacité dans le diagnostic de la maladie cœliaque.
- **Cliniques et Cabinets** : Les établissements médicaux qui adoptent notre application pour améliorer leurs processus de diagnostic et améliorer les soins aux patients.
- **Entreprises produisant des machines d'endoscopie** : La collaboration avec ces entreprises garantit que notre application s'intègre parfaitement à la dernière technologie d'endoscopie, rendant le processus de diagnostic plus précis et efficace.
- **Ministère de la Santé** : Le partenariat avec les services gouvernementaux de santé ouvre des opportunités d'adoption à grande échelle, garantissant que notre application atteint un public plus large et gagne en crédibilité au sein du secteur de la santé.

IV.5.2 De quelles ressources clés avons-nous besoin de la part de nos partenaires pour mener à bien notre projet ?

- **Médecins** : Commentaires en temps réel sur la convivialité de l'application et la précision du diagnostic. Accès aux données des patients et aux dossiers médicaux pour les tests et la validation. Collaboration à des essais cliniques et à des études de cas pour démontrer l'efficacité.
- **Cliniques et Cabinets** : Prise en charge de l'intégration pour déployer notre application dans leurs installations. Accès aux données démographiques des patients et aux paramètres cliniques pour la personnalisation. Participation à des programmes pilotes pour affiner les fonctionnalités et optimiser les flux de travail.
- **Entreprises produisant des machines d'endoscopie** : Spécifications techniques et support de compatibilité pour l'intégration avec leurs équipements. Accès aux kits de développement logiciel (SDK) ou aux API pour une intégration transparente des données. Efforts conjoints de recherche et de développement pour améliorer les capacités de diagnostic.
- **Ministère de la Santé** : Support réglementaire et directives de conformité pour les logiciels de santé. Possibilités de financement ou subventions pour soutenir la recherche et le développement. Approbation et promotion de notre application au sein du système de santé pour faciliter son adoption.

IV.5.3 Comment envisageons-nous de collaborer avec nos partenaires ?

- **Projets collaboratifs** : Nous avons l'intention de nous engager dans des projets de collaboration avec nos partenaires pour tirer efficacement parti de leur expertise et de leurs ressources.
- **Accès aux ressources** : Cette collaboration garantit un accès facile aux ressources clés cruciales pour le succès de notre projet, telles que les données des patients et le support technique.
- **Restez à jour** : En nous associant à ces entités, nous restons informés des dernières avancées en matière de technologie des soins de santé et de normes réglementaires.
- **Innovation et Efficacité** : L'utilisation de ces partenariats favorise l'innovation et améliore l'efficacité opérationnelle de nos solutions de soins de santé.

IV.5.4 Pourquoi nous engageons-nous dans ces partenariats ?

- **Optimisation des Prestations** : Le partenariat nous permet d'optimiser nos services en les intégrant de manière transparente dans les systèmes et flux de travail de santé existants.
- **Rapport coût-efficacité** : La collaboration nous aide à réduire les coûts associés à la recherche, au développement et au déploiement, rendant nos solutions plus abordables et accessibles.
- **Gain de temps** : En tirant parti des partenariats, nous pouvons accélérer le processus de développement et de mise en œuvre, faisant ainsi gagner un temps précieux aux prestataires de soins de santé et aux patients.
- **Atténuation des risques** : S'engager dans des partenariats permet d'atténuer les risques associés à l'intégration technologique et à la conformité réglementaire, garantissant ainsi des opérations plus fluides et le respect des normes.

IV.6 Activités clés

IV.6.1 Quelles activités sont essentielles pour fournir les meilleurs services à nos clients ?

- **Évolutivité dans les structures de soins de santé** : Concevoir l'architecture de l'application pour qu'elle s'adapte de manière transparente aux petites cliniques, aux cabinets de taille moyenne et aux grands services hospitaliers.
- **Capacités complètes de gestion des patients** : Intégrant des modules pour une gestion complète des patients, couvrant l'ensemble du parcours de soins de santé, de l'enregistrement initial à la sortie. Fournir des fonctionnalités pour capturer et gérer en toute sécurité les données démographiques des patients, leurs antécédents médicaux, leurs informations d'assurance et d'autres données pertinentes.
- **Gestion des procédures médicales et de la documentation** : Faciliter la gestion des examens médicaux, des tests de diagnostic, des prescriptions et des plans de traitement au sein de l'application. Permettre aux prestataires de soins de santé de documenter et d'accéder en toute sécurité aux dossiers des patients, garantissant ainsi la continuité des soins et une prise de décision précise.
- **Interactions médecin-patient rationalisées** : Permet aux médecins de mettre à jour les informations sur les patients en temps réel et de récupérer rapidement les données pertinentes pendant les consultations. Intégration de fonctionnalités pour les consultations express, permettant aux médecins de prioriser les cas urgents et de rationaliser la planification des rendez-vous pour des soins efficaces aux patients.
- **Formulaires d'entretien médical personnalisables** : Proposer des modèles personnalisables pour les formulaires d'entretien médical qui peuvent être adaptés pour capturer des informations spécifiques sur les patients ou des exigences de recherche clinique. Permettre aux médecins de créer, enregistrer et réutiliser des formulaires personnalisés pour standardiser les processus de collecte de données et améliorer la précision du diagnostic.
- **Interface conviviale et accessibilité** : Concevoir une interface utilisateur (UI) intuitive, facile à naviguer et prenant en charge une gestion efficace des flux de travail pour les prestataires de soins de santé. Garantir l'accessibilité sur tous les appareils pour

permettre aux professionnels de la santé d'accéder aux informations sur les patients et d'effectuer des tâches à distance ou en déplacement.

- **Intégration et interopérabilité** : Intégration aux systèmes informatiques de santé existants, tels que les dossiers de santé électroniques, les systèmes d'information de laboratoire et les systèmes de facturation, pour faciliter l'échange et l'interopérabilité transparents des données. Prendre en charge les normes et protocoles de l'industrie pour garantir la compatibilité avec divers environnements de soins de santé et exigences réglementaires.
- **Amélioration continue et mises à jour** : S'engager à effectuer des mises à jour et des améliorations régulières en fonction des commentaires des utilisateurs, des avancées technologiques et des changements réglementaires pour améliorer les fonctionnalités, la sécurité et l'expérience utilisateur. Engager les professionnels de la santé dans le processus de développement pour donner la priorité aux fonctionnalités qui répondent à leurs défis spécifiques en matière de flux de travail et améliorent l'efficacité globale.

IV.6.2 Comment validons-nous l'exactitude et la fiabilité de notre modèle d'IA pour les machines d'endoscopie, et quelles mesures sont prises pour l'intégrer de manière transparente dans la pratique clinique ?

- **Développement d'algorithmes avancés** : Développez des algorithmes avancés adaptés aux applications d'endoscopie, en vous concentrant sur le traitement des images, l'extraction de caractéristiques et la reconnaissance de formes.
- **Intégration avec l'équipement d'endoscopie** : Garantissez une intégration transparente du modèle d'IA avec différents types et marques d'appareils d'endoscopie.
- **Traitement et commentaires en temps réel** : Mettez en œuvre des mécanismes de traitement en temps réel des flux vidéo endoscopiques pour fournir un retour d'information immédiat aux professionnels de santé.
- **Assurance qualité et validation** : Nous effectuerons des tests et une validation rigoureuse du modèle d'IA à l'aide de divers ensembles de données et scénarios cliniques pour garantir une précision et une fiabilité élevées pour différentes données démographiques et conditions de patients. Réalisez des études comparatives avec des méthodes de diagnostic traditionnelles pour valider les performances et l'utilité clinique du modèle d'IA dans la détection des sites de biopsie.
- **Prétraitement et sécurité des données** : Mettez en œuvre des techniques de prétraitement de données robustes pour améliorer la qualité et la fiabilité des données d'entrée, notamment la réduction du bruit, l'amélioration de l'image et la normalisation. Garantir le respect de protocoles stricts de sécurité des données et de réglementations en matière de confidentialité pour protéger les informations des patients et maintenir la confidentialité pendant la collecte, le traitement et le stockage des données.

IV.6.3 Quelles mesures sont prises pour améliorer la sécurité des données des médecins et des patients ?

- **Cryptage** : Mettre en œuvre des protocoles de cryptage forts pour protéger les données au repos et en transit. Cela garantit que les informations sensibles restent illisibles pour les utilisateurs non autorisés.
- **Contrôle d'accès** : Mettre en œuvre des contrôles d'accès stricts pour garantir que seul le personnel autorisé a accès aux dossiers des patients et aux données sensibles. Cela inclut des contrôles d'accès basés sur les rôles et des mécanismes d'authentification multi facteur.
- **Minimisation des données** : Adopter une stratégie de minimisation des données pour collecter uniquement les informations nécessaires sur les patients et limiter l'accès aux données sensibles sur la base du principe du moindre privilège.
- **Transmission sécurisée** : Utiliser des canaux de communication sécurisés pour transmettre les données des patients en toute sécurité sur les réseaux, empêchant ainsi leur interception par des acteurs malveillants.
- **Audits et contrôles réguliers** : Réaliser régulièrement des audits et des évaluations de sécurité pour identifier les vulnérabilités et garantir le respect des politiques et réglementations de sécurité. Mettre en œuvre des outils de surveillance continue pour détecter et répondre aux activités suspectes en temps réel.
- **Formation et sensibilisation des employés** : Organiser des sessions de formation régulières et sensibiliser le personnel de santé aux meilleures pratiques en matière de sécurité des données et à l'importance de protéger les informations des patients.

IV.6.4 Comment pouvons-nous améliorer la communication et les services à la clientèle pour nos clients ?

- **Canaux d'assistance améliorés** : Mise en œuvre de plusieurs canaux d'assistance tels que l'assistance téléphonique, l'assistance par e-mail, le chat en direct et un service d'assistance dédié pour fournir une assistance rapide aux clients.
- **Support client réactif** : Garantir des délais de réponse rapides aux demandes et problèmes des clients, avec des accords de niveau de service pour prioriser les cas urgents et fournir des résolutions en temps opportun.
- **Interaction personnalisée** : Adopter une approche personnalisée dans les interactions avec les clients, en s'adressant aux clients par leur nom et en adaptant les réponses à leurs besoins et requêtes spécifiques.
- **Communication proactive** : Tenir les clients informés des mises à jour des produits, des nouvelles fonctionnalités et des améliorations du service via des newsletters régulières, des e-mails ou des notifications dans l'application.
- **Formation et ressources** : Fournir du matériel de formation, des guides d'utilisation et des didacticiels vidéo pour aider les clients à optimiser leur utilisation de l'application et à résoudre les problèmes courants de manière indépendante.
- **Amélioration continue** : Utiliser les commentaires et les analyses des clients pour identifier les tendances, les problèmes et les opportunités d'amélioration de la prestation de services et de l'expérience utilisateur.

IV.7 Ressources clés

IV.7.1 Accords de partenariat avec les fabricants de machines d'endoscopie

Conclusion d'accords avec des entreprises qui produisent ou vendent des machines d'endoscopie pour intégrer de manière transparente notre technologie d'IA.

Programmes de formation complets pour notre équipe afin d'approfondir leur compréhension des machines et des procédures d'endoscopie.

Acquérir des connaissances spécialisées pour intégrer efficacement les capacités de l'IA dans les pratiques endoscopiques et aider les prestataires de soins de santé à utiliser notre technologie.

IV.7.2 Ressources de calcul haute performance

Ordinateurs ou serveurs avancés pour entraîner le modèle d'IA et prétraiter les images et les vidéos.

Garantir une puissance de calcul suffisante pour gérer efficacement des algorithmes complexes et de grands ensembles de données.

IV.7.3 Expertise en sécurité et cryptage des données

Embauche d'un expert en cybersécurité pour assurer la sécurité des données et mettre en œuvre des protocoles de cryptage robustes pour protéger les informations des patients et l'intégrité des applications.

IV.7.4 Protection du droit d'auteur et de la propriété intellectuelle

Obtention des droits d'auteur et des droits de propriété intellectuelle pour notre application afin de protéger nos innovations et d'empêcher toute utilisation non autorisée.

IV.7.5 Budget publicité et marketing

Investir dans des stratégies de marketing numérique pour augmenter la visibilité des applications et attirer des utilisateurs potentiels.

IV.7.6 Bibliothèques UI/UX et expertise en conception

Achat de bibliothèques et d'outils UI/UX pour améliorer l'interface utilisateur et l'expérience de l'application.

Embauche d'un concepteur qualifié pour créer des interfaces intuitives et visuellement attrayantes qui facilitent l'interaction des utilisateurs et l'efficacité du flux de travail.

IV.7.7 Solutions de stockage de données

Investir dans des solutions de stockage évolutives pour stocker et gérer en toute sécurité de grands volumes de données patient et d'images diagnostiques.

Assurer le respect des réglementations en matière de protection des données et mettre en œuvre des mesures de sauvegarde et de récupération.

IV.7.8 Expertise en gestion de bases de données

Établir un système de gestion de base de données robuste pour organiser et récupérer efficacement les informations sur les patients.

Mise en œuvre de protocoles pour l'intégrité, l'accessibilité et la confidentialité des données.

IV.7.9 Collaboration avec les professionnels de santé

Former des partenariats avec des prestataires de soins de santé et des spécialistes pour valider l'exactitude et la convivialité du modèle d'IA en milieu clinique.

Intégrer les commentaires des professionnels de la santé pour affiner et améliorer les fonctionnalités de notre application.

IV.8 Charges et coûts

IV.8.1 Charges et coûts

a. Coûts de Cloud Firestore (base de données) :

Structure	Petite	Moyenne	Grande	Prix mensuel (DZD)
Stockage (Go)	10	50	200	1Go x 24,66
Opérations d'écriture	100 000	500 000	1 000 000	100 000(opération)×24,66
Opérations de suppression	10 000	50 000	50 000	100 000(opération)××2,74
Opérations de lecture	500 000	2 000 000	10 000 000	100 000(opération)××8,22

Tableau 8: Tarification mensuelle des services de stockage selon la taille et le volume des opérations [41]

- Coût annuel (DZD) :

Structure	Stockage (DZD)	Opérations d'écriture (DZD)	Opérations de suppression (DZD)	Opérations de lecture (DZD)	Total (DZD)
Petite	2 959,2	295,92	3,288	493,2	3 751 ,608
Moyenne	14 796	479,6	16,44	972,8	18 264,84
Grande	59 184	2 956,8	32,88	9 864	72 037,68

Tableau 9: Tarification annuel des services de stockage selon la taille et le volume des opérations

b. Ordinateur : 450 000 DZD

c. Bibliothèque UX/UI : 450 000 DZD

d. Budget Marketing : 600 000 DZD

e. Coûts de l'équipe (4 Person) : 3 840 000 DZD par an

f. Fonds d'urgence : 1 000 000 DZD

IV.8.2 Frais de réalisation

Structure	Prix (DZD)
Petite	10 000
Moyenne	20 000
Grande	75 000
Total	6340 000

Tableau 10:Frais de réalisation pour chaque structure

IV.8.3 Objectif

Notre objectif pour la première année est de vendre 18 applications. Le tableau ci-dessous démontrera notre objectif plus en détail :

Structure	Numéro d'application	Percentage d'objectif total	Total (DZD)
Petite	10	55,5%	100 000
Moyenne	5	27,7%	100 000
Grande	3	16,8%	225 000
Total	18	100%	425 000

Tableau 11: Répartition des objectifs et des montants totaux selon la taille des applications

Total année 1 : 6 765 000 DZD

IV.9 Revenus

Structure	Numéro d'application	Percentage d'objectif total	Pourcentage d'une application	Total (DZD)
Petite	10	55,5%	5.55%	100 000
Moyenne	5	27,7%	5.54%	100 000
Grande	3	16,8%	5.6%	225 000

Tableau 12: Répartition des objectifs, pourcentages par application et montants totaux selon la taille des applications

Total Frais : 6 765 000 DZD

En maximise En :

Structure	Numéro d'application	Pourcentage d'une application maximise	Prix d'une application (DZD)	Total (DZD)
Petite	10	94,5%	180 000	1800 000
Moyenne	5	94,4%	340 000	1700 000
Grande	3	94,4%	1260 000	3780 000

Tableau 13: Répartition des frais maximisés selon la taille des applications

Total : 7280 000 DZD

En première année, nos coûts s'élèvent à **6 765 000 DZD**, tandis que nos revenus atteignent **7 280 000 DZD**. Cela indique un résultat financier positif, avec des revenus dépassant les coûts. Cela suggère une performance financière initiale saine.

Conclusion

En conclusion, ce chapitre détaille une stratégie complète pour exploiter les ressources clés et les initiatives stratégiques qui sous-tendent la viabilité et la scalabilité du projet CeliaScan. En priorisant les partenariats avec les leaders de l'industrie, en investissant dans des technologies de pointe et en renforçant les mesures de sécurité des données, notre projet vise à établir un avantage concurrentiel sur le marché. Les projections financières détaillées soulignent une approche équilibrée pour gérer les coûts tout en maximisant le potentiel de revenus, assurant une trajectoire prometteuse pour atteindre les objectifs commerciaux et offrir des solutions de santé impactantes.

Conclusion Générale

Les résultats obtenus démontrent que CeliaScan peut réduire significativement le temps et les coûts liés aux méthodes traditionnelles de diagnostic tout en augmentant la précision et la fiabilité des résultats. Les performances des différents modèles de classification utilisés ont prouvé l'efficacité de l'IA dans le diagnostic de la maladie cœliaque.

CeliaScan représente une avancée majeure dans le domaine du diagnostic médical assisté par IA, offrant des solutions innovantes pour les cliniciens et améliorant la qualité des soins aux patients. En utilisant des techniques avancées d'apprentissage profond, CeliaScan analyse les images endoscopiques du duodénum pour prédire avec une grande précision la présence d'atrophie villositaire. Cela permet aux gastro-entérologues de déterminer de manière optimale les sites de biopsie, réduisant ainsi le nombre de procédures invasives nécessaires.

Les perspectives futures pour CeliaScan sont prometteuses. L'optimisation continue des algorithmes, l'intégration de nouvelles données cliniques et l'extension de l'application à d'autres maladies gastro-intestinales ouvriront la voie à des diagnostics encore plus précis et à une meilleure gestion des maladies chroniques. En améliorant constamment la technologie et en élargissant son champ d'application, CeliaScan pourrait transformer la manière dont les maladies gastro-intestinales sont diagnostiquées et traitées.

Références

- [1] F. H. T. A. Gujral N, «Celiac disease: prevalence, diagnosis, pathogenesis and treatment,» *World J Gastroenterol*, vol. 18, n° 142, pp. 6036-59, 2012 Nov 14.
- [2] E. H. D. & L. C. Cristian-Andrei Stoleru, «Automated detection of celiac disease using Machine Learning Algorithms,» *Scientific Reports*, vol. 12, 2022.
- [3] A. C. (.c. I. Julio C. Bai (Chair, «Maladie Coeliaque,» *WGO Global Guidelines*, Juillet 2016.
- [4] S. staff, «SickKids,» 15th March 2021. [En ligne]. Available: <https://www.aboutkidshealth.ca/celiac-disease>.
- [5] [En ligne]. Available: <https://fac.umc.edu.dz/snv/bibliotheque/biblio/mm/2021/Evolution%20de%20la%20pr%C3%A9valence%20de%20la%20maladie%20coeliaque%20dans%20la%20r%C3%A9gion%20de%20Constantine.pdf>.
- [6] «wikipedia,» 19 juin 2024 . [En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Gluten>.
- [7] [En ligne]. Available: <https://www.mayoclinic.org/diseases-conditions/celiac-disease/symptoms-causes/syc-20352220>.
- [8] «Nutrixel info,» [En ligne]. Available: <https://nutrixel-info.fr/index/intestin-grele/>.
- [9] L. FINEL, «bonheurediet,» [En ligne]. Available: <https://bonheurediet.com/les-etapes-de-la-digestion-partie-5-lintestin-grele/>.
- [10] [En ligne]. Available: https://medecine.univ-batna2.dz/sites/default/files/medecine/files/histologie_de_lintestin_grele.pdf.
- [11] H. Histology, «sciencedirect,» 2023. [En ligne]. Available: Les villosités intestinales sont de petites saillies de la muqueuse intestinale, mesurant entre 0,5 et 1 mm de hauteur. Leur forme et leur longueur varient selon la région spécifique de l'intestin grêle. Elles sont accompagnées des éléments suivants : .
- [12] «enterofytol,» [En ligne]. Available: <https://enterofytol.be/inconfort-digestif/comprendre-les-intestins/>.
- [13] H. Q. E. J. C. b. S. K. L. b. G. B. b. H. G. S. X. L. H. R. G. Y. L. Xinle Wang, «Celiac disease diagnosis from videocapsule endoscopy images with residual learning and deep feature extraction,» *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, pp. 0169-2607, 19 November 2019.
- [14] «Maladie coeliaque,» [En ligne]. Available: <https://maladie-coeliaque.com/symptomes-et-cause>.
- [15] K. S. K.-S. I. K. K. M. M. R.-K. C. S. R. T. R. A. R. C. G. C. R. D. J. G. P. H. A. K. T. M. M. N. S. P. A. S. K. W. K. W. M. Husby S, «European Society Paediatric Gastroenterology, Hepatology and Nutrition Guidelines for Diagnosing Coeliac Disease 2020,» *J Pediatr Gastroenterol Nutr*, vol. 70, n° 11, pp. 141-156, 2020 Jan.
- [16] «JOHNS HOPKINS MEDICINE,» [En ligne]. Available: <https://www.hopkinsmedicine.org/health/treatment-tests-and-therapies/upper-gi-endoscopy>.
- [17] [En ligne]. Available: <https://maladie-coeliaque.com/comment-est-diagnostiquee-la-maladie-coeliaque/>.
- [18] «Ramsay santé,» [En ligne]. Available: <https://www.ramsaysante.fr/vous-etes-patient-en-savoir-plus-sur-ma-pathologie/echoendoscopie-digestive>.
- [19] M. D. R. M. J. S. M. A. M. P. O. M. C. M. M. T. S. M. J. W. M. S. M. V. T. M. A. P. M. E. Markus W. Scheppach, «Detection of duodenal villous atrophy on endoscopic images using a deep learning algorithm,» *GASTROINTESTINAL ENDOSCOPY*, vol. 97, pp. 911-916, No. 5 : 2023.
- [20] H. S. V. A. U. A. Wimmer G, «Architectures de réseaux neuronaux,» *informatique (y*

- compris les notes de cours de sous-série en intelligence artificielle et les notes de cours en bioinformatique).*, vol. Vol 10170 LNCS., n° %110, pp. 104-113, 2017.
- [21] H. G. L. B. L. Z. C. E. e. a. Zhou T, «Analyse quantitative des patients atteints de la maladie cœliaque par endoscopie par capsule vidéo une méthode d'apprentissage profond.», *Informatique en biologie et en médecine.*, n° %185, pp. 1-6, 2017.
- [22] C. R., «IBM,» 20 December 2023. [En ligne]. Available: <https://www.ibm.com/blog/machine-learning-types/>.
- [23] S. Deb, «Medium,» 28 Aug 2019. [En ligne]. Available: <https://medium.com/edureka/what-is-a-neural-network-56ae7338b92d>.
- [24] É. Blent, «blent,» 11 févr 2022. [En ligne]. Available: <https://blent.ai/blog/a/svm-support-vector-machine>.
- [25] S. Benhur, «Builtin,» 25 Jan 2022. [En ligne]. Available: <https://builtin.com/machine-learning/siamese-network>.
- [26] «Qu'est-ce que le deep learning ?,» [En ligne]. Available: <https://www.oracle.com/dz/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-deep-learning/>.
- [27] N. Shahriar, «What is Convolutional Neural Network — CNN (Deep Learning),» 1 Feb 2023. [En ligne]. Available: <https://nafizshahriar.medium.com/what-is-convolutional-neural-network-cnn-deep-learning-b3921bdd82d5>.
- [28] A. H. Reynolds, «Convolutional Neural Networks (CNNs),» 2019 . [En ligne]. Available: <https://anhreynolds.com/blogs/cnn.html>.
- [29] «Image Filtering Image Processing,» [En ligne]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d4/d86/group__imgproc__filter.html.
- [30] D. A. Rosebrock, «Practical Python and OpenCV: An Introductory, Example Driven Guide to Image Processing and Computer Vision,» *pyimagesearch*, 21 August 2016.
- [31] «Image Thresholding,» OpenCV, [En ligne]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html.
- [32] «Contour Features,» OpenCV , [En ligne]. Available: https://docs.opencv.org/4.x/dd/d49/tutorial_py_contour_features.html.
- [33] «K-Means Clustering in OpenCV,» OpenCV , [En ligne]. Available: https://docs.opencv.org/3.4/d1/d5c/tutorial_py_kmeans_opencv.html.
- [34] M. SAKEN, M. B. YAĞCI et N. YUMUŞAK, «Impact of image segmentation techniques on celiac disease classification usingscale invariant texture descriptors for standard flexible endoscopic systems,» *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, vol. 29, n° %1 2, p. 598 – 615, 1-1-2021.
- [35] 2. S. R. M. Farheen Ramzan1&Muhammad Usman Ghani Khan1&Asim Rehmat1&Sajid Iqbal1, «A Deep Learning Approach for Automated Diagnosis and Multi-ClassClassification of Alzheimer's Disease Stages Using Resting-State fMRland Residual Neural Networks,» *Medical Systems*, 11 October 2019.
- [36] P. Napoletano, F. Piccoli et a. R. Schettini, «Anomaly Detection in Nanofibrous Materials byCNN-Based Self-Similarity,» *sensors*, pp. 1-15, 12 January 12 January 2018.
- [37] Amaury, «De geek à directeur technique,» 6 février 2009. [En ligne]. Available: <https://www.geek-directeur-technique.com/2009/02/06/le-cycle-iteratif>.
- [38] H. N. B, «Confusion Matrix, Accuracy, Precision, Recall, F1 Score,» Medium, 10 Dec 2019. [En ligne]. Available: <https://medium.com/analytics-vidhya/confusion-matrix-accuracy-precision-recall-f1-score-ade299cf63cd>.
- [39] «Sensitivity, Specificity et ROC curve,» kobia, [En ligne]. Available: <https://kobias.fr/classification-metrics-sensitivity-specificity-roc/>.
- [40] A. Dyakonov, «AUC ROC,» dasha, 26 April 2021. [En ligne]. Available: <https://dasha.ai/en-us/blog/auc-roc>.
- [41] «firebase,» [En ligne]. Available: <https://firebase.google.com/pricing>.

[47] [En ligne].

[48] Cabinet Dr GAOUAR Fethallah Hépatogastro-Entérologue

[49] "Interface de mon application de bureau," capture d'écran, 2024.