

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

ET POPULAIRE REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

- Tlemcen - Université Aboubakr Belkaïd

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER 2**

En : Génie biomédical

Spécialité : Imagerie médicale

Par : BOUAZZA HADJER

Sujet

Développement d'un algorithme de segmentation automatique des lésions musculo squelettique rachidienne

Soutenu publiquement, le **02 / 07 / 2024** devant le jury composé de :

Mr. Bengana Abd El Fatih	MCA	Université de Tlemcen	Président
Mr. Boukli Hacene Ismail	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrant
Mr. Benchikh Abd El Hafid	Doctorant	Université de Tlemcen	Co- Encadrant
Mr. Hadj Ahmed Ismail	MCB	Université de Tlemcen	Examineur 1
Mr. Mansri Nabil	Médecin radiologue	Université de Tlemcen	Examineur 2
Mr. Maachou Omar	Maitre-assistant	Université de Tlemcen	Responsable I2E-Tlemcen

Année universitaire : 2023 /2024

REMERCIEMENT

Je souhaite avant tout exprimer ma profonde gratitude à « **Allah** » le Tout-Puissant, qui m'a accordé la santé, la patience et la volonté nécessaires pour entreprendre et mener à bien ce modeste travail. Ce projet représente le fruit de plusieurs années de dévouement et de sacrifices, et c'est grâce à Sa bénédiction que j'ai pu surmonter les défis et persévérer jusqu'à l'accomplissement de cette œuvre.

D'entrée de jeu, je tiens à remercier chaleureusement le professeur **Boukli Hacene Ismail** non seulement pour ses grands efforts, sa présence permanente, ses orientations et ses conseils, mais aussi pour exprimer ma profonde et sincère gratitude à cette personne exceptionnelle.

Le professeur a été mon premier modèle de rôle dans la vie universitaire avec son traitement humble et sa haute morale, un exemple d'humilité, d'ouverture et de gentillesse. Du premier cours auquel j'ai assisté avec lui jusqu'au dernier moment de sa supervision de moi, il était toujours présent avec son soutien et ses conseils.

Il n'était pas seulement mon superviseur d'études, mais mon deuxième père, et cette relation a dépassé les limites de la relation traditionnelle entre l'étudiant et son professeur pour devenir une relation intime similaire à celle du père à sa fille.

Au terme de ce discours, qui ne peut s'accomplir, je tiens à exprimer ma grande gratitude et mes profonds remerciements du fond du cœur au professeur compétent. Je vous le dis : la bénédiction de Dieu en vous et votre préservation, vous rendant toujours au sommet des sommets, et Dieu est beaucoup comme vous.

Je souhaite également remercier tous les doctorants **Benchikh Abd El Hafid** et **SAIM Meriem** qui ont pris le temps de discuter de mon sujet. Chacun de ces échanges m'a grandement aidé à avancer dans ma recherche, en apportant des perspectives nouvelles et enrichissantes.

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur de juger mon travail : **Mr. Bengana Abd El Fatih** président du jury, et **Mr. Hadj Ahmed Ismail**, examinateur. Leur expertise, leurs observations et leurs commentaires perspicaces ont été inestimables pour l'amélioration et la validation de ma recherche.

Je voudrais exprimer ma gratitude particulière au **Dr. Mansri Nabil** pour son soutien inestimable non seulement en tant que membre du jury, mais aussi pour sa disponibilité, son expertise et ses conseils tout au long de ce projet. Grâce à son aide précieuse, j'ai pu surmonter de nombreux défis et progresser dans ma recherche.

Enfin, Ma reconnaissance va également aux professeurs de l'Université de Tlemcen, et le centre I2E qui m'ont fourni les outils et les connaissances nécessaires à la réussite de mes études universitaires. Leur soutien continu et leur dévouement à l'enseignement ont été une source constante d'inspiration.

Dédicace

À mes chers parents,

Ces notes vous sont dédiées en témoignage de ma profonde gratitude et de mon amour éternel. Vous avez été mes premiers enseignants, mes premiers soutiens, et ma plus grande source d'inspiration.

À **ma mère**, que je considère non seulement comme une mère, mais aussi comme une sœur et une amie pour la vie. Ton amour inconditionnel, ta patience infinie et tes innombrables sacrifices ont été le socle de mon succès. Ton soutien indéfectible et tes encouragements constants ont été la lumière qui m'a guidé à chaque étape de mon parcours. Ce travail est le fruit de tes efforts et de ta patience considérable. Il représente la première petite partie de tout ce que tu as investi en moi, un effort que je ne pourrai jamais exprimer pleinement.

À **mon père**, mon soutien indéfectible et le pilier de ma vie. Chaque fois que je me retourne, je te trouve debout à côté de moi, prêt à m'aider et à me guider avec ta sagesse, ta force et ton dévouement. Tu as été pour moi un modèle de persévérance et de détermination. Tes précieux conseils et ta confiance en mes capacités m'ont donné le courage de réaliser mes rêves.

Sans votre amour, votre soutien et vos sacrifices, ce travail n'aurait pas été possible. Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments de doute, et pour cela, je vous en serai éternellement reconnaissant.

À **l'ingénieur Monsieur Maleki Ezze El-Din**,

Je tiens à exprimer ma plus profonde gratitude à Monsieur **Maleki Ezze El-Din**, ingénieur biomédical, qui a été pour moi bien plus qu'un simple superviseur, tant sur le plan professionnel qu'académique. Il a été un frère et un mentor, particulièrement dans notre spécialité. Je lui dédie ces mots en reconnaissance de tous les efforts déployés, des conseils avisés et des orientations précieuses qu'il m'a prodigués. Sans son soutien infaillible et sa générosité dans le partage de son expérience et de ses connaissances, je n'aurais pas pu saisir les opportunités qui se sont présentées à moi. Sa présence constante, surtout dans les moments critiques, a été une source inestimable de soutien et d'inspiration.

À Monsieur Fani Omar,

Je souhaite également exprimer ma reconnaissance à Monsieur Ammar Al-Siddiq, qui a marqué ma vie universitaire dès le premier jour. Il a toujours fait preuve d'un enthousiasme contagieux, d'encouragements sincères, et d'une ambition constante pour avancer. Son soutien et son implication ont été essentiels à mon développement personnel et académique. Les mots me manquent pour exprimer pleinement ce que je ressens, et j'espère que cette humble dédicace saura transmettre toute ma gratitude et mon respect pour vous deux.

Avec tout mon amour et ma gratitude

HADJER

ملخص

يركز هذا المشروع على تطوير خوارزمية التعلم العميق للتقسيم التلقائي للآفات العضلية الهيكلية. يتناول المشروع بشكل خاص آلام الظهر الناتجة عن الأمراض المختلفة التي تصيب العمود الفقري، مع تسليط الضوء على انتشار الفتق القرصي. يواجه أطباء الأشعة أحياناً صعوبات في تحديد هذه الحالة المرضية على صور التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، مما حفز البحث عن حل فعال. هدفت الدراسة إلى تطوير خوارزمية للتقسيم تعتمد على الذكاء الاصطناعي والتعلم العميق. تم إنشاء نموذج من نوع UNet لتحسين تقسيم صور التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، من خلال زيادة تباين الأقراص الفقرية والسماح بتمييز أكثر فعالية للهياكل المحيطة. بدقة تبلغ 99.98٪، يعزز هذا النموذج المتكامل في تطبيق مخصص اكتشاف الفتق القرصي ويعزز جودة التشخيصات

الكلمات المفتاحية: التقسيم التلقائي، التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI)، التعلم العميق، نموذج UNet، الفتق القرصي، الأقراص الفقرية

Résumé

Ce projet se concentre sur le développement d'un algorithme à base de l'apprentissage profond de segmentation automatique pour les lésions musculo-squelettiques. Il examine en particulier les douleurs dorsales causées par diverses maladies affectant la colonne vertébrale, en mettant en lumière la prévalence de la hernie discale. Les radiologues rencontrent parfois des difficultés à repérer cette pathologie sur les images d'Imagerie par résonance magnétique (IRM), ce qui a motivé la recherche d'une solution efficace. L'étude visait à développer un algorithme de segmentation basé sur l'intelligence artificielle et l'apprentissage profond. Un modèle de type UNet a été créé pour améliorer la segmentation des images d'IRM, en augmentant le contraste des disques intervertébraux et en permettant une distinction plus efficace des structures environnantes. Avec une précision de 99,98 %, notre modèle, intégré dans une application dédiée, améliore la détection des hernies discales et renforce la qualité des diagnostics.

Mot clés : segmentation automatique, Imagerie par résonance magnétique (IRM), Apprentissage profond, model UNet, hernie discale, les disques intervertébraux

Abstract

This project focuses on the development of an automatic segmentation algorithm based deep learning for musculoskeletal lesions. It specifically examines back pain caused by various diseases affecting the spine, highlighting the prevalence of disc herniation. Radiologists sometimes encounter difficulties in identifying this pathology on Magnetic Resonance Imaging (MRI) images, which motivated the search for an effective solution. The study aimed to develop a segmentation algorithm based on artificial intelligence and deep learning. A UNet-type model was created to enhance the segmentation of MRI images, increasing the contrast of intervertebral discs and allowing for a more effective distinction of surrounding structures. With an accuracy of 99.98%, this model, integrated into a dedicated application, improves the detection of disc herniations and strengthens the quality of diagnoses.

Keywords: automatic segmentation, Magnetic Resonance Imaging (MRI), deep learning, Unet model, disc herniation, intervertebral discs.

Table des matières

Remerciements.....	II
Dédicace.....	IV
Résumé.....	VI
Table de Matière.....	VII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations.....	XV
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Le Disque Intervertébral : Anatomie et physiologie	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Anatomie de la colonne vertébrale.....	6
I.2 .1 Structure et fonction des vertèbres	8
I.2.2 Les Ligaments.....	8
I.2.3 Le contenu canal rachidien.....	9
I.2.4 Le Disque intervertébral.....	10
I.2.4.1 La structure	10
I.2.4.2 La composition.....	11
I.2.4.3 Le Rôle des disques intervertébraux	13
I.3 Pathologie de la hernie discale.....	13
I.3.1 Processus de formation d'une hernie discale	14
I.3.2 Types de hernies discales et leurs caractéristiques.....	15
I.4 Symptômes et Manifestations cliniques et méthodes de diagnostic	16
I.4.1 Signes cliniques.....	16
I.4.2 Symptômes locaux.....	16
I.4.3 Symptômes fonctionnels.....	17

I.4.4 Facteurs de risque.....	17
I.4.5 Le diagnostic des hernies discales.....	18
I.4.5.1 Diagnostic clinique de la LHD.....	18
I.4.5.2 Techniques d'imagerie médicale dans le diagnostic des hernies discales	18
I.4.5.2.1 la radiographie	18
I.4.5.2.2 La tomodensitométrie et la myélographie tomodensitométrique	19
I.4.5.2.3 Myélographie.....	20
I.4.5.2.4 L'imagerie par résonance magnétique.....	20
I.4.6 Traitement de la hernie discale	22
I.4.6.1 Traitement médicale.....	22
I.4.6.2 Le traitement chirurgical.....	23
I.5 Conclusion.....	25
Chapitre II : Etat de l'art et le principe de l'apprentissage profond en traitement des images médicales	26
II.1 Introduction	27
II.2 Intelligence artificielle.....	27
II.2.1 Historique	28
II.2.1.1 L'apprentissage automatique.....	30
II.2.1.2 L'apprentissage profond.....	31
II.3.1.2.1 Réseaux de neurones biologiques.....	32
II.3.1.2.2 Les réseaux de neurones artificiels	33
II.3.1.2.1.1 Le perceptron monocouche.....	34
II.3.1.2.1.2 Le perceptron multicouche (PMC).....	35
II.3.1.2.3 Introduction des réseaux de neurones convolutifs (CNN).....	36
II.3.1.2.4 Réseaux de neurones convolutifs.....	36

II.3.1.2.5 Une architecture CNN.....	37
II.3.1.2.5.1 La couche de convolution (CONV)	38
II.3.1.2.5.2 La couche de pooling (POOL)	39
II.3.1.2.5.3 Fonction d'activation.....	40
II.3.1.2.5.4 La couche "entièrement connectée" (FC)	42
II.3.1.2.5.5 La couche de perte (LOSS)	43
II.3.1.2.5.6 L'optimisation.....	43
II.3.1.3 Apprentissage par transfert.....	43
II.2 Etat de l'art	44
II.4 Conclusion	47
Chapitre III : Expérimentations et Résultats	49
III.1 Introduction	50
III.2 La segmentation des images médicales par les méthodes d'apprentissage profond.....	50
III.3 La segmentation sémantique.....	51
III.4 Les différents modèles d'apprentissage profond pour la segmentation	51
III.4.1 U-Net.....	52
III.4.2 SegNet	53
III.4.2.1 SegNet est une architecture.....	53
III.4.3 VGGNET.....	54
III.4.3 .1 Architecture de VGGNet.....	55
III.4.3 .2 VGGN 16.....	55
III.4.3.3 VGGN 19.....	56
III.5 Les méthodes d'optimisation.....	56
III.5.1 Stochastic Gradient Descent (SGD)	56
III.5.2 Méthode Adam.....	56
III.6 Matériels	57

III.6.1 Environnement de travail	57
III.6.2 Langage de programmation, Framework et bibliothèques.....	57
III.6.3 Environnement de programmation en ligne.....	60
III.6.2 La base de données.....	61
III.7 L'évaluation métriques	61
III.7.1 La précision.....	62
III.7.2 Coefficient de Dice.....	62
III.7.3 Indice de Jaccard.....	62
III.8 Méthodes et Résultats.....	62
III.8.1 Prétraitement	63
III.8.2 L'augmentation de données.....	64
III.8.3 Comparaison avec etat de l'art et le model d'apprentissage par transfert.....	74
III.8.4 Application Medicale	75
III.9 Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	78
Les perspectives	79
Annexe.....	80
Références bibliographiques	105

Liste des figures

Figure I.1 : Architecture du rachis.....	7
Figure I.2 :Régions et courbures de la colonne vertébrale.....	7
Figure I.3 : Structure d'une vertèbre.....	8
Figure I.4 : Principaux ligaments du rachis	9
Figure I.5 : Le système nerveux.....	10
Figure I.6 : (a) : Anatomie du disque intervertébral en vue latéral. (b) : Anatomie du disque intervertébral en vue axial.....	11
Figure I.7 : Schéma de protéoglycanes	12
Figure I.8 : les différentes localisations des hernies discales	14
Figure I.9 : les processus de formation d'hernie discale.....	14
Figure I.10 : Schéma d'une vue latérale gauche du rachis : le disque endommagé se déchire vers l'arrière et la hernie vient comprimer un nerf.....	15
Figure I.11 : les types de la hernie discale :(a) : Hernie de type Hansen 1. (b) : Hernie de type Hansen 2.....	16
Figure I.12 : Exemple de table de traction lombaire et cervicale.....	22
Figure I.13 : Les trois voies d'infiltration lombaire.....	23
Figure II.1 : les différents types d'intelligence artificielle	28
Figure II.2 : Une brève chronologie de l'IA avec certaines des avancées marquantes...	30
Figure II.3 : Exemple de l'apprentissage automatique.....	30
Figure II.4 : Exemple de L'apprentissage profond.....	31
Figure II.5 : Dendrites, soma et axone myélinisé, Réseaux de neurones biologiques.....	32
Figure II.6 : Illustration d'un réseau de neurones artificiel.....	33

Figure II.7 : Illustration du model de perceptron monocouche.....	34
Figure II.8: Illustration du modèle de perceptron multicouche.....	35
Figure II.9 : Illustration de l’architecture de réseau neuronal convolutionnel.....	37
Figure II.10 : Exemple de principe du filtre convolutionnel.....	38
Figure II.11: Une Comparaison entre pooling maximum et du pooling moyen.....	40
Figure II.12 : la fonction REIU.....	41
Figure II.13 : la fonction Sigmoidé.....	42
Figure II.14: Illustration du modèle de couche entièrement connecte	42
Figure II.15: Illustration schématique de l’architecture CNN utilisée dans le cadre proposé pour détecter une sténose sévère de la colonne vertébrale centrale.....	45
Figure II.16: Illustration schématique de l’architecture CNN utilisée dans le cadre proposé pour détection de la sténose rachidienne lombaire à partir d'images IRM à l'aide d'une technique de segmentation sémantique.....	46
Figure II.17 : Schéma fonctionnel de la segmentation d'images	47
Figure III.1 : Processus typique de segmentation par apprentissage profond avec un réseau neuronal convolutif.....	49
Figure III.2 : Image et étiquette des pixels.....	50
Figure III.3 : Illustration de l’architecture de U-Net.....	53
Figure III.4 : Illustration de l’architecture de SegNet.....	55
Figure III.5 : Illustration de l’architecture de VGGNet.....	56
Figure III.6 : Le réseau de neurones VGG16.....	66
Figure III.7 : Les résultats de segmentation du model Unet.....	66
Figure III.8 : La précision et la perte du model Unet.....	66
Figure III.9 : Les résultats de segmentation du model SegNet.....	67
Figure III.10 : La précision et la perte du model Unet.....	68
Figure III.11 : Les résultats de segmentation du model UNet avec augmentation.....	68

Figure III.12 : La précision et la perte du model UNet avec augmentation.....	69
Figure III.13 : Les résultats de segmentation du model UNet_Vgg16 avec augmentation	69
Figure III.14 : La précision et la perte du model UNet_Vgg16 avec augmentation.....	69
Figure III.15: Les résultats de segmentation du model UNet_Vgg19 avec augmentation.	69
Figure III.16: La précision et la perte du model UNet_Vgg19 avec augmentation.....	70
Figure III.17: Les résultats de segmentation du model UNet pré-entraîner sur les images pré-entraîner T1+T2.....	71
Figure III.18 : La précision et la perte du model UNet pré-entraîner sur les images pré- entraîner T1+T2.....	71
Figure III.19 : Les résultats de segmentation du model UNet pré-entraîner sur les images pondère T1.....	72
Figure III.20 : La précision et la perte du model UNet pré-entraîner sur les images pré- entraîner T1+T2.....	72

Liste des tableaux

Tableau III.1 : les caractéristiques des ordinateurs utilisées.....	56
Tableau III.2 : Les résultats d'évaluation métriques du modelés UNet et SegNet.....	67
Tableau III.3 : Les résultats d'évaluation métriques des différentes model UNet avec augmentation	70
Tableau III.4 : Les résultats d'évaluation métriques des différentes model UNet avec augmentation	72
Tableau III.5 : Les résultats d'évaluation métriques des différentes model de segmentation des études réalisé	74

Liste des abréviations

IRM : Imagerie par résonance magnétique.

AI : Artificiel Intelligence

DL: Deep Learning

TDM: Tomodensitométrie (scanner).

LBP: Les lombalgies

NASS: North American Spine Society

LHD : la hernie discale lombaire

MEC : matrice extracellulaire

MDCT : la tomodensitométrie multi détecteur

AINS : anti-inflammatoires non stéroïdiens

RNA : Les réseaux neuronaux artificiels

PMC : le perceptron multicouche

MLP: the multilayer perceptron

LSS: lumbar spinal stenosis

CNN : Les réseaux de neurones convolutionnels (Convolutional neural network).

ANN : Les réseaux neuronaux artificiels

CONV : Convolution.

POOL: Pooling.

ReLU: Unité linéaire Rectifiés (Rectified Linear Unit).

FC: Couche entièrement connectée (Fully-connected)

VGG: Visual Geometry Group

ADAM : Estimation de moment adaptatif (Adaptive moment estimation).

SGDM: Stochastic gradient descent with momentum



Introduction Générale

Introduction générale

Imaginez-vous, si vous le souhaitez, dans la peau d'une personne qui souffre d'une hernie discale. Chaque mouvement est accompagné d'une douleur intense, et chaque instant est marqué par la peur de déclencher une crise. Dans le domaine médical, la hernie discale reste l'une des affections les plus préoccupantes et courantes qui affectent la colonne vertébrale. C'est un problème qui peut survenir à n'importe quel âge, provoquant une douleur invalidante et compromettant la qualité de vie des personnes qui en souffrent. La hernie discale se présente comme un défi insurmontable, altérant la qualité de vie de millions de personnes à travers le monde. Les disques intervertébraux sont des articulations qui lient des corps vertébraux adjacents tout en permettant d'assurer leur mobilité relative. Ils jouent également un rôle important d'amortisseurs mécaniques pour le rachis en supportant et redistribuant les chargements appliqués sur les vertèbres. Les disques intervertébraux sains se développent jusqu'à l'âge d'environ 20 ans. Selon la Caisse Nationale d'Assurance Maladie française, la lombalgie est la première cause d'invalidité avant l'âge de 45 ans. Elle coûte environ 2,3 milliards d'euros aux autorités de santé chaque année [1]. L'analyse révèle une prévalence élevée de 40% dans tous les secteurs, dépassant largement les données de la littérature européenne. Cette prévalence augmente avec l'âge, la nature du travail et les conditions de travail, notamment la manutention, le bruit et les vibrations. De plus, elle est également liée à une baisse du niveau d'instruction à Sétif (Algérie) [2].

Nous parlons de douleurs rachidiennes chroniques, d'inconfort, et de mobilité réduite, ainsi que de diminution de la qualité de vie en cas de hernie discale sévère. Dans de telles circonstances, un traitement chirurgical est préconisé.

Lorsque le diagnostic de hernie discale avancée est constaté, une intervention chirurgicale est malheureusement très souvent rendue nécessaire. Plusieurs modalités d'examen radiologiques ou d'IRM permettent à ce jour d'effectuer un diagnostic indirect de la hernie discale en évaluant l'état des structures et tissus adjacents. Le diagnostic est donc souvent indirect et l'étiologie des diagnostics effectués à l'aide de ces méthodes est toujours un sujet de recherche et de controverses. L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est une modalité qui offre une bonne visualisation. Segmenter image IRM pourrait fournir des informations quantitatives relatives aux disques intervertébraux, comme leur position, angle de rotation, taille, pourcentage de tissu restant, etc. Toutefois, la segmentation des vertèbres et des structures voisines en IRM reste une tâche difficile, principalement en raison du



Introduction Générale

mauvais contraste entre les os et les tissus mous. De plus, l'IRM tend à générer des images dont l'intensité est non homogène. La littérature propose plusieurs méthodes pour la segmentation des disques intervertébraux à partir d'IRM.

La segmentation de la hernie discale est une approche novatrice qui cherche à comprendre et à segmenter cette pathologie complexe, ouvrant ainsi la voie à des traitements plus ciblés et efficaces.

En parallèle, l'analyse d'images médicales a grandement profité de l'émergence de l'intelligence artificielle et plus particulièrement de l'apprentissage profond et sa capacité à résoudre des problèmes complexes de reconnaissance de formes. Cette capacité est conditionnelle à la disponibilité d'un grand nombre de données annotées, ce qui est très peu évident à obtenir dans le contexte médical et les données de patients scoliotiques en IRM ne font pas exception à la règle. Ceci nous a permis de poser les questions suivantes concernant nos objectifs dans ce projet :

- Comment améliorer la précision diagnostique et la détection de la hernie discale sur des images médicales en tenant compte des défis rencontrés par les radiologues, et quel rôle peuvent jouer les avancées technologiques et les méthodes d'analyse d'images pour optimiser cette détection ?
- Comment se forme une hernie discale d'un point de vue anatomique et quels sont les facteurs qui conduisent à sa formation ? Existe-t-il un traitement efficace sans intervention chirurgicale ?

Nous utilisons l'apprentissage profond, notamment les réseaux de neurones convolutifs les plus répandus, pour atteindre nos objectifs.

Ce manuscrit s'organise en trois chapitres présentés comme suit :

Chapitre 1 se concentre sur le contexte médical de l'approche d'aide au diagnostic proposée. Pour justifier l'utilisation de l'approche algorithmique, une étude approfondie des aspects anatomiques et fonctionnels du disque intervertébral est présentée, suivie d'une analyse de la hernie discale. L'anatomie du disque intervertébral est examinée en détail, tout comme la hernie discale. Les différentes techniques d'imagerie médicale utilisées pour explorer le disque intervertébral et ses anomalies sont également abordées. Enfin, une présentation des divers traitements possibles pour la hernie discale est proposée.



Introduction Générale

Dans le Chapitre 2 cette section, nous aborderons les recherches existantes dans la littérature, puis nous expliquerons les concepts fondamentaux des réseaux de neurones convolutifs. Nous examinerons en détail l'architecture d'un réseau neuronal convolutif ainsi que ses différentes composantes telles que les couches, les fonctions, les optimiseurs et les paramètres qui influent sur la qualité du réseau.

Le Chapitre 3 constitue le noyau de notre étude. Nous avons examiné la mise en œuvre de ce projet et toutes les méthodes qui ont été utilisées pour concrétiser cette application, allant de l'environnement de développement et des bibliothèques utilisées aux détails des tests et des résultats obtenus.

Chapitre I

**Le Disque Intervertébral : Anatomie et
physiologie**



I.1 Introduction

Les lombalgies (LBP) sont un problème de santé mondial répandu qui touche près des deux tiers des adultes signalant des maux de dos à un moment donné de leur vie [3]. Il est intéressant de noter cependant que la discopathie serait l'étiologie sous-jacente chez moins de 5% des patients atteints de lombalgie (**Schwarzer AC, 1976**) [4]. La hernie, qui désigne le déplacement du matériel du disque intervertébral au-delà des limites normales de l'espace disque, a initialement été décrit comme une 'Rupture' du disque touchant jusqu'à 10 % de la population dans certaines régions[3,5].

Selon la North American Spine Society (NASS), la hernie discale lombaire (LHD) se caractérise par un déplacement localisé du matériau du disque au-delà des limites normales de l'espace disque intervertébral, provoquant douleur, faiblesse ou engourdissement dans une distribution myotomique ou dermatomique, la différenciant ainsi de la lombalgie facetogène, discogène, myofasciale et d'autres lombalgies non spécifiques [6]. une étude observationnelle longitudinale menée dans tous les hôpitaux publics de Norvège a révélé que l'incidence de la LHD se situe entre 5 et 20 cas pour 1000 adultes par an [7]. La LHD est plus fréquente chez les adultes âgés de 30 à 50 ans, avec un ratio hommes/femmes de 2 :1. Les hernies discales lombaires (HDL) sont principalement localisées au niveau des vertèbres L4-L5 ou L5-S1 chez les patients âgés de 25 à 55 ans, représentant plus de 95% des cas. Pour diagnostiquer une HDL avec radiculopathie, des tests cliniques tels que des tests musculaires manuels, des tests sensoriels et un test d'élévation de la jambe droite sont recommandés.

Les douleurs lombaires sont un problème de santé majeur, de plus en plus fréquent en raison du vieillissement de la population mondiale [9]. Le diagnostic de la hernie discale lombaire repose principalement sur des examens d'imagerie tels que la radiographie, la tomodensitométrie et l'IRM, cette dernière étant la méthode la plus précise avec une fiabilité pouvant atteindre 97% [10]. Des lignes directrices ont été établies pour orienter les cliniciens dans le diagnostic de cette pathologie et pour décider des approches thérapeutiques à envisager ([Rao, Scuderi, Scuderi, Grewal, & Sandhu, 2018](#)) [8].

Ce chapitre se concentre sur le contexte médical du problème étudié. Il débute en présentant des notions de base en anatomie et physiopathologie pour établir le cadre de l'étude. Une analyse anatomique des disques intervertébraux est d'abord proposée, mettant en lumière leur composition, leurs fonctions et leur importance dans la colonne vertébrale



humaine. Ensuite, la problématique clinique de la hernie discale est abordée, avec une description de ses symptômes et des facteurs favorisant son apparition. Enfin, le chapitre se conclut par une présentation des différentes techniques d'imagerie médicale utilisées pour diagnostiquer les hernies discales.

I.2 Anatomie de la colonne vertébrale

Le rachis humain est la structure principale du squelette. Il constitue l'axe central du corps humain flexible de l'organisme, s'étendant de l'arrière du crâne au bassin. Il remplit essentiellement trois fonctions : supporter le poids corporel en distribuant et en transmettant les charges appliquées, permettre le mouvement du tronc et du crâne grâce à sa structure, et protéger le système nerveux en abritant la moelle épinière.

Le rachis est composé de 33 à 34 vertèbres superposées les unes sur les autres par des disques intervertébraux. Les vertèbres sont réparties de manière craniocaudale (**Figure I.1**) :

- **Le rachis cervical** : comprenant 7 vertèbres mobiles au niveau du cou, est relié à la base du crâne. Les vertèbres cervicales sont numérotées de C1 à C7.

- **Le rachis thoracique** : lié au thorax dans la partie supérieure et médiane du tronc, est composé de 12 vertèbres numérotées de T1 à T12.

- **Le rachis lombaire** : se situe au niveau de l'abdomen et comprend 5 vertèbres numérotées L1 à L5, Elles sont les plus grandes vertèbres et les plus mobiles.

- **Le sacrum** : situé au niveau du bassin, comprend 5 vertèbres fusionnées numérotées de S1 à S5. Les vertèbres sacrées se soudent à partir de l'âge de 10-12 ans.

- **Le coccyx** : formé de 3 à 5 vertèbres, constitue la terminaison de la colonne vertébrale. Les vertèbres coccygiennes sont partiellement mobiles (semi-mobiles) et contribuent à la protection de la partie inférieure du tube digestif [11].

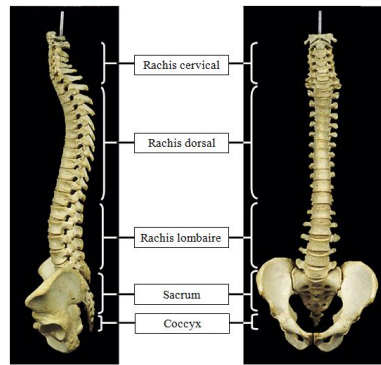


Figure I.1 :Architecture du rachis [12]

La dernière vertèbre lombaire s'articule avec le sacrum et le bassin. À l'intérieur des vertèbres se trouve un canal, appelé le canal rachidien, qui permet le passage de la moelle épinière et des racines nerveuses. Entre les vertèbres, se trouvent de petits orifices (les foraminaux) qui laissent passer les racines nerveuses [2]. La colonne vertébrale comporte de nombreuses articulations qui permettent de soutenir et d'assurer la mobilité du crâne, ainsi que la flexion du cou et du dos. Elle présente également des points d'attache pour les côtes (entourant la cavité thoracique) et elle soutient et protège la moelle épinière [3].

Dans le plan frontal, aucune courbure n'est anormalement remarquée (physiologiquement). Néanmoins, dans le plan sagittal, on observe trois courbures distinctes selon les trois segments (**Figure I.2**) :

- ✓ Deux lordoses (cervicale et lombaire)
- ✓ Une cyphose (dorsale et sacrale) [4].

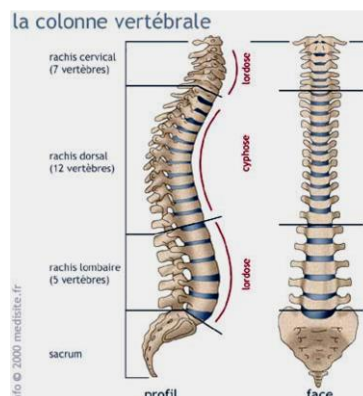


Figure I.2 :Régions et courbures de la colonne vertébrale



I.2 .1 Structure et fonction des vertèbres

La colonne vertébrale est composée de plusieurs vertèbres formant des unités segmentaires dotées d'articulations fonctionnelles et composées de deux vertèbres séparés par un disque intervertébral. Ces unités se divisent en deux segments: le segment antérieur comportant les deux corps vertébraux mitoyens séparés, qui supportent le poids et absorbe le choc de la colonne vertébrale pendant les activités physiques, et le segment postérieur qui est composé des arcs vertébraux, des épineuses postérieures, des apophyses transverses et des apophyses articulaires avec chaque facette articulaire qui protège les racines nerveuses et la moelle épinière tout en permettant les mouvements d'extension et de rotation. L'arc neural et le corps vertébral forment un espace vide appelé foramen vertébral, qui constitue le canal rachidien à travers lequel passe la moelle épinière (**Figure I.3**) [11].

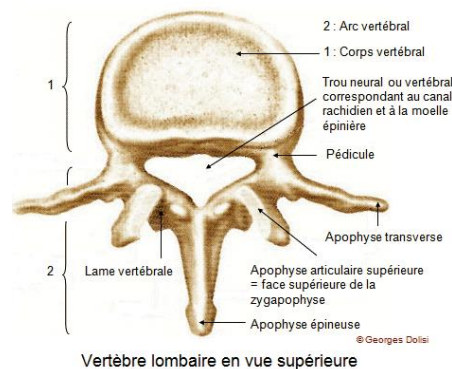


Figure I.3 : Structure d'une vertèbre [13]

I.2.2 Les Ligaments

Le système ligamentaire du rachis est composé de cinq ligaments qui jouent principalement un rôle protecteur (**Figure I.4**). Les deux ligaments, appelés ligaments longitudinaux antérieur et postérieur, entourent les corps vertébraux et les disques intervertébraux qui les relient. Le ligament, connu sous le nom de ligament jaune, est présent sur la face antérieure des lames. Ces trois ligaments ont un comportement viscoélastique et sont extrêmement résistants aux forces de traction grâce à l'orientation parallèle de leurs fibres de collagène par rapport à l'axe du rachis (**Rannou F. M.-B., 2004**) [12].

Les ligaments inter-épineux et supra-épineux relient les vertèbres adjacentes à travers leurs processus épineux. Ils ont une résistance faible. Les ligaments les moins résistants sont



les ligaments supra-épineux, ils sont lâches et pauvres en collagène (Rannou F. M.-B., 2004) [12].

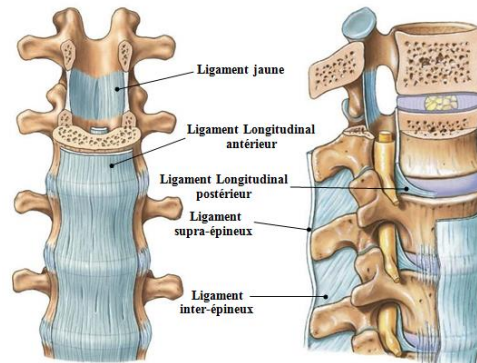


Figure I.4 : Principaux ligaments du rachis (Rannou F. M.-B., 2004) [12]

I.2.3 Le contenu canal rachidien

Les vertèbres sont des os qui s'empilent les uns sur les autres et s'articulent grâce à leur corps vertébral et leur arc postérieur, formant ainsi le canal rachidien qui protège la moelle épinière. Ce canal joue un rôle crucial en permettant le passage de la moelle épinière tout en la soutenant et en la protégeant. Au niveau T12-L1, la moelle épinière se termine en un cône terminal d'où émergent les racines de la queue de cheval (L1-S5) flottant dans le liquide céphalo-rachidien. Les racines nerveuses émergent par les trous de conjugaison, ce qui est appelé l'émergence radiculaire.

Le système nerveux est composé de différentes racines qui émergent de la colonne vertébrale à des niveaux spécifiques (**Figure I.5**).

Dans le segment cervical, la racine nerveuse sort au-dessus de la vertèbre correspondante. Par exemple, la racine C5 sort par le trou de conjugaison C4-C5.

Il y a une exception pour la racine C8, qui sort par C7-D1 car il y a seulement sept vertèbres cervicales pour huit racines.

Dans le segment dorsal et en dessous, la racine sort par le trou de conjugaison en-dessous de la vertèbre correspondante, c'est-à-dire sous le pédicule vertébral correspondant. Par exemple, la racine L5 sort par le trou L5-S1, sous le pédicule de L5 ; tandis que la racine S1 sort par le premier trou sacré.



Ces particularités anatomiques sont importantes à prendre en compte lors de l'étude du système nerveux [14] .

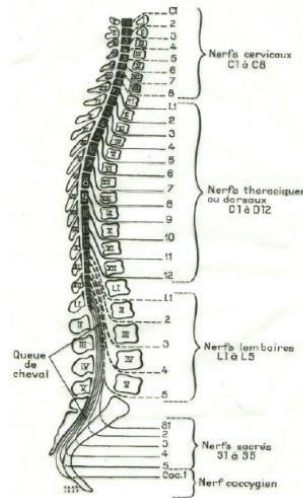


Figure I.5 : Le système nerveux

I.2.4 Le Disque intervertébral

Le disque intervertébral est une articulation entre les deux vertèbres adjacentes et se trouvent entre chaque vertèbre, à l'exception de l'espace C1-C2. L'épaisseur des disques varie en fonction de leur emplacement le long de la colonne vertébrale, étant moins épais au niveau thoracique qu'au niveau cervical. Les disques sont constitués de cartilage qui absorbe les chocs et protège la colonne contre les traumatismes.

Chaque disque possède une structure vasculaire en l'anneau fibreux entourant un noyau pulpeux interne [15].

I.2.4.1 La structure

Le disque intervertébral est composé de trois principales structures qui jouent un rôle différent dans l'absorption des chocs :

- **L'anneau fibreux** est composé de plusieurs lames de fibrocartilage faites de collagène, qui sont reliées de manière lâche pour permettre leur mouvement relatif. Cette structure ferme et élastique maintient le noyau pulpeux dans les limites discales et empêche son expulsion
- **Le noyau pulpeux occupe** environ 50% du volume discal. Il est une structure molle de forme sphérique caractérisée par sa forte hydratation et qui contient deux



composants principaux : les fibres de collagène de type II (se prolongent dans les plaques cartilagineuses) et les protéoglycanes (**Rannou F. M.-B., 2004**) [12].

- **Les plateaux vertébraux** (également appelés plaques cartilagineuses vertébrales) sont des structures osseuses formées de cartilage hyalin, séparant le noyau pulpeux et l'anneau fibroses du corps vertébral. Leur épaisseur est minimale au centre et croît vers la périphérie, contribuant ainsi à la stabilité et à la fonction du disque intervertébral [16].

Le noyau pulpeux a pour rôle de protéger le disque et les vertèbres supérieure et inférieure en répartissant uniformément la pression tout en évitant toute contrainte qui pourrait les endommager. Il agit donc comme un amortisseur de chocs (**Figure I.6**) [15].

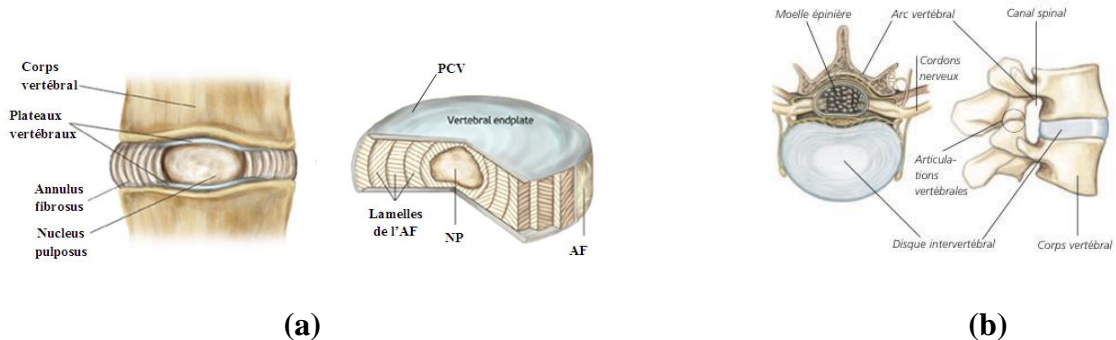


Figure I.6 : structure de la hernie discale : (a) Anatomie du disque intervertébral en vue latéral. (b) Anatomie du disque intervertébral en vue axiale [17].

I.2.4.2 La composition

Le disque intervertébral (DIV) est un milieu poreux composé d'une matrice extracellulaire (MEC), d'eau et de cellules.

- **La MEC** : est un réseau composé de par plusieurs types de protéines fibreuses glycolisées (fibronectine, laminine) ou non glycolisées (élastine) enrobées dans un gel de protéoglycane. Les collagènes sont la famille protéinique dominante dans la MEC, et leur distribution varie d'une zone à l'autre à l'intérieur du disque, influençant ainsi ses caractéristiques mécaniques.

- **L'eau** : occupe une grande partie du volume du DIV, avec une teneur qui varie selon les zones. Le noyau est la zone la plus hydratée, tandis que les plateaux sont les moins hydratés. L'eau joue un rôle crucial dans le comportement du DIV en répartissant les chargements



appliqués et en assurant le transport des nutriments et des ions nécessaires aux cellules (Rannou F. M.-B., 2004) [18] .

- **Les protéoglycanes** : sont des macromolécules composées d'une protéine centrale auxquelles sont attachés des agrégats de glycosaminoglycanes. Elles jouent un rôle crucial dans la conservation des caractéristiques mécaniques du disque intervertébral. Ces agrégats, produits par l'agrécane, assurent l'anti-angiogenèse en interdisant la croissance de nouveaux vaisseaux sanguins dans le tissu discal grâce à leur électronégativité qui maintient une pression osmotique empêchant la déshydratation du disque et préservant sa hauteur. La perte de protéoglycanes est un signe précoce de la dégénérescence discale, et leur distribution dans le disque influence fortement ses caractéristiques mécaniques. Une forte concentration de protéoglycanes dans le noyau pulpeux indiquant une forte pression osmotique. Cependant, la concentration des protéoglycanes décroît du noyau vers l'annulus externe (**Figure I.7**) [19] [18].

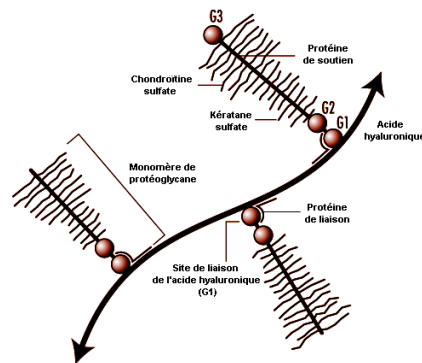


Figure I.7 :Schéma de protéoglycanes [20].

- **Le collagène** : est un composant essentiel du disque intervertébral (DIV), formant un réseau fibreux résistant qui assure l'ancrage du DIV sur le corps vertébral. Les principaux types de collagène présents dans le DIV sont les collagènes **I** et **II**, représentant environ 80% du collagène total. Le collagène **I** est principalement présent dans l'annulus, assurant ainsi une grande résistance à cette partie du DIV. Dans le noyau, les types de collagène **II**, **VI**, **IX** et **XI** sont présents, contribuant à la résistance et à la flexibilité de cette structure. Les fibres de l'annulus externe sont directement liées au corps vertébral pour garantir la fixation du DIV à la vertèbre (Rannou F. M.-B., 2004) [18] .

- **Les cellules discales** : qui représentent environ 1% du volume total du disque intervertébral (DIV) et possèdent une densité variable, jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement de ce dernier. En effet, ces cellules sont responsables du renouvellement de la matrice



extracellulaire (MEC) en synthétisant à la fois ses composantes et leurs agents de dégradation. Toute altération du métabolisme cellulaire peut affecter la synthèse et donc le renouvellement de la MEC, ce qui peut entraîner la dégénérescence du disque intervertébral [18].

I.2.4.3 Le Rôle des disques intervertébraux

Le disque intervertébral remplit deux fonctions essentielles :

- **Absorber les chocs et redistribuer les charges appliquées** : Il agit comme un amortisseur lorsque des forces de compression ou des chocs s'exercent sur la colonne vertébrale. Le noyau est comprimé, ce qui répartit les forces sur la surface intérieure de l'anneau fibreux. Les propriétés élastiques permettent d'amortir le choc, à l'instar d'une chambre à air.

- **Assurer la mobilité de la colonne vertébrale** : Il agit comme une articulation flexible permettant aux vertèbres de bouger les unes par rapport aux autres. La présence du noyau pulpeux à l'intérieur du disque intervertébral favorise cette mobilité [15].

Cet amortisseur peut s'abîmer avec le temps en perdant de sa flexibilité en raison de déshydratation. Dans ces cas-là, il peut arriver que l'anneau se fissure (surtout à l'arrière) permettant au matériel du noyau pulpeux de s'infiltrer. On parle alors d'une hernie discale [14].

I.3 Pathologie de la hernie discale

La hernie discale est caractérisée par le déplacement localisé du contenu discal en dehors de son espace naturel à travers les fibres de l'anneau fibreux. La hernie discale se produit lorsque l'anneau fibreux se déchire et que le noyau pulpeux s'échappe ou lorsque l'anneau fibreux s'épaissit de manière chronique. Dans tous les cas, cela entraîne une compression de la moelle épinière située juste au-dessus. La compression d'un nerf par la hernie est généralement responsable de douleur dans le dos ou le membre inférieur (**Figure I.8**).

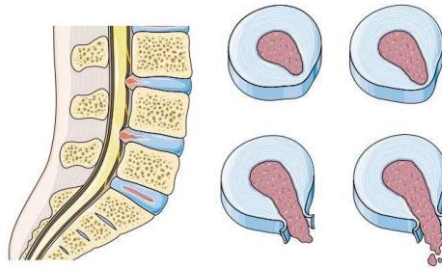


Figure I.8 : les différentes localisations des hernies discales

I.3.1 Processus de formation d'une hernie discale

Avec l'âge, le disque commence à se dégénérer, perdant ainsi ses qualités d'amortisseur. L'annulus se fissure et les cellules qu'il contient ne peuvent plus se réparer. Dans certains cas, la hernie peut être causée par un traumatisme isolé. Les fissures créées dans l'anneau fibreux peuvent permettre à des fragments de disque de sortir vers l'extérieur, généralement vers le canal rachidien, le bas du thorax, et les racines nerveuses adjacentes (**Figure I.9**).

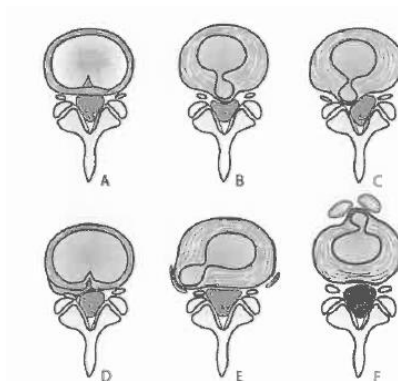


Figure I.9 : les processus de formation d' hernie discale [21]

Cela crée un conflit entre les fragments de disque et le nerf, avec la moelle épinière en haut et la racine en bas. Les racines nerveuses les plus souvent touchées sont (**Figure I.10**) :

- La racine nerveuse L5, qui provoque une sciatique jusqu'au dos du gros orteil
- La racine nerveuse S1, qui provoque une sciatique jusqu'au petit orteil
- La racine nerveuse C6, qui provoque une névralgie cervicobrachiale

Les hernies qui compriment la racine nerveuse L4 sont moins fréquentes, mais peuvent provoquer une cruralgie, une douleur à la face antérieure de la cuisse [15].

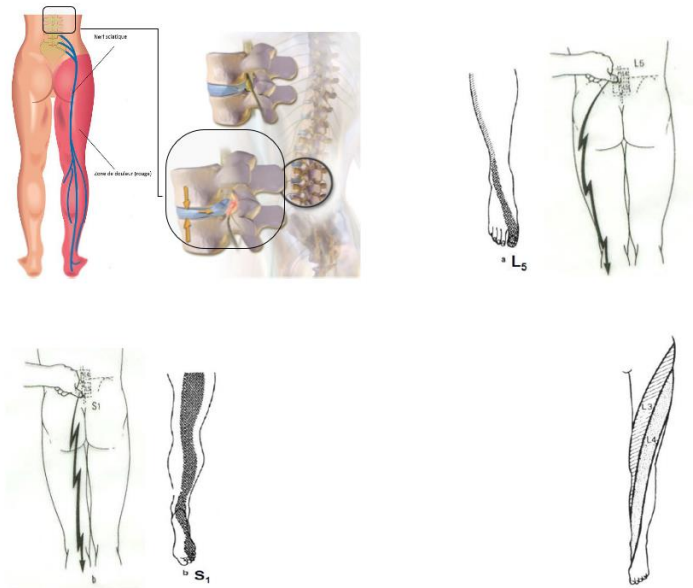


Figure I.10 : Schéma d'une vue latérale gauche du rachis : le disque endommagé se déchire vers l'arrière et la hernie vient comprimer un nerf [14, 15].

I.3.2 Types de hernies discales et leurs caractéristiques

Il existe Deux types de hernies discales, décrites par Hansen en 1952 (**Figure I.11**) :

- **Hansen I** : il s'agit d'une extrusion du noyau pulpeux suite à une rupture totale de l'anneau fibreux. Cette condition s'accompagne souvent d'une rupture du ligament longitudinal dorsal et entraîne une protrusion de l'anneau fibreux, qui comprime la moelle épinière [22,23].
- **Hansen II** il s'agit d'une dégénérescence du noyau pulpeux et d'une rupture partielle de l'anneau fibreux. Suite à cette rupture le noyau pulpeux s'insinue dans une brèche de l'anneau, créant un bombement responsable de la protrusion et du rétrécissement du canal rachidien. Cela est souvent dû à un problème héréditaire provoquant une dégénération prématurée du disque [22,23] .

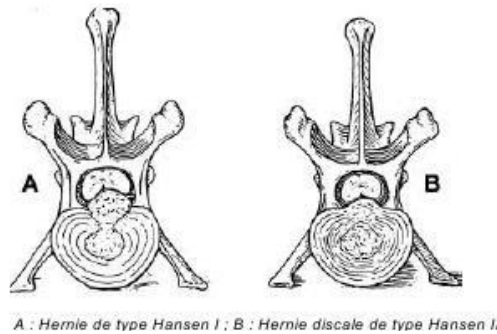


Figure I.11 : les types de la hernie discale : (a) : Hernie de type Hansen 1. (b) : : Hernie de type Hansen 2.

I.4 Symptômes et Manifestations cliniques et méthodes de diagnostic

I.4.1 Signes cliniques

Quel que soit l'emplacement de la lésion, on observera des signes cliniques communs (douleur, troubles moteurs et sensitifs, ainsi qu'une altération de l'état général). Ces symptômes se manifesteront à différents degrés en fonction de la gravité de la lésion.

I.4.2 Symptômes locaux

- **Douleur** : Lorsqu'un nerf est comprimé, une douleur apparaît dans la jambe du côté de la hernie. Selon le niveau du disque atteint, le nerf comprimé peut être le nerf sciatique (provoquant douleur à l'arrière ou sur le côté de la jambe ou de la cuisse) ou le nerf crural (douleur à l'avant de la cuisse et du tibia). La hernie discale cause généralement une douleur dans la jambe plutôt que dans le bas du dos (lombalgie).
- En plus de la douleur, celle-ci apparaît souvent au début de la maladie discale. Elle peut être fugace, intermittente, constante ou ne se manifester qu'en cas de manipulation.
- **Des contractures musculaires** : une sensation de chaleur et une hypersensibilité peuvent être observées près de la lésion. Cette douleur peut alors se propager aux zones voisines, entraînant des névrites, des raideurs des membres et parfois même des difficultés urinaires et intestinales.



I.4.3 Symptômes fonctionnels

Ils dépendent de l'emplacement anatomique, de la durée et de l'intensité des forces de compression. Ils peuvent aller d'une légère ataxie ou d'une parapésie postérieure à une paraplégie, accompagnée ou non d'une perte totale de la sensation de douleur.

- **Des troubles de la sensibilité** : peuvent survenir (perte de sensations, picotements ou engourdissements), et peuvent être graves s'ils affectent les organes sexuels.
- **Troubles moteurs** : Les hernies discales peuvent entraîner des irritations, des compressions voire des sections de la moelle épinière et des nerfs rachidiens. Ces problèmes se manifestent par des troubles moteurs allant de la simple boiterie à la tétraplégie ou aux troubles des organes sexuels (incontinence urinaire, anale, impuissance). Les difficultés locomotrices sont la principale raison de consultation des propriétaires en cas de maladie discale [24,25].

I.4.4 Facteurs de risque

Le risque à vie de hernie discale lombaire est d'environ 30 % tandis que le risque de hernie discale symptomatique est de 1 à 3 % dont 60 à 90 % se résolvent spontanément [26].

La hernie discale lombaire peut être causée par plusieurs facteurs, notamment :

- Efforts de soulèvements inappropriés sollicitant les muscles du dos au lieu des jambes
- Surpoids qui augmente la pression sur les disques lombaires
- Activités répétées contraignant le rachis
- Conduite de véhicules motorisés qui expose à de longues périodes assis et aux vibrations des moteurs,
- Sédentarité qui favorise le développement de la maladie
- Tabagisme qui diminue l'apport d'oxygène dans le disque et accélère sa dégénérescence.

Il est donc important de prendre en compte ces différents facteurs pour prévenir la hernie discale lombaire et maintenir une bonne santé de la colonne vertébrale [15].



I.4.5 Le diagnostic des hernies discales

I.4.5.1 Diagnostic clinique de la LHD

L'interrogatoire du patient est une étape cruciale de l'examen pour déterminer la cause d'une hernie discale, avant de recourir à des examens d'imagerie tels qu'un scanner ou une IRM de la colonne vertébrale. Ces examens nécessitent une anesthésie générale et aident à localiser précisément le problème. La radiographie seule ne suffit pas pour poser un diagnostic de hernie discale, mais peut montrer des signes tels que des espaces intervertébraux rétrécis ou du matériel calcifié. Elle est également utile pour exclure d'autres causes de myélopathie, comme une fracture ou une tumeur osseuse. En effet, le disque intervertébral n'est pas visible sur une simple radiographie, des examens plus avancés comme la myélographie, le scanner ou l'IRM sont nécessaires pour visualiser la hernie discale et en déterminer l'étendue avec précision [26].

I.4.5.2 Techniques d'imagerie médicale dans le diagnostic des hernies discales

Le diagnostic de la hernie discale repose principalement sur l'examen clinique, qui permet de localiser la douleur et d'évaluer la présence d'une irradiation radiculaire. L'historique de la douleur est crucial, avec des questions sur l'intensité, le début et la localisation de la douleur. Des tests de diagnostic essentiels incluent l'évaluation de la force musculaire, des troubles sensoriels et moteurs, ainsi que des tests spécifiques tels que l'élévation de la jambe droite en décubitus dorsal et le test de Lasègue. Les blocs facettaires lombaires aident à diagnostiquer le syndrome articulaire facettaire, tandis que la discographie lombaire n'est pas recommandée pour le diagnostic de la douleur discogénique. Une écoute attentive du patient et un haut niveau de suspicion sont nécessaires pour prescrire le bon examen et assurer un traitement adéquat.

I.4.5.2.1 les avantages et les limites de la radiographie

Avantages

Les patients présentant des symptômes de troubles lombaires tels qu'une hernie discale sans déficit neurologique devrait subir un bilan radiologique en cas de douleur persistante après 6 à 12 semaines, Un examen radiographique est recommandé plus tôt en cas de déficit moteur. Le scanner (CT-scan) est utile pour compléter le bilan, surtout en vue d'une intervention chirurgicale, et il peut être indiqué en cas de contre-indication à l'IRM. La



Chapitre I : Le Disque Intervertébral : Structure, Composition et Fonction

radiographie par rayons X est la première étape pour explorer le rachis et le disque intervertébral, offrant une vision globale du segment de la colonne vertébrale et confirmant le diagnostic. Les images radiographiques simples peuvent aider au diagnostic différentiel de la hernie discale lombaire. Bien que l'imagerie soit irradiante, les progrès technologiques ont permis de réduire la dose tout en maintenant une grande qualité d'image. Les radiographies lombaires avec tests dynamiques détectent des signes indirects de problèmes au niveau des disques intervertébraux, comme les tassements ou les instabilités comme la listhèse. Ces examens permettent ainsi d'identifier des pathologies qui peuvent être à l'origine de douleurs lombaires. De plus, les radiographies de la colonne entière, réalisées avec la technique EOS, offrent une vue d'ensemble de la colonne vertébrale et de sa posture sagittale et coronale. Ces images permettent aux professionnels de la santé d'évaluer la santé de la colonne vertébrale dans son ensemble et de diagnostiquer d'éventuels problèmes de posture ou de structure qui pourraient être à l'origine de douleurs ou de dysfonctionnements (**Leone A, 2007**) [23,26] .

Limitations

Les radiographies permettent d'évaluer la mobilité et la stabilité de la colonne vertébrale, ainsi que de détecter d'éventuelles subluxations ou déformations. Cependant, pour une évaluation plus précise du disque intervertébral, l'IRM ou le scanner sont recommandés. Ces examens permettent de visualiser les tissus mous, tels que les disques, les ligaments et les muscles, et de détecter des pathologies telles que les hernies discales, les sténoses ou les tumeurs. En combinaison avec l'examen radiologique standard, ces techniques d'imagerie permettant au praticien de poser un diagnostic précis et de proposer un traitement adapté pour soulager les douleurs et améliorer la qualité de vie du patient.

I.4.5.2 les avantages et les limites de La tomодensitométrie et la myélographie tomодensitométrie

Avantages

La tomодensitométrie et la myélographie tomодensitométrie sont recommandées comme prochaines méthodes de diagnostic appropriées pour les patients ne pouvant pas subir une IRM ou dont les résultats de l'IRM ne sont pas concluants. Une amélioration prometteuse de la tomодensitométrie a été récemment décrite en utilisant la tomодensitométrie multi détecteur (MDCT) avec reconstruction, ce qui offre une alternative précise à l'IRM dans le diagnostic des hernies discales lombaires. Le MDCT présente une sensibilité, une spécificité,



Chapitre I : Le Disque Intervertébral : Structure, Composition et Fonction

une précision et une exactitude élevées pour le diagnostic des protrusions discales, La tomодensitométrie sans contraste peut être une méthode précieuse pour diagnostiquer les hernies discales lombaires en l'absence d'IRM ou de myélographie tomодensitométrique. En particulier, la tomодensitométrie peut faciliter le diagnostic des hernies discales latérales lointaines, La tomодensitométrie est un outil précieux pour le diagnostic des hernies discales latérales lointaines, en distinguant les fragments isolés du côté extrême qui semblent iso-intenses de ceux du côté controlatéral entourés de graisse. De plus, la sténose latérale extrême causée par une fracture vertébrale du limbe, une arthropathie de la facette dorsale ou une déformation peut être visualisée avec des examens tomодensitométriques en 2D ou 3D. Lorsqu'une IRM est contre-indiquée ou peu concluante, un myélo-CT peut être réalisé chez un patient présentant des symptômes évocateurs d'une hernie discale latérale [27].

Les limitations

La tomодensitométrie (TDM) est privilégiée pour l'imagerie de l'os spongieux et cortical, mais elle présente des limites dans l'exploration de l'unité disco-vertébrale, offrant une sémiologie plus limitée que l'IRM [27].

I.4.5.2.3 Myélographie

L'examen de myélographie est une technique invasive qui consiste en une injection de produit de contraste iodé non neurotoxique dans la dure-mère, suivie d'une ponction lombaire. Son utilisation est limitée dans le diagnostic des discopathies dégénératives, mais elle peut être prescrite en cas de contre-indication à l'IRM pour une imagerie préopératoire. La myélographie peut parfois révéler une sténose canalaire, notamment grâce aux images prises en extension, flexion et position neutre [27].

I.4.5.2.4 L'imagerie par résonance magnétique

a) Le principe

L'IRM est une modalité d'imagerie médicale non invasive qui utilise un puissant champ magnétique pour créer des images détaillées des tissus du corps. Contrairement à la tomодensitométrie, l'IRM n'expose pas le patient à des radiations nocives. En stimulant les noyaux d'hydrogène dans les molécules d'eau du corps et aligner leurs aimantations propres (ou spins) dans la même direction. Par la suite, des impulsions électromagnétiques appelées ondes radiofréquence sont émises puis relâchées afin de perturber l'alignement des spins.



Chapitre I : Le Disque Intervertébral : Structure, Composition et Fonction

L'IRM génère un signal de résonance magnétique qui est capté par l'appareil pour former des images en 3D. Cette technique est largement utilisée pour le diagnostic, la planification chirurgicale et la recherche clinique, notamment dans l'étude de la hernie discale. Grâce à des algorithmes de reconstruction d'images, l'IRM permet d'obtenir des informations précises sur les propriétés des tissus et de détecter des anomalies qui pourraient passer inaperçues avec d'autres méthodes d'imagerie [28].

b) Avantages

L'IRM de la moelle épinière est l'examen privilégié pour investiguer les hernies discales, même lorsqu'elles sont calcifiées, surpassant de loin le CT-scan en termes de performance. En effet, l'IRM permet une visualisation précise de la hernie, calcifiée ou non, ainsi que du cordon médullaire, permettant de déterminer la présence de liquide céphalo-rachidien devant ou derrière le cordon, indiquant ainsi une éventuelle compression médullaire. De plus, cet examen permet de détecter des signes de myélopathie en regard de la zone de compression. En outre, l'IRM peut également permettre de poser d'autres diagnostics plus courants expliquant des douleurs dorsales et des troubles neurologiques tels que des métastases vertébrales compressives, des tumeurs intramédullaires, des myélites, des abcès péri-duraux, des syndromes de queue de cheval, des myélopathies cervicarthrosiques, etc. [29]

c) Autres modalités d'imagerie éventuellement utilisées (IRM pondérée en T2)

Les progrès récents de la technologie IRM ont révolutionné le diagnostic, le traitement et le pronostic des lésions telles que la hernie discale extra foraminale et la discopathie dégénérative symptomatique. L'IRM est devenue la méthode non invasive la plus appropriée pour confirmer la présence de ces pathologies, recommandée en cas de symptômes persistants depuis plus de 6 semaines. Cette technique permet de visualiser en détail les éléments osseux, ligamentaires, les disques intervertébraux, les éléments nerveux et liquidiens. Les séquences pondérées en T1 et T2 sont essentielles pour évaluer le signal et la morphologie du disque, tandis qu'une séquence pondérée en T2 avec suppression du signal de la graisse améliore la sensibilité de détection des altérations possibles de l'os sous-chondral des plateaux vertébraux. L'IRM reste la méthode la plus spécifique et sensible, permettant de mesurer la concentration en glycosaminoglycanes.

L'utilisation d'injections de chélates de gadolinium par intraveineuse pour explorer les pathologies discales n'est pas toujours indispensable, sauf pour visualiser des abcès ou



préciser une origine infectieuse ou tumorale. Cependant, l'IRM injecté peut offrir un diagnostic de qualité pour les disques opérés en permettant une distinction plus nette entre le tissu cicatriciel et le fragment discal. L'IRM dynamique en charge, nécessitant un équipement spécifique, peut montrer une augmentation du signal pondéré en T2 dans la partie postérieure du disque, ce qui est fortement évocateur d'une hernie discale. L'IRM est la référence en matière d'imagerie pour confirmer une suspicion de LHD, avec une précision diagnostique allant jusqu'à 97 % et une fiabilité inter-observateur élevée. Il est cependant important de noter qu'il existe un risque de résultats trompeurs en IRM, car les renflements et saillies discales sont fréquents chez les personnes asymptomatiques [30,31].

I.4.6 Traitement de la hernie discale

I.4.6.1 Traitement médicale

a) Les traitements physiques

- **Repos** : Il est recommandé de se reposer sans rester systématiquement allongé. Une ceinture lombaire ou un corset peut être utile. L'immobilisation par une orthèse 24 heures sur 24 semble bénéfique en phase aiguë, car elle limite les mouvements de la tête et du cou, réduisant ainsi les stimulations physiques de la racine enflammée.
- **Les tractions axiales manuelles ou mécaniques** : Les tractions axiales, qu'elles soient réalisées manuellement ou mécaniquement, sollicitent les muscles du dos et des épaules. Elles consistent à exercer une force de traction dans une direction axiale pour soulager la pression sur les disques intervertébraux (**Figure I.12**).



Figure I.12 : Exemple de table de traction lombaire et cervicale [77]



Chapitre I : Le Disque Intervertébral : Structure, Composition et Fonction

- **La kinésithérapie** : Comprend des techniques telles que le massage, les ultrasons, la stimulation électrique et la chaleur, qui peuvent être utilisées en pour apporter un soulagement temporaire.
- **Éviter les manipulations cervicales** : les manipulations cervicales sont déconseillées en cas de radiculopathie (névralgie) ou de hernie discale molle, car elles peuvent aggraver la condition
- **Thérapies actives** : après la phase aiguë, les exercices isométriques pour renforcer les muscles du cou, du dos et des épaules sont recommandés. Les infiltrations peuvent également soulager la douleur et faciliter la guérison.

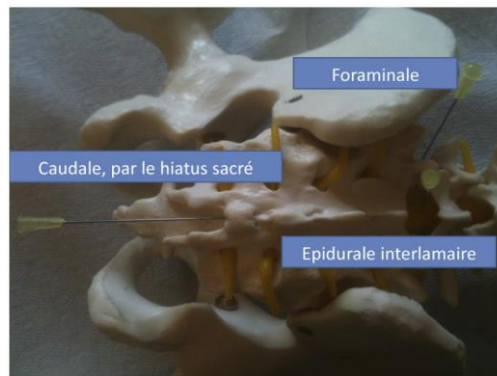


Figure I.13 :Les trois voies d'infiltration lombaire [32]

- **Traitements pharmacologiques** : Les médicaments couramment utilisés incluent les analgésiques, les anti-inflammatoires non stéroïdiens (AINS), les corticoïdes, les relaxants musculaires et certains antiépileptiques. [15]

I.4.6.2 Le traitement chirurgical

Le traitement chirurgical est proposé aux patients chez qui le traitement médical prolongé a échoué, ou en cas de situations à risque de lésions neurologiques irréversibles. La chirurgie permet une récupération partielle ou totale des déficits neurologiques moteurs ou sensitifs, selon la durée d'évolution des déficits et l'atteinte intrinsèque de la racine nerveuse [15].



Les objectifs et les indications de la chirurgie

➤ Objectifs de la chirurgie

- **Suppression ou réduction de la douleur** : La chirurgie vise principalement à supprimer ou réduire considérablement la douleur sciatique ou crurale qui descend dans la jambe. Son efficacité sur les maux de dos est généralement moins prononcée, surtout s'ils étaient présents avant l'apparition de la hernie discale.
- **Récupération de la paralysie** : Elle est la méthode la plus efficace pour espérer récupérer d'une paralysie sévère causée par la hernie discale.

➤ Indications de la chirurgie

Les indications chirurgicales reposent sur une compréhension précise de la cause de la douleur grâce à des examens d'imagerie comme le scanner ou l'IRM. Les situations où la chirurgie est généralement proposée sont les suivantes :

- **Urgence médicale** :
 - ✓ **Syndrome de la queue de cheval** : Il s'agit d'une paralysie des muscles contrôlant la continence urinaire et anale, accompagnée de troubles de la sensibilité au niveau des organes génitaux. Une consultation immédiate est impérative dans ce cas.
 - ✓ **Sciaticques paralysants sévères** : Touchant les muscles importants du pied, du genou ou de la hanche. Une paralysie isolée des orteils n'est pas considérée comme une urgence chirurgicale.
 - ✓ **Sciaticque hyperalgique** : Il s'agit d'une douleur insupportable résistante à tous les médicaments, y compris à la morphine. Une incapacité à supporter cette douleur conduit souvent à la chirurgie.
- **Après 6 à 8 semaines** :
 - ✓ En cas d'échec du traitement médical, une intervention chirurgicale peut être envisagée. Cette décision dépendra de l'intensité de la douleur et de la discussion avec le chirurgien sur le rapport bénéfice/risque.



I.5 Conclusion

Ce chapitre souligne l'importance de comprendre la structure de la colonne vertébrale et les pathologies qui l'affectent, notamment la hernie discale. Une analyse détaillée de l'anatomie et de la physiologie est proposée, ainsi qu'une exploration des mécanismes physiopathologiques. Les symptômes, les facteurs de risque, les méthodes de diagnostic et de traitement sont examinées pour améliorer le processus de guérison et la qualité de vie des patients concernés.

Chapitre II

**Etat de l'art et principes de
l'apprentissage profond dans le traitement
des images médicales**



II.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est une discipline scientifique qui vise à résoudre des problèmes complexes en utilisant des méthodes logiques ou algorithmiques. L'apprentissage automatique (machine learning) fait partie de l'IA, et l'apprentissage profond (deep learning) en est une sous-catégorie qui utilise des architectures composées de transformations non linéaires pour modéliser des données de manière abstraite.

Les progrès récents de l'apprentissage profond, en particulier dans le domaine médical, ont démontré leur potentiel pour améliorer la précision et l'efficacité des diagnostics et des traitements. Dans le domaine de l'imagerie médicale, l'utilisation de différentes architectures profondes a facilité l'identification de pathologies complexes, telles que la hernie discale lombaire. Cette condition survient lorsque les disques intervertébraux font saillie sous une pression excessive. Bien qu'une hernie puisse être asymptomatique, elle provoque généralement des douleurs dorsales (lombalgie) ou des douleurs irradiant dans les membres (sciatique, cruralgie, névralgie cervico-brachiale) lorsqu'elle comprime une racine nerveuse sortant de la colonne vertébrale.

L'introduction de la technologie d'apprentissage profond dans le domaine de la segmentation des images médicales joue un rôle crucial dans le traitement de ces images. Cette avancée révolutionnaire ouvre de nouvelles perspectives pour une prise de décision médicale plus précise et éclairée. L'objectif principal de ce projet est la segmentation des images pour aider à détecter les hernies discales à partir d'IRM en utilisant l'apprentissage profond dans le plan axial.

Dans ce chapitre, nous commencerons par exposer un état la théorie de l'intelligence artificielle. Ensuite, nous présentons quelques travaux déjà réalisés dans la littérature concernant notre sujet

II.2 Intelligence artificielle

Bien que l'intelligence artificielle (IA) soit actuellement un domaine en plein essor et semble être récent, les premiers rêves d'une machine pensante remontent à plus de 150 ans. L'IA est une science qui se concentre sur la création de machines et de programmes intelligents capables de simuler l'intelligence humaine en développant des techniques, des théories et des méthodes qui limitent la pensée humaine. Elle englobe un ensemble de concepts et de techniques plutôt qu'une discipline autonome. L'IA est classée dans le domaine



des sciences cognitives et fait appel à des neurosciences computationnelles, ainsi qu'à la logique mathématique et à l'informatique. Elle repose sur l'intervention et la programmation humaine et utilise des méthodes pour résoudre des problèmes complexes sur le plan logique et algorithmique [33].

Aujourd'hui, l'IA est un terme générique qui englobe plusieurs sciences. Parmi elles, on trouve l'apprentissage automatique (machine Learning), qui comprend à son tour l'apprentissage de représentation et l'apprentissage profond (Deep Learning). Si l'on entend parler de l'IA presque tous les jours dans les médias, c'est principalement en raison des récents progrès réalisés dans le domaine de l'apprentissage profond, en particulier dans les réseaux de neurones convolutifs. Cette section présente donc, dans un premier temps, les concepts d'apprentissage automatique nécessaires pour introduire l'apprentissage profond, qui ont été largement utilisés au cours de la dernière décennie pour effectuer toutes sortes de tâches de segmentation (**Figure II.1**) [34,35]

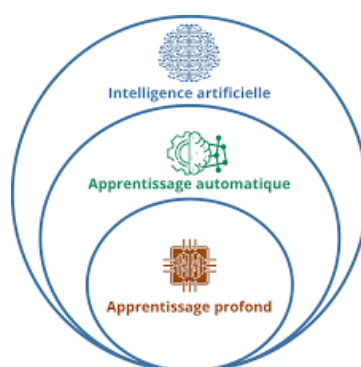


Figure II.1 : les différents types d'intelligence artificielle [36]

II.2.1 Historique

L'intelligence artificielle a une histoire qui remonte à plus de 80 ans en tant qu'entreprise scientifique. Certaines dates et événements importants ont marqué cette histoire. En 1943, **Warren McCulloch et Walter Pitts** ont proposé un modèle de neurone artificiel, démontrant ainsi que des ensembles de neurones peuvent effectuer des opérations logiques. En 1948, **Norbert Wiener** a inventé le terme "cybernétique" pour désigner l'étude du contrôle et de la communication chez les humains, les animaux et les machines. En 1949, **Donald Hebb** a décrit une théorie de l'apprentissage des neurones biologiques qui a influencé les neurones artificiels. En 1956, lors de l'atelier de Dartmouth, le mathématicien **John McCarthy** et d'autres scientifiques ont étudié l'intelligence artificielle (IA) et ont proposé que chaque aspect de l'apprentissage et de l'intelligence puisse être décrit avec précision,



permettant ainsi la conception de machines capables de les simuler. Bien que l'atelier n'ait pas abouti à des avancées majeures, un programme de raisonnement capable de prouver des théorèmes a été présenté, marquant le début de l'IA symbolique. Dans les années 1980, après une première vague d'intérêt pour l'IA dans les années 1950 et 1960, l'IA a connu un premier "hiver" avec une baisse de financement et d'intérêt. Cependant, une nouvelle vague d'applications concrètes a émergé avec les systèmes experts, qui étaient des approches symboliques de l'IA avec des connaissances spécifiques au domaine. Dans les années 1980, les systèmes experts ont émergé en tant qu'approches symboliques de l'IA avec des connaissances spécifiques au domaine, ce qui a conduit à un essor industriel. Cependant, ces systèmes ont montré leurs limites dans les tâches de perception, ce qui a entraîné un deuxième hiver de l'IA. Cependant, les réseaux de neurones à plusieurs couches ont commencé à être étudiés et ont montré leur capacité à résoudre des problèmes non linéairement séparables. L'algorithme de rétropropagation a été développé pour former ces réseaux. Au fil des années, les méthodes d'apprentissage automatique ont évolué et se sont diversifiées, avec des liens renforcés entre l'apprentissage automatique et les statistiques. Les arbres de décision ont connu des développements importants dans les années 1980, et la théorie statistique de l'apprentissage a connu des avancées significatives dans les années 1990. Au cours des années 2000 et 2010, le domaine du machine learning a connu un développement constant, avec l'émergence de nouvelles approches et l'amélioration de logiciels tels que scikit-learn. Il est important de souligner que l'intelligence artificielle actuelle doit davantage aux statistiques et à d'autres domaines mathématiques qu'à la modélisation des circuits cérébraux, et même les approches inspirées de la neurobiologie peuvent être considérées comme des mécanismes statistiques complexes. En 2012, les réseaux de neurones ont connu une renaissance grâce à l'avancée significative réalisée dans le défi de reconnaissance ImageNet, qui contenait un grand nombre d'images naturelles appartenant à différentes catégories. La solution proposée par *Alex Krizhevsky*, *Ilya Sutskever* et *Geoffrey Hinton* était un réseau neuronal convolutionnel comportant de nombreuses couches, d'où le terme d'apprentissage profond. Bien que les éléments constitutifs de cette solution aient été présents dès les années 1980 basée sur un réseau neuronal convolutionnel comportant un grand nombre de couches, ce qui a donné naissance au terme "apprentissage profond". Cependant, à cette époque, les ordinateurs n'étaient pas assez puissants et il n'y avait pas suffisamment de données disponibles pour que cette solution fonctionne correctement. Mais avec l'évolution de la technologie, les ordinateurs sont devenus beaucoup plus puissants et l'utilisation d'unités de traitement graphique (GPU) a considérablement accéléré les calculs. De plus, l'expansion



d'Internet a permis de collecter d'énormes quantités de données, telles que des textes et des images. Au fil des années, les approches d'apprentissage profond sont devenues de plus en plus sophistiquées. Parallèlement, des progiciels tels que TensorFlow, PyTorch ou Keras, soutenus par des géants de l'industrie (**Figure II.2**) [37].

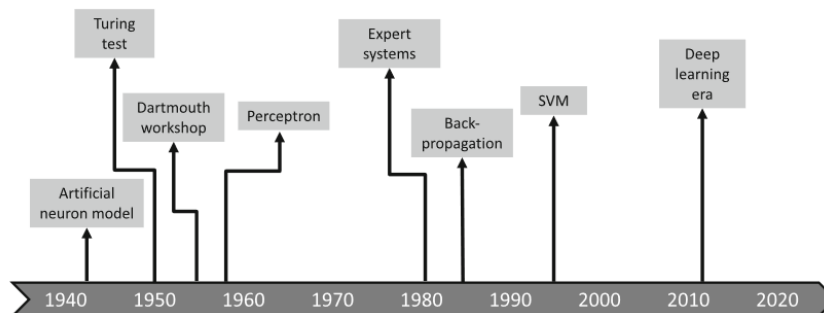


Figure II.2 : Une brève chronologie de l'IA avec certaines des avancées marquantes [37]

II.2.1.1 L'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique, également connu sous le nom de machine learning, est une discipline scientifique qui remonte à l'invention de la première machine de décodage Enigma par le scientifique britannique *Alan Turing* et son équipe. Il s'agit de l'étude des algorithmes informatiques qui peuvent s'améliorer automatiquement. En s'améliorant par l'expérience en utilisant des données. L'apprentissage automatique est une sous-discipline de l'intelligence artificielle [38].

Les algorithmes d'apprentissage automatique fonctionnent en utilisant des échantillons de données appelés données d'apprentissage, afin de faire des prédictions et de prendre des décisions sans qu'il soit nécessaire de les programmer explicitement pour le faire. Une sous-catégorie de l'apprentissage automatique, étroitement liée à la statistique informatique, se concentre sur la réalisation de prédictions à l'aide d'ordinateurs. Cependant, il est important de noter que l'apprentissage automatique ne se résume pas uniquement à l'apprentissage statistique (**Figure II.3**) [39].

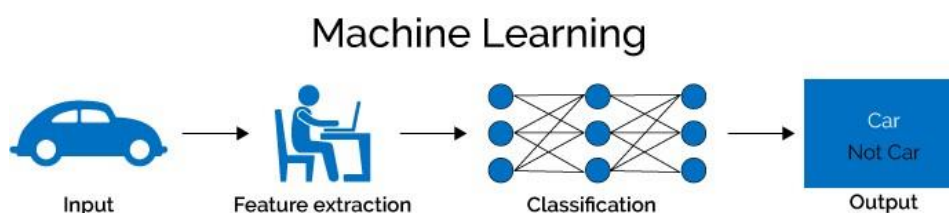


Figure II.3 : Exemple de l'apprentissage automatique [40]



En général, les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent être divisés en trois catégories : supervisé, non supervisé et par renforcement. L'apprentissage supervisé utilise des données étiquetées, c'est-à-dire des données pour lesquelles les résultats sont connus, pour entraîner un modèle qui est ensuite utilisé pour faire des prédictions. Dans l'apprentissage non supervisé, les données ne sont pas étiquetées et les modèles sont construits pour trouver des structures ou des motifs au sein des données, par exemple pour regrouper les données. Enfin, l'apprentissage par renforcement consiste à apprendre à travers une série d'actions et de retours d'information (D. Silver, 2016).

II.2.1.2 L'apprentissage profond

L'apprentissage profond est un domaine de l'intelligence artificielle qui utilise des réseaux de neurones artificiels pour effectuer des opérations simples et obtenir des résultats de plus en plus complexes. Avec l'amélioration de la puissance de calcul des ordinateurs et à l'existence de vastes bases de données, L'apprentissage profond a connu des avancées majeures ces dernières années. L'un des principes fondamentaux de cette approche est l'extraction progressive des caractéristiques à travers les différentes couches du réseau neuronal. Par exemple, lors du traitement d'images, les couches inférieures peuvent détecter les contours, tandis que les couches supérieures sont responsables de la reconnaissance de concepts plus complexes tels que les chiffres, les lettres ou les visages [45-47]. Cette hiérarchie de caractéristiques est appelée architecture profonde. L'apprentissage profond a été appliqué avec succès dans de nombreux domaines tels que la bio-informatique, la conception de médicaments ou l'analyse d'images médicales, et a même surpassé les performances des experts humains (Figure II.4) [48-50] .

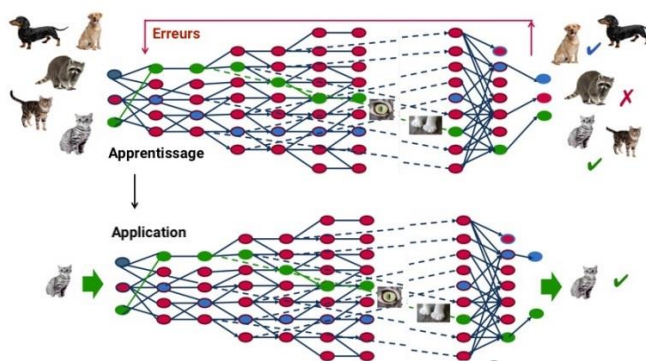


Figure II.4 : Exemple de L'apprentissage profond [82]



II.3.1.2.1 Réseaux de neurones biologiques

Le cerveau humain, qui existe depuis des millions d'années, est la machine de traitement de l'information la plus puissante. Les réseaux de neurones sont des outils puissants pour modéliser les relations complexes entre les données d'entrée et de sortie. Le développement de cette technologie a été motivé par le désir de créer un système artificiel capable d'accomplir des tâches intelligentes de manière similaire au cerveau humain. Un réseau de neurones ressemble au cerveau humain car il apprend des connaissances par apprentissage. Un neurone, ou cellule nerveuse, est l'unité fonctionnelle de base du système nerveux. Dans notre cerveau, il y a 86 milliards de neurones qui sont regroupés en réseau qu'ils forment des connexions pour plus de précision. Les neurones sont responsables de la pensée humaine, de l'esprit, de la conscience, de l'imagination, de l'opinion et de ce que nous appelons l'intelligence. Les neurones artificiels sont inspirés des neurones biologiques, en particulier de leur propriété électrique. En effet, les neurones artificiels sont inspirés par les dendrites (**Figure II.9**) [20].

- **Les dendrites**, qui sont les prolongements du corps cellulaire et qui sont les principaux conducteurs de l'information provenant de l'extérieur.
- **L'axone**, est le prolongement du neurone et qui conduit le signal électrique du corps cellulaire vers d'autres neurones.

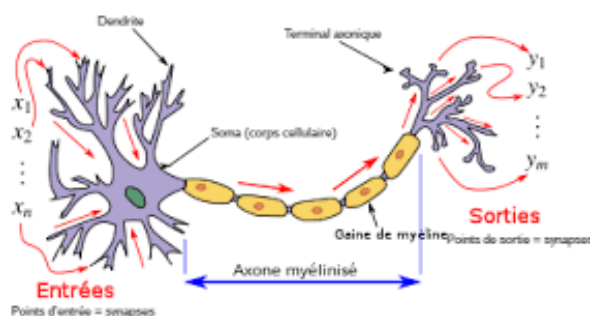


Figure II.5 : Dendrites, soma et axone myélinisé, Réseaux de neurones biologiques[47].

Les neurones reçoivent des signaux électriques par les dendrites et envoient l'information par les axones. Les contacts entre deux neurones se font par l'intermédiaire des synapses. Les signaux ne fonctionnent pas de manière linéaire. Lorsque l'excitation du corps cellulaire dépasse un certain seuil, un influx nerveux est émis le long de l'axone, du corps cellulaire à l'extrémité de l'axone. L'excitation est quantifiée par modulation de fréquence. Plus le neurone est excité, plus les impulsions dans l'axone sont rapprochées [48].



II.3.1.2.2 Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux neuronaux artificiels (ANN) sont des systèmes informatiques optimisés par des méthodes d'apprentissage probabilistes. Ils font partie de la catégorie des applications statistiques, enrichissant de paradigmes de classification, et de la catégorie de l'intelligence artificielle, fournissant un mécanisme perceptif indépendant pour mettre en œuvre des idées et des informations pour le raisonnement logique (Figure II.6).

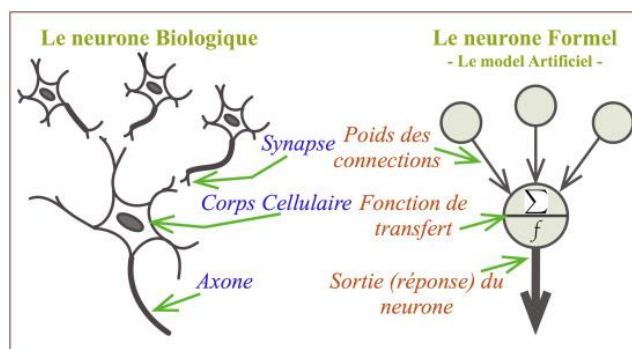


Figure II.6 : Illustration d'un réseaux de neurones artificiel [49]

Les ANN sont composées d'une séquence de neurones avec un poids représentant la force de connexion. Chaque sous-groupe effectue un traitement indépendant et transmet le résultat au suivant. L'information est propagée par le réseau, soit par un seul ou plusieurs sous-groupes intermédiaires. Les ANN peuvent stocker des connaissances empiriques et de les rendre disponibles pour utilisation, avec des connaissances acquises par des processus d'adaptation ou d'apprentissage [22],[50].

II.3.1.2.1.1 Le perceptron monocouche

Les premiers réseaux de neurones sont connus sous le nom de "perceptron". Ils sont constitués d'une seule couche de neurones et sont principalement utilisés pour la classification binaire. Ces réseaux comprennent N entrées (X_i), pour chaque entrée un poids (W_i) est initialisé aléatoirement, suivis d'une seule couche dans le. Puis un seul nœud en sortie du réseau qui prend la somme pondérée des entrées et utilise une fonction d'activation pour déterminer la sortie. Le premier RNA historique est le Perceptron de "**Rosenblatt**". C'est un réseau simple, composé d'une couche d'entrée et d'une couche de sortie. Il est basé sur le système visuel et a été conçu pour la reconnaissance des formes. Cependant, il peut également être, utilisé pour estimer ou approximer une fonction utilisée pour la classification et la résolution d'opérations logiques simples (comme "ET" ou "OU") (Figure II.7).

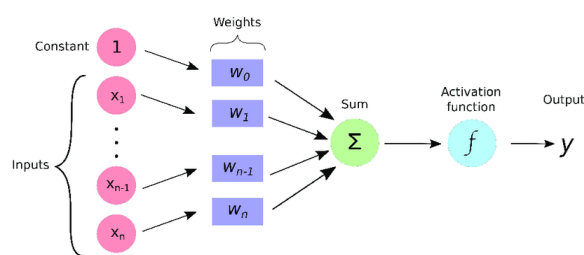


Figure II.7 : Illustration du model de perceptron monocouche [51]

Sa principale limite est qu'il ne peut résoudre que des problèmes linéairement séparables. Il suit généralement un apprentissage supervisé selon la règle de correction de l'erreur. Équation d'un neurone formel [83] [52] :

$$\hat{y} = f((W, x) + b) \quad (1)$$

Où :

- **W** : le poids
- **X** : l'entrée
- **B** : le biais

II.3.1.2.1.2 Le perceptron multicouche (PMC)

Les réseaux MLP sont complexes en raison de leurs multiples couches de neurones mis en cache, permettant des tâches plus complexes et des résultats précis. Ils ont deux applications principales : la classification et la régression. Chaque application nécessite des phases d'apprentissage et de tests, la première impliquant une base de données labellisée et des outils informatiques puissants comme des GPU, et la seconde évaluant le modèle sur d'autres bases de données. Les réseaux MLP modernes sont des outils de modélisation de données basés sur des statistiques non linéaires (**Figure II.8**) [53],[54].

- **La classification** : est utilisée lorsque les variables de sortie sont des catégories, permettant de prédire à quel groupe ou classe appartient un échantillon donné.
- **La régression** : est utilisée lorsque les variables de sortie sont des valeurs réelles spécifiques, permettant de prédire une valeur numérique pour un échantillon donné.

Ces deux approches sont essentielles pour l'analyse et la prédiction de données dans de nombreux domaines tels que la finance, la santé, le marketing, etc.

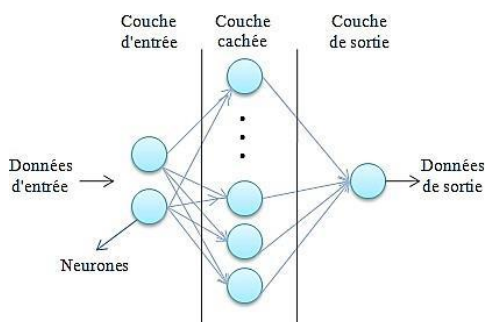


Figure II.8: Illustration du modèle de perceptron multicouche [49]

Généralement, les réseaux neuronaux artificiels ont la capacité de changer leur configuration interne en réponse aux données d'entrée ou à la stimulation, les rendant ainsi adaptatifs. Les réseaux neuronaux actuels sont des outils de modélisation de données qui reposent sur des statistiques non linéaires. Les réseaux neuronaux typiques se composent généralement des trois parties suivantes :

1. L'architecture : la structure définit les variables du réseau et leurs topologies. Par exemple, le poids de la connexion neuronale dans le réseau neuronal et la valeur d'excitation des neurones peuvent être considérés comme des variables du réseau neuronal.

2. Règle d'activité : la plupart des modèles de réseau neuronal utilisent une règle cinétique de courte durée appelée fonction d'activation, qui est utilisée pour convertir l'entrée d'un neurone en certaines valeurs spécifiques permettant la classification de données qui ne peuvent pas être séparées linéairement, comme des types numériques continus convertis en une sortie $[0,1]$. Cette fonction définit comment les neurones ajustent leurs valeurs d'excitation en fonction des autres neurones. La fonction d'activation générale dépend des paramètres du réseau et il existe différents types de fonctions d'activation, telles que la fonction sigmoïde, ReLu (Rectified Linear Unit), softmax et tanh.

3. Les règles d'apprentissage : définissent comment les poids sont modifiés au fil du temps, généralement selon une règle cinétique à long terme. Elles dépendent de l'excitation du neurone et de la valeur cible fournie par le superviseur. Les réseaux de neurones artificiels sont généralement optimisés à l'aide de statistiques mathématiques, notamment la rétropropagation, également connue sous le nom de (back propagation). Cette méthode permet d'optimiser et d'ajuster les poids dans les réseaux en minimisant les erreurs entre les sorties réelles et prédites. Cela se fait en calculant la somme pondérée des entrées des neurones en fonction de la fonction d'activation. Cependant, les réseaux traditionnels sont souvent lourds et leur convergence est lente [54].



II.3.1.2.3 Introduction des réseaux de neurones convolutifs (CNN)

Un réseau de neurones convolutifs (CNN) est un réseau neuronal comportant une ou plusieurs couches utilisées principalement pour le traitement, la classification, la segmentation et d'autres tâches liées aux données automatiques sur l'entrée. Une convolution est une opération essentielle en traitement d'images qui consiste à appliquer un filtre ou noyau sur une image d'entrée afin d'extraire des caractéristiques.

Une façon utile de penser aux convolutions est de citer le *Dr. Prasad Samarakoon* : "*Une convolution peut être considérée comme le fait de regarder une fonction et de prédire son résultat*". Au lieu de rechercher certaines fonctionnalités, il peut être plus efficace de regarder des portions plus petites de l'image [54].

II.3.1.2.4 Réseaux de neurones convolutifs

Les réseaux de neurones convolutifs (Convolutional Neural Network ou CNN) suivent une méthodologie similaire à celle des méthodes traditionnelles d'apprentissage supervisé. Ils sont entraînés à l'aide de mégadonnées et ont la capacité d'extraire automatiquement des caractéristiques des données par le biais de convolutions, sans nécessiter une extraction manuelle des caractéristiques. Les réseaux de neurones convolutionnels sont basés sur le perceptron multicouche. Bien qu'ils soient efficaces pour le traitement d'images, les perceptrons multicouches rencontrent des difficultés pour gérer des images de grande taille en raison de la croissance exponentielle du nombre de connexions avec la taille de l'image. Aujourd'hui, les CNN, également appelés ConvNet [55] [56].

II.3.1.2.5 Une architecture CNN

Les Réseaux de Neurones Convolutionnels sont l'une des architectures de deep learning les plus populaires, utilisées pour la classification et la reconnaissance d'images, de textes et de sons. Ils sont donc plus spécifiques, avec deux blocs principaux (**Figure II.9**).

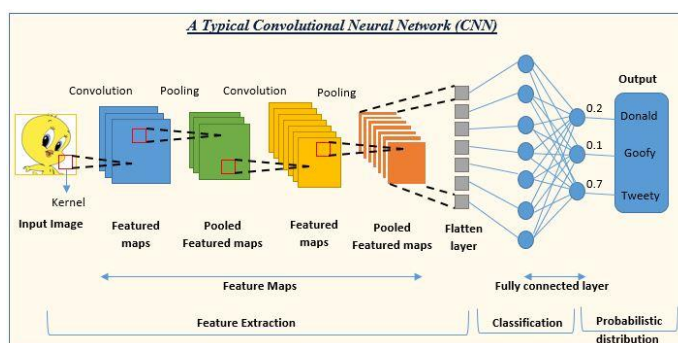


Figure II.9 : Illustration de l'architecture de réseau neuronal convolutionnel [84]

Dans la première partie, appelée partie convolutive, l'image est traitée par une série de filtres de convolution, ce qui permet d'extraire les caractéristiques de l'image. Les filtres créent de nouvelles images appelées cartes de convolutions. Certains filtres réduisent la résolution de l'image en utilisant une opération de maximum local (max pooling). Les cartes de convolutions sont ensuite concaténées en un vecteur de caractéristiques appelé code CNN.

Ce code CNN est ensuite utilisé comme entrée pour la deuxième partie du réseau, qui est constituée de couches entièrement connectées, également appelées perceptron multicouche. Le rôle de cette partie est de combiner les caractéristiques du code CNN pour classer les pixels de l'image. La sortie de cette partie est une dernière couche comportant un neurone par catégorie. Les valeurs numériques obtenues sont généralement normalisées entre 0 et 1 pour produire une distribution de probabilité sur les catégories [57].

Une architecture CNN est composée de plusieurs couches de traitement indépendantes :

II.3.1.2.5.1 La couche de convolution (CONV)

La couche de convolution est un élément essentiel des réseaux de neurones convolutifs et est toujours au moins la première couche. Son but est d'extraire les caractéristiques des images en entrée et de produire une carte de caractéristiques en résultat. Pour cela, un filtrage par convolution est effectué. Le principe consiste à faire glisser une fenêtre de taille ($M \times M$) représentant la caractéristique sur l'image et à calculer le produit de convolution entre la caractéristique et chaque portion de l'image balayée. Une caractéristique est alors considérée comme un filtre : les deux termes sont équivalents dans ce contexte. La couche de convolution reçoit donc plusieurs images en entrée et calcule la convolution de chacune d'entre elles avec chaque filtre. Les filtres correspondent exactement aux caractéristiques que l'on souhaite retrouver dans les images [85]. Pendant l'apprentissage, les poids de ces filtres sont mis à jour afin de permettre au réseau de reconnaître les images avec précision [32]. Pour



chaque paire (image, filtre), on obtient une carte d'activation ou une carte de caractéristiques qui est l'un des paramètres les plus importants du modèle CNN. Elle nous fournit des informations sur les données. Plus tard, cette carte est introduite dans d'autres couches pour apprendre d'autres caractéristiques des données d'entrée. Il existe plusieurs fonctions d'activation utilisées, telles que les fonctions ReLU, Softmax, Linear, TanH et Sigmoidé (Figure II.10).

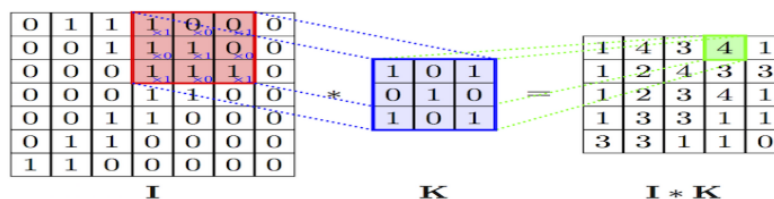


Figure II.10 : Exemple de principe du filtre convolutionnel [40]

Il existe trois paramètres qui permettent de dimensionner le volume et de définir l'agencement spatial de sortie d'une couche de convolution : la profondeur, le pas et la marge.

- **La profondeur de la couche** : contrôle le nombre de noyaux de convolution (ou le nombre de neurones associés à un même champ récepteur). Le nombre de filtres détermine donc la diversité des motifs que la couche de convolution peut détecter. Par exemple, si une couche de convolution utilise 64 filtres, elle sera capable de détecter 64 motifs différents dans l'image d'entrée [19].
- **Le pas** : contrôle le chevauchement des champs récepteurs. Il influence la taille de la sortie de la couche de convolution et joue un rôle essentiel dans la réduction de dimension, la préservation des détails et la complexité du modèle. Un pas plus petit permet généralement de conserver plus de détails, mais cela peut également augmenter la complexité du modèle. En revanche, un pas plus grand réduit la taille de l'image en sortie mais peut potentiellement perdre des informations [20].
- **La marge** : également appelée "zero padding" en anglais, correspond à l'ajout de zéros autour de l'image en entrée avant d'appliquer la convolution. Cette technique permet de conserver la même taille d'image en sortie, en évitant une réduction de la taille due à l'application du filtre. La taille de la marge est un hyperparamètre qui peut être ajusté pour contrôler la dimension spatiale du volume de sortie, la marge peut être calculée comme [19] :

$$P = \frac{K - 1}{2} \quad (2)$$



Où :

- **P** est la marge (padding).
- **K** est la taille de filtre

II.3.1.2.5.2 La couche de pooling (POOL)

La couche de mise en commun (POOL) : Un autre élément clé des CNN est la mise en commun, qui consiste à sous-échantillonner l'image. C'est pourquoi une couche de mise en commun est souvent insérée. De plus, la mise en commun crée une certaine invariance par translation, ce qui signifie que les motifs détectés par les couches précédentes restent détectés même s'ils se déplacent légèrement dans l'image. Ce type de couche est souvent placé entre deux couches de convolution, elle reçoit en entrée plusieurs cartes de caractéristiques et applique l'opération de mise en commun à chacune d'entre elles. L'opération de mise en commun consiste à réduire la taille des images tout en préservant leurs caractéristiques importantes. Pour cela, l'image est découpée en cellules régulières et la valeur maximale de chaque cellule est conservée. En pratique, on utilise souvent de petites cellules carrées pour ne pas perdre trop d'informations. Les choix les plus courants sont des cellules carrées adjacentes de 2×2 pixels qui ne se chevauchent pas, ou des cellules de 3×3 pixels, espacées de 2 pixels les unes des autres (donc se chevauchant). Le nombre de cartes de caractéristiques en sortie est le même qu'en entrée, mais elles sont beaucoup plus petites. La couche de mise en commun permet de réduire le nombre de paramètres et de calculs dans le réseau. Cela améliore l'efficacité du réseau et évite le sur-apprentissage (le réseau apprend par cœur les données d'entraînement et ne parvient pas à effectuer des prédictions correctes avec de nouvelles données). Ainsi, la couche de mise en commun rend le réseau moins sensible à la position des caractéristiques, le fait qu'une caractéristique soit un peu plus haute ou plus basse, ou même qu'elle ait une orientation légèrement différente, ne devrait pas entraîner un changement radical dans la classification de l'image

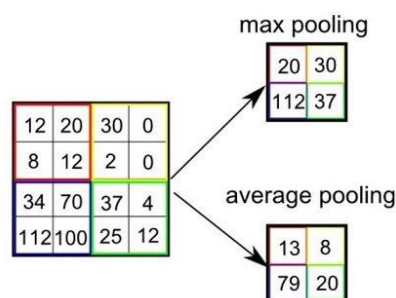


Figure II.11: Une Comparaison entre pooling maximum et du pooling moyen [86]



Il existe plusieurs types d'opérations de mise en commun. Dans le cas du Max pooling (**Figure II.11**). L'élément le plus grand est extrait de la carte de caractéristiques. Le pooling moyen calcule la moyenne des éléments dans une section d'image de taille prédéfinie. La somme totale des éléments dans la section prédéfinie est calculée dans le Sum Pooling. La couche de mise en commun sert généralement de pont entre la couche de convolution et la couche FC. En pratique, même si l'average pooling était souvent utilisé initialement, il s'est avéré que le max-pooling était plus efficace car il augmente de manière plus significative l'importance des activations fortes. Dans d'autres circonstances, on peut utiliser une mise en commun stochastique. La mise en commun permet de réaliser des gains importants en termes de puissance de calcul. Cependant, en raison de la réduction agressive de la taille de la représentation (et donc de la perte d'information associée), la tendance actuelle est d'utiliser de petits filtres (type 2x2) [59].

II.3.1.2.5.2 Fonction d'activation

La compréhension du cerveau humain ne se fait pas de manière linéaire, mais plutôt par une cartographie complexe et non linéaire. L'utilisateur transforme les entrées et les sorties entre les neurones, ce qui constitue l'une des trois parties fondamentales du réseau de neurones. Par conséquent, les réseaux de neurones utilisent souvent des fonctions d'activation non linéaires pour simuler le comportement cognitif non linéaire du cerveau humain. Les fonctions d'activation non linéaires les plus couramment utilisées comprennent les fonctions sigmoïdes, les fonctions tanh et les fonctions de rectification linéaire [54].

➤ La couche de correction (ReLU)

L'opération de convolution est une opération linéaire. Pour améliorer l'efficacité du traitement et éviter la saturation des fonctions d'activation, une fonction d'activation non linéaire est appliquée sur la carte de caractéristiques après chaque opération de convolution. Les couches de correction, également connues sous le nom de couches RELU (Rectified Linear Unit), sont couramment utilisées dans les architectures de CNN. La fonction de correction

ReLU (Rectified Linear Unit) : $f(x) = \max(0, x)$ est une fonction mathématique appelée également "fonction d'activation non saturante", qui augmente les propriétés non linéaires de la fonction de décision et de l'ensemble du réseau sans affecter les récepteurs de la couche de convolution. Cette fonction force les neurones à renvoyer des valeurs positives, remplaçant ainsi toutes les valeurs négatives reçues en entrée par des zéros (**Figure II.12**) [50]

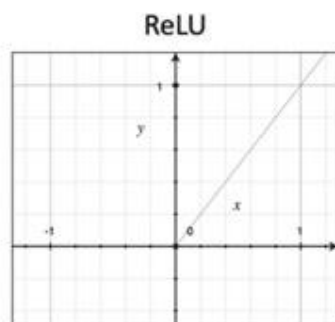


Figure II.12 : la fonction ReLU [60]

➤ La fonction sigmoïde

La fonction sigmoïde permet de prédire la sortie, en traçant l'entrée à des valeurs entre zéro et un. Cela nous permet d'atteindre l'importance de chaque caractéristique en attribuant des valeurs aux composants. Là où la valeur de zéro supprime directement la caractéristique, tandis que la valeur de un conserve toutes les informations (Figure II.13) [60] :

$$\text{Sigmoïde : } f(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (3)$$

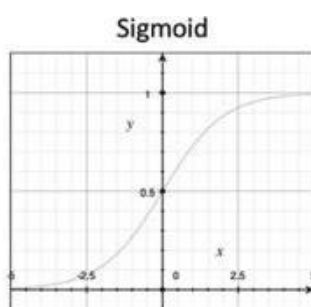


Figure II.13 : la fonction Sigmoïde [60]

II.3.1.2.5 La couche "entièrement connectée" (FC)

La couche entièrement connectée, également appelée couche fully-connected, est toujours la dernière couche d'un réseau de neurones, qu'il soit convolutif ou non. Contrairement à un CNN, elle n'est pas spécifique à ce type de réseau. Les neurones de cette couche sont connectés à toutes les sorties de la couche précédente. Leurs fonctions d'activation sont calculées en effectuant une multiplication matricielle suivie d'un décalage de polarisation (Figure II.14).

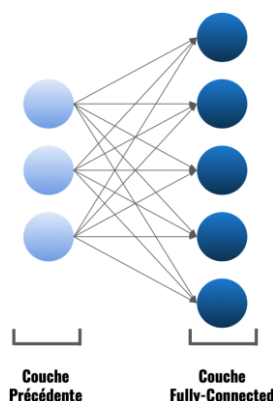


Figure II.14: Illustration du modèle de couche entièrement connecte [87]

Cette couche prend en entrée un vecteur et produit en sortie un nouveau vecteur. Pour cela, elle applique une combinaison linéaire aux valeurs reçues en entrée, éventuellement suivie d'une fonction d'activation. La dernière couche entièrement connectée est utilisée pour classifier les pixels d'une image en entrée du réseau. Elle renvoie un vecteur de taille N , où N représente le nombre de classes dans le problème de segmentation d'images. Ces couches sont utilisées pour la classification ou la régression et produisent des scores de classe ou des valeurs numériques. Dans le cas de la classification, chaque neurone de la couche de sortie représente une classe et fournit un score de probabilité pour cette classe. La classe avec le score le plus élevé est alors choisie comme prédiction finale [59].

II.3.1.2.5.6 La couche de perte (LOSS)

La couche de perte est cruciale pour l'entraînement du réseau neuronal, car elle mesure la différence entre les valeurs prédites et les valeurs réelles. Elle est généralement placée en dernière position dans le réseau. En classification, la variable aléatoire est discrète, prenant les valeurs 0 ou 1 pour indiquer l'appartenance ou non à une classe. Différentes fonctions de perte peuvent être utilisées, telles que l'entropie croisée ou l'erreur quadratique moyenne [50].

II.3.1.2.5.5 L'optimisation

Les réseaux convolutifs se basent sur des éléments de base pour apprendre des modèles à partir des données, dont les algorithmes d'optimisation sont les plus importants. Nous pouvons affirmer que nous avons obtenu un classificateur de grande précision car celui-ci a réussi à obtenir des valeurs idéales pour les poids W et b [59].

Les algorithmes d'optimisation et de régularisation ont pour objectif d'éviter le sur-apprentissage et d'améliorer la généralisation ainsi que l'ajustement des paramètres du modèle afin d'améliorer sa performance non seulement sur les données d'entraînement, mais



également sur les données de test ou de validation. Ces algorithmes cherchent à minimiser la fonction de coût, qui mesure la différence entre les prédictions du modèle et les valeurs réelles sur l'ensemble des données d'entraînement. Parmi ces algorithmes, nous pouvons citer le SGDM (Stochastic gradient descent with momentum) et l'ADAM (Adaptive Moment Estimation) [61],[62].

II.3.1.3 Apprentissage par transfert

Avec l'avènement de l'apprentissage en profondeur, l'apprentissage par transfert a rencontré un franc succès. Il s'agit d'utiliser des modèles pré-entraînés basés sur des algorithmes performants qui ont été développés et entraînés sur de vastes bases de données. Cette approche permet de développer rapidement des modèles puissants et de résoudre efficacement des problèmes complexes tels que l'extraction de caractéristiques ou la classification, même si cela nécessite un temps de calcul élevé. Parmi les modèles les plus couramment utilisés figurent le VGG16 et le VGG19 [63].

II.2 Etat de l'art

Actuellement, de nombreux chercheurs s'intéressent à la segmentation et à la classification de la sténose lombaire à l'aide de l'apprentissage profond à partir d'images IRM. Voici quelques travaux que nous pouvons mentionner :

Kim et al (2022) [64], a proposé une approche pour développer un modèle d'apprentissage profond utilisant un réseau neuronal convolutif (CNN) afin de diagnostiquer la sténose du canal rachidien lombaire sévère à partir de radiographie et d'évaluer les caractéristiques diagnostiques radiologiques à l'aide de la cartographie d'activation de classe pondérée par gradient (Grad-CAM), ils ont utilisé un ensemble de données comprenant 2500 patients de plus de 18 ans, avec des images IRM et des radiographies du groupe de la sténose du rachis lombaire. Cet ensemble de données se compose de 6325 images radiographies du groupe pathologiques et 6117 images radiographies du groupe témoin (sans sténose). Ils ont entraîné son modèle d'apprentissage profond avec un CNN en utilisant un algorithme d'apprentissage par transfert. Pour évaluer les performances de son modèle, ils ont utilisé six métriques : l'aire sous la courbe ROC (AUROC), la précision, la sensibilité, la spécificité, les valeurs prédictives positives et les valeurs prédictives négatives. Ils utilisent l'intelligence artificielle pour le tirage des maladies spinales et l'identification des lésions causales. Ils souhaitent classer les radiographies lombaires dans la catégorie (LSS) central grâce à l'apprentissage profond, et localiser avec précision les lésions sténosées pour aider les



médecins à diagnostiquer la sténose du canal rachidien. Les résultats ont montré une précision supérieure à 80% pour la classification binaire, pour tous les modèles proposés. En particulier, le modèle VGG19 a obtenu les meilleures performances de classification, avec une AUROC de 90%. Le modèle VGG16 a également obtenu de bons résultats, avec une AUROC de 89,6%. Les autres métriques pour ces modèles étaient les suivantes : précision de 82,8%, sensibilité de 81%, spécificité de 84%, valeur prédictive positive de 83,9% et valeur prédictive négative de 81,8%.

A la fin, cette étude présente certaines limites. Tout d'abord, il s'agit d'une étude rétrospective avec des différences d'âge et de sexe entre les patients atteints de (LSS) et les témoins. De plus, les radiographies montrant des corps étrangers, tels que des vis, des cages et du ciment osseux, ont été exclues de notre ensemble de données. Enfin, notre modèle a été limité à la classification en deux classes et n'a pas été testé pour la reconnaissance ou la classification de classes multiples (**Figure II.15**).

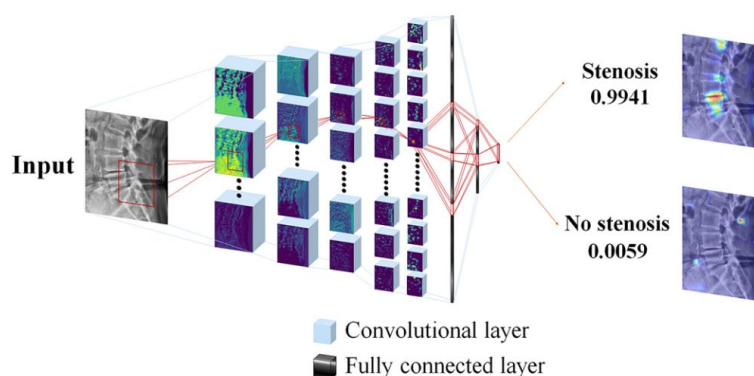


Figure II.15: Illustration schématique de l'architecture CNN utilisée dans le cadre proposé pour détecter une sténose sévère de la colonne vertébrale centrale.

Dans une autre étude qui est faite par **Mbarki et, al (2020)** [65], ont élaboré une méthode qui utilise des réseaux de neurones convolutifs pour identifier le type de hernie discale lombaire chez 69 patients. Ils ont utilisé un ensemble de 1000 images IRM (images axiales) et son méthode base sur l'algorithme CNN avec l'architecture VGG16. Donc les résultats obtenus sont un taux d'intersection sur union de 98,1%, extraire des différents masques des disques de l'IRM en vue axiale et également extraire des différentes apophyses des différentes imageries par résonance magnétique.

L'objectif de **Abhinav Shukla et, al (2023)** [66], Il s'agit de déterminer si un ensemble Deep-UNet utilisé pour segmenter les canaux rachidiens sur un mélange hétérogène de données cliniques, peut être comparé à la segmentation de ces canaux par les radiologues chez



les patients atteints de (LSS). Ils ont étudié un groupe de 279 patients ayant subi des examens IRM de la colonne vertébrale, comprenant 10 images axiales T2. En utilisant le modèle d'ensemble Deep-U-Net, et mesuré automatiquement la zone des canaux ainsi que des métriques telles que les scores de Dice, la distance de Hausdorff et la distance de surface moyenne. Ensuite comparé ces résultats à la variation inter-évaluateurs des résultats de segmentation. Don ils ont constaté que 97% des examens étaient entièrement segmentés, tandis que 3% ont échoué (55% des échecs algorithmiques se sont produits au niveau L5). Les scores Dice étaient de $0,89 \pm 0,04$, la distance de Hausdorff était de $13,1 \text{ mm} \pm 16,3 \text{ mm}$ et la distance de surface moyenne était de $0,18 \text{ mm} \pm 0,16 \text{ mm}$. Ces résultats montrent une segmentation précise et efficace des structures complexes, avec des avantages significatifs par rapport à la délimitation manuelle. Cependant, les résultats étaient limités en raison de la taille réduite de l'ensemble de données, notamment au niveau de la délimitation au niveau L5-S1 où l'inclusion du sac thécal a entraîné une segmentation partielle du canal.

Le contexte de **Rizwan et al (2021)** [67], pour analyser les performances de la détection de la sténose rachidienne lombaire à partir d'images IRM en utilisant la technique de segmentation sémantique sur un échantillon de 515 patients et 575 images IRM (axiales) Un modèle d'apprentissage profond basé sur un réseau neuronal convolutif (CNN) est utilisé, en utilisant les architectures VGG16 et SEGNET Framework. Par conséquence, la partie segmentée de l'image contenant l'anomalie de la colonne vertébrale est ensuite évaluée à l'aide de différentes mesures basées sur les contours et les régions pour évaluer les performances du modèle (**Figure II.6**).

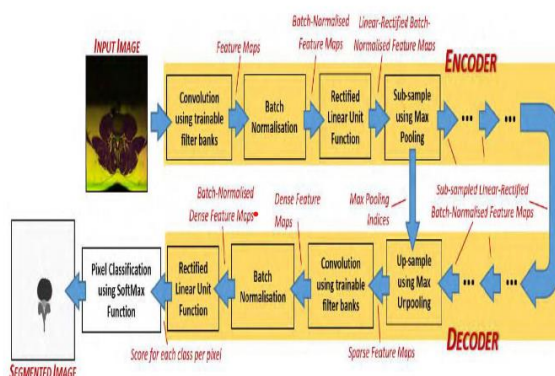


Figure II.16: Illustration schématique de l'architecture CNN utilisée dans le cadre proposé pour détection de la sténose rachidienne lombaire à partir d'images IRM à l'aide d'une technique de segmentation sémantique



Shukla, et al (2023) [66], ont proposé une approche de Segmentation de la sténose lombaire par les performances métriques IOU (intersection-over-union) chez 515 patients et 1545 images IRM (avec les pondérations T1 et T2 axiales), basé sur un modèle d'apprentissage profond utilisant un réseau neuronal convolutif (CNN) (2D Unet). Le modèle a obtenu Les performances métriques IOU comprennent une précision de 99%, une perte de 5% et une moyenne IOU de 71%. L'IOU est un facteur décisif pour l'identification de la sténose vertébrale (**Figure II.17**).

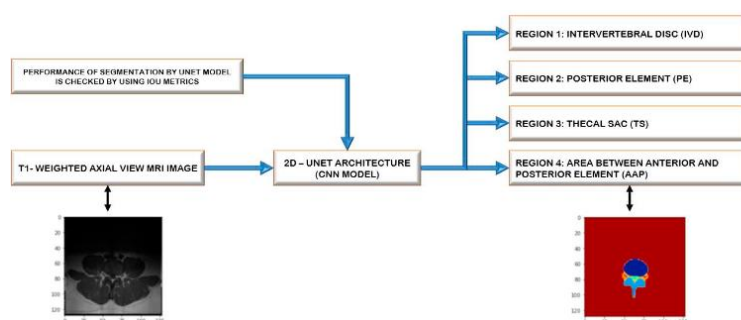


Figure II.17 : Schéma fonctionnel de la segmentation d'images

A la fin **Friska et, al (2020)** [69], ont proposé une nouvelle stratégie a été développée pour évaluer l'étendue de la sténose lombaire en utilisant une méthode de calcul automatique des distances à partir des images IRM de la colonne lombaire du patient. Cette approche a été appliquée à un groupe de 515 patients avec un total de 1545 images IRM (pondérations T1 et T2 axiales). L'architecture SegNet a été utilisée avec des coefficients VGG16 pré-entraînés sur la base de données ImageNet pour segmenter les images IRM axiales. De plus, la technique d'évolution de contour a été utilisée pour améliorer la précision de la segmentation. Les résultats ont montré une amélioration significative des performances de précision du diagnostic de hernie, avec une précision de 96,7%. En comparaison avec les méthodes GAC (geodesic active contour) et CV (Chan and Vese), la méthode d'évolution de contour s'est avérée plus rapide et a produit des limites fiables et précises (**Figure II.18**).

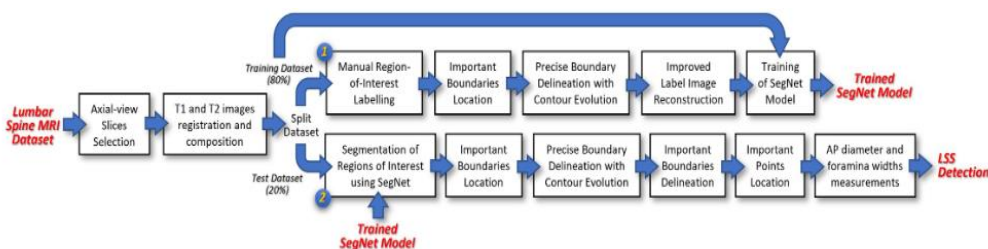


Figure II.18: Illustration schématique de l'architecture CNN utilisée dans le cadre proposé pour détecter une sténose lombaire



II.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exploré les travaux existants dans la littérature liés à notre étude sur le CNN, en mettant en avant le Deep Learning et l'utilisation des réseaux de neurones convolutionnels. Nous avons défini ces réseaux et souligné leur capacité à extraire des caractéristiques à partir de données en entrée, permettant ainsi de les classifier en se basant sur ces caractéristiques. Nous avons également abordé les différents types de réseaux de neurones et le fonctionnement de base d'un réseau de neurones convolutif simple, en détaillant les opérations de convolution, de pooling, les fonctions d'activation et de perte.

Chapitre III

Expérimentations et Résultats



III.1 Introduction

Les douleurs lombaires sont l'une des principales causes de maladie et d'incapacité, avec une prévalence croissante due au vieillissement constant de la population mondiale. Selon l'American College of Radiologists, l'imagerie par résonance magnétique (IRM) de la colonne lombaire est la méthode d'imagerie favorisée pour exclure les causes de douleurs lombaires complexes et pour décider si des approches thérapeutiques conservatrices ou invasives doivent être envisagés. Parmi ces causes, la hernie discale peut entraîner des douleurs irradiantes, un engourdissement des membres inférieurs voire des complications plus graves. Cette maladie a un impact considérable sur la vie et le travail des patients en raison de sa fréquence de récurrence et de ses complications. Grâce aux avancées de la médecine moderne, notre compréhension de cette maladie s'améliore grâce à l'utilisation de systèmes automatisés pour la détection et l'évaluation des pathologies sur les différents examens radiologiques, ce qui aide les radiologues à diagnostiquer avec précision les cas de hernie discale. Cependant, il reste encore des cas où l'efficacité est insuffisante, ce qui a été l'objet de notre travail visant à améliorer le diagnostic et à éliminer cet obstacle dans le diagnostic que nous présenterons dans ce chapitre, nous aborderons les diverses applications de l'apprentissage profond dans le domaine de l'imagerie médicale, avec les méthodes de traitement utilisées, ainsi que les normes et critères à respecter, jusqu'aux résultats obtenus.

III.2 La segmentation des images médicales par les méthodes d'apprentissage profond

L'objectif de toute méthode de segmentation est d'extraire des attributs qui caractérisent ces entités, quelle que soit l'origine de l'image. La segmentation et l'annotation automatique des structures dans les images médicales sont des tâches essentielles pour de nombreuses applications clés telles que le diagnostic assisté, le suivi des pathologies et la recherche clinique. Au fil des années, des approches de segmentation efficaces ont été proposées, la plupart nécessitant l'intervention humaine pour étiqueter manuellement les régions d'intérêt dans l'image ou le volume à segmenter. Ces dernières années, les modèles d'apprentissage profond ont introduit de nouveaux modèles de segmentation d'images qui ont considérablement amélioré les performances pour résoudre ces problèmes. Ces modèles atteignent souvent les meilleurs taux de précision en imagerie médicale, permettant d'analyser et de détecter les anomalies cancéreuses dans les cellules (**Figure III.1**) [70].

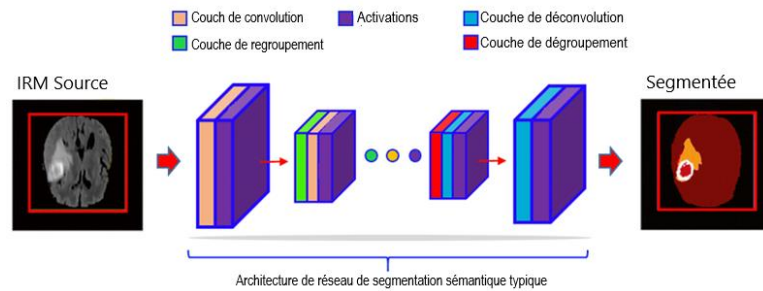


Figure III.1 : Processus typique de segmentation par apprentissage profond avec un réseau neuronal convolutif [71] .

III.3 La segmentation sémantique

Le but de la segmentation sémantique est d'attribuer une classe correspondante à chaque pixel d'une image. Cela permet de distinguer un ensemble de pixels formant des catégories distinctes. La division d'une image en deux classes est un exemple simple de segmentation sémantique (**Figure III.2**). Le résultat est une image haute résolution généralement de la même taille que l'image d'entrée, dans laquelle chaque pixel est classé dans une classe spécifique. Il s'agit donc d'une classification d'image au niveau du pixel [70]. Cette tâche est essentielle pour la compréhension de la scène ou pour expliquer le contexte global d'une image. En analyse d'images médicales, la segmentation d'images peut être utilisée pour des interventions guidées par image, la radiothérapie ou un diagnostic radiologique amélioré [55].



Figure III.2 : Image et étiquette des pixels [88]

III.4 Les différents modèles d'apprentissage profond pour la segmentation

Dans cette partie, nous allons définir différents réseaux de neurones utilisés pour la segmentation des images médicales :



III.4.1 U-Net

U-NET est un modèle de réseau de neurones entièrement convolutif développé par *Olaf Ronneberger, Phillip Fischer et Thomas Brox* en 2015 [72]. Il a été spécialement conçu pour la segmentation d'images médicales.

L'architecture de U-NET se compose de deux "chemins" (**Figure III.3**). Le premier est le chemin de contraction, également appelé encodeur, qui capture le contexte d'une image en comprimant progressivement les informations dans une représentation de dimension inférieure. Ensuite, le deuxième chemin est celui de l'expansion symétrique, également appelé décodeur, qui décode ces informations dans la dimension d'origine de l'image. Ainsi, l'architecture prend la forme d'un U, d'où son nom U-Net.

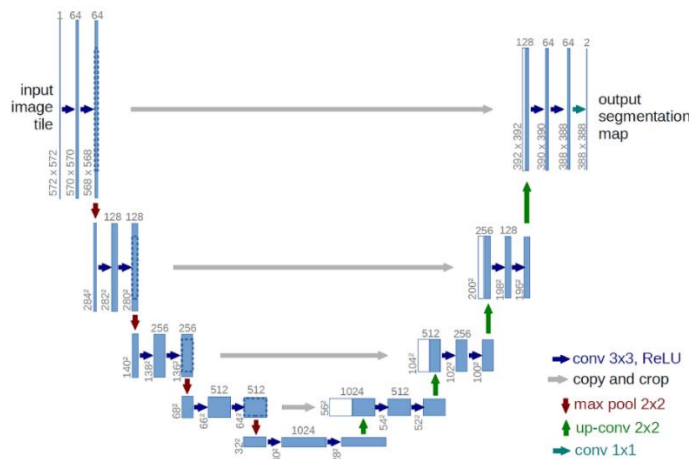


Figure III.3 : Illustration de l'architecture de U-Net [73]

Elle repose sur l'application répétée de deux convolutions 3x3, suivies chacune d'une unité linéaire rectifiée (ReLU) et d'une opération de pooling max 2x2 avec un pas de 2 pour le sous-échantillonnage. À chaque étape de sous-échantillonnage, le nombre de canaux de fonctionnalités est doublé. Chaque étape du chemin expansif comprend un suréchantillonnage de la carte de fonctionnalités suivi d'une convolution 2x2 (« convolution ascendante ») qui réduit de moitié le nombre de canaux de fonctionnalités, une concaténation avec la carte de fonctionnalités recadrée en fonction du chemin de contraction, et deux convolutions 3x3, chacune suivie d'un ReLU. Le recadrage est nécessaire en raison de la perte de pixels de bordure à chaque convolution. Enfin, une convolution 1x1 est utilisée pour mapper chaque vecteur de caractéristiques à 64 composants au nombre de classes souhaité. Au total, le réseau compte 23 couches convolutives.



En outre, l'une des caractéristiques principales de l'architecture U-Net réside dans les connexions sautées, qui permettent le flux d'informations du côté [25] [74].

III.4.2 SegNet

Dans cette histoire, nous faisons une brève revue de SegNet, de l'Université de Cambridge. À l'origine, il a été soumis au CVPR 2015, mais finalement il n'a pas été publié dans le CVPR. Cependant, une version du rapport technique *arXiv* 2015 a été publiée et a reçu plus de 100 citations. Au lieu de cela, il a été publié dans TPAMI 2017 et a reçu plus de 1 800 citations [75] [30].

III.4.2.1 Architecture de SegNet

SegNet est une architecture de décodeur d'encodeur utilisée pour la segmentation d'image par pixel (**Figure III.3**). Il est composé d'un réseau d'encodeurs et d'un réseau de décodeurs correspondants, suivis d'une couche finale de classification par pixel. Les paires Encodeur-Décodeur sont utilisées pour générer des cartes de caractéristiques pour les classifications de différentes résolutions.

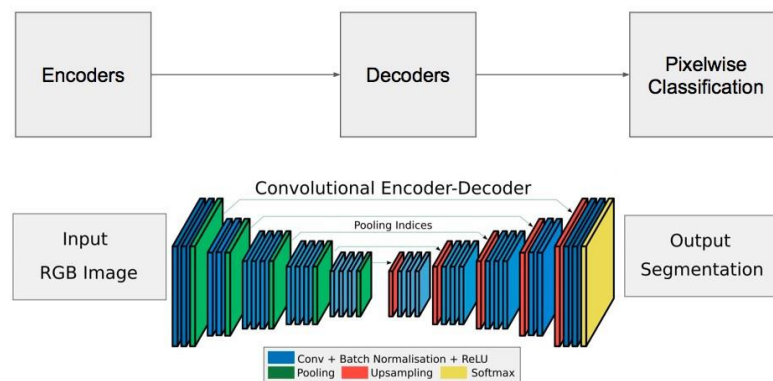


Figure III.4 : Illustration de l'architecture de SegNet [73]

L'encodeur

Au niveau de l'encodeur, des convolutions et un pooling maximum sont effectués. L'innovation réside dans l'étape de sous-échantillonnage, où le pooling maximum est utilisé pour obtenir une invariance de translation sur de petits déplacements spatiaux dans l'image. Combiné avec le sous-échantillonnage, cela permet à chaque pixel de gouverner un contexte d'image d'entrée plus grand (fenêtre spatiale). Ces méthodes améliorent la précision de la classification mais réduisent la taille de la carte des caractéristiques, ce qui entraîne une



représentation d'image avec perte et des limites floues, ce qui n'est pas idéal pour la segmentation.

Le décodeur

Le décodeur de SegNet est composé du même nombre de blocs que l'encodeur. Chaque bloc est constitué d'une couche de sur-échantillonnage et effectue une convolution avec un banc de filtres entraînaables. Contrairement au réseau de déconvolution, aucun ReLU n'est utilisé dans le décodeur, ce qui facilite l'optimisation des filtres dans chaque paire. Un élément clé de l'architecture SegNet est l'utilisation des indices de mise en commun maximale restaurés pour effectuer le sur-échantillonnage dans la partie décodeur. Ce processus permet de conserver les détails haute fréquence dans les images segmentées, tout en réduisant la consommation de mémoire et le nombre de paramètres d'apprentissage dans la phase de décodeur. La sortie finale du décodeur est envoyée à un classificateur softmax, qui produit des probabilités de classe pour chaque pixel de manière indépendante. La couche softmax génère un vecteur de probabilités pour chaque pixel, où le nombre de probabilités est égal au nombre de classes (nombre de canaux). SegNet utilise une architecture "plate", ce qui signifie que le nombre de fonctionnalités dans chaque couche reste le même, mais avec une connectivité complète [72] [76] .

III.4.3 VGGNET

Le modèle VGG a été introduit par *Karen Simonyan et Andrew Zisserman* de l'Université d'Oxford en 2013, dans leur article intitulé « VERY DEEP CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR LARGE-SCALE IMAGE RECOGNITION » [77]. Cet article met principalement l'accent sur l'impact de la profondeur du réseau neuronal convolutif sur sa précision.

Andrew Zisserman et Karen Simonyan ont proposé pour la première fois le modèle VGG en 2013 et ont créé un prototype pour le défi ImageNet 2014. Ce modèle est devenu l'un des modèles les plus célèbres soumis à l'ILSVRC-2014. Ils faisaient partie du groupe de géométrie visuelle (VGG) d'Oxford.

Ce réseau se distingue par sa simplicité, en utilisant uniquement des couches convolutives de taille 3×3 empilées les unes sur les autres de manière de plus en plus profonde. La réduction de la taille du volume est gérée par le pooling maximum. Ensuite,



deux couches entièrement connectées, chacune comportant 4 096 nœuds, sont suivies d'un classificateur softmax.

Il s'agit d'une architecture standard de réseau neuronal convolutif profond (CNN) avec plusieurs couches. Le terme "profond" fait référence au nombre de couches, soit 16 ou 19 couches convolutives pour VGG-16 ou VGG-19 respectivement. L'architecture VGG est à la base de modèles révolutionnaires de reconnaissance d'objets. En tant que réseau neuronal profond, le VGGNet dépasse également les références sur de nombreuses tâches et ensembles de données au-delà d'ImageNet. De plus, elle reste aujourd'hui l'une des architectures de reconnaissance d'images les plus populaires. L'architecture VGGNet intègre les fonctionnalités les plus importantes des réseaux neuronaux à convolution [29].

III.4.3 .1 Architecture de VGGNet

L'entrée du réseau convNet basé sur VGG est une image RVB 224*224. La couche de prétraitement prend l'image RVB avec des valeurs de pixels comprises entre 0 et 255 et soustrait les valeurs moyennes de l'image qui sont calculées sur l'ensemble d'entraînement ImageNet (Figure III.5).

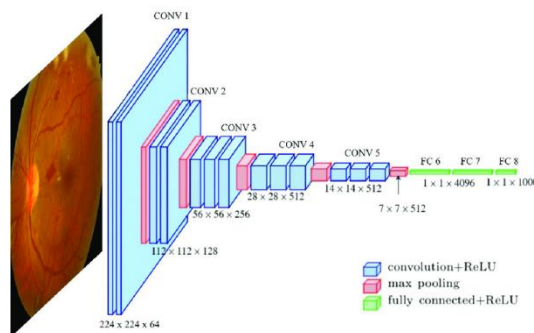


Figure III.5 : Illustration de l'architecture de VGGNet [78]

III.4.3 .2 VGGN 16

Après le prétraitement, les images d'entrée passent par ces couches de pondération. Les images d'entraînement traversent une pile de couches de convolution. Il y a un total de 13 couches convolutives et 3 couches entièrement connectées avec la couche de sortie softmax dans l'architecture VGG16. Il utilise des filtres plus petits (3*3) avec plus de profondeur au lieu de grands filtres, ainsi que 5 couches de Max pooling de taille (2 x 2) sur l'ensemble du réseau (Figure III.6).

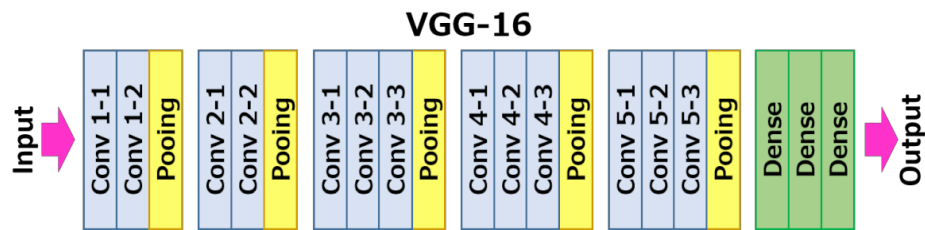


Figure III.6 : Le réseau de neurones VGG16 [56]

VGG16, comme son nom l'indique, est un réseau neuronal profond à 16 couches. C'est un réseau relativement étendu avec un total de 138 millions de paramètres. Il empile de nombreuses couches convolutives pour créer des réseaux neuronaux profonds qui améliorent la capacité d'apprentissage des caractéristiques cachées.

III.4.3.3 VGGN 19

Une autre variante de VGGNet comporte 19 couches de poids composées de 16 couches convolutives avec 3 couches entièrement connectées et même 5 couches de pooling. Dans les deux variantes de VGGNet, il y a deux couches entièrement connectées avec 4 096 canaux chacune, suivies d'une autre couche entièrement connectée avec 1 000 canaux pour prédire 1000 étiquettes. La dernière couche entièrement connectée utilise la couche softmax à des fins de classification [28].

III.5 Les méthodes d'optimisation

III.5.1 Stochastic Gradient Descent (SGD)

Le modèle CNN utilise l'algorithme Stochastic Gradient Descent (SGD) afin d'atteindre une convergence optimale. Son fonctionnement repose sur une évaluation itérative des paramètres, suivie du calcul de la perte et d'un déplacement minimal dans la direction qui minimise cette perte. Ce principe constitue la base générale de l'algorithme [79].

III.5.2 Méthode Adam

Adam est l'acronyme de "Adaptive Moment Estimation", qui est la méthode d'optimisation la plus couramment utilisée dans le domaine d'apprentissage profond. Elle offre une approche différente pour calculer les gradients actuels en utilisant les gradients passés. En plus de cela, Adam utilise le concept de moment adaptatif en ajoutant des fractions des gradients précédents au gradient actuel. Cette méthode d'optimisation est devenue très répandue et est largement acceptée pour l'entraînement des réseaux neuronaux. Il est parfois



facile de se perdre dans la complexité de certains de ces nouveaux optimiseurs, mais Adam est généralement considéré comme robuste dans le choix des hyperparamètres, bien que la vitesse d'apprentissage puisse parfois nécessiter des ajustements par rapport à la valeur par défaut suggérée [76].

III.6 Matériels

III.6.1 Environnement de travail

L'apprentissage profond requiert une vaste base de données ainsi que des ressources matérielles puissantes pour effectuer les calculs intensifs liés à l'entraînement et à l'inférence des modèles. Afin de mener à bien notre projet, nous utilisons un poste de travail de laboratoire GBM qui offre des performances satisfaisantes pour mener des expériences. À cet effet, les expérimentations ont été réalisées sur une machine offrant des performances acceptables, avec un processeur de marque spécifique, En plus notre ordinateur personnel avec les spécifications suivantes :

Les caractéristiques	Ordinateur de laboratoire	Ordinateur personnel
Processeur	Intel(R) Xeon (R)W-2102 CPU 2,90 GHz	Intel(R) Core (TM) i5-8350U CPU @ 1.70GHz 1.90 GHz
Mémoire installée (RAM)	16,0 Go.	16 ,0 Go
Disque dur	1000 Go HDD.	1000 Go HDD.
Type de système	Système d'exploitation Windows 10, 64 bits, processeur x64, version 22H2	Système d'exploitation 64 bits, processeur x64, Windows 11 Professionnel version 21H2.

Tableau III.1 : les caractéristiques des ordinateurs utilisées

III.6.2 Langage de programmation, Framework et bibliothèques

Python

Python a été développé à l'institut néerlandais de mathématiques et d'informatique (CWI) à Amsterdam par Guido van Rossum à la fin des années 1980, et sa première annonce



remonte à 1991. Le noyau du langage est écrit en langage C. Rossum a appelé son langage "Python" pour exprimer son admiration pour un célèbre groupe de sketches britannique qui s'appelaient Monty Python. Il est rendu disponible sous licence libre et son développement est aujourd'hui assuré par la Python Software Foundation, fondée en 2001 [89]. Python se distingue par sa simplicité et sa lisibilité, ce qui en fait un choix populaire parmi les programmeurs débutants et expérimentés. Langage interprété fonctionnant sur la plupart des plateformes informatiques, il est également très apprécié des pédagogues pour s'initier aux concepts de base de la programmation. Depuis sa création, le succès du langage n'a cessé de croître, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle et l'apprentissage profond grâce à sa simplicité d'utilisation, sa vaste bibliothèque standard et ses nombreuses bibliothèques tierces spécialisées telles que TensorFlow, Keras, NumPy et Pandas. Il offre des outils de haut niveau pour optimiser la productivité des programmeurs et faciliter le développement de projets variés. Notre projet est réalisé en Python dans le cloud, profitant ainsi de toutes les fonctionnalités et avantages offerts par ce langage de programmation populaire [90]

Le Navigateur Anaconda

Le Navigateur Anaconda est une interface graphique (GUI) intégrée à la distribution Anaconda, permettant aux utilisateurs de lancer des applications et de gérer les librairies conda. En outre, le Navigateur peut accéder aux librairies disponibles sur le Cloud Anaconda ou dans un dépôt Anaconda local pour les installer, les exécuter et les mettre à jour. Cette fonctionnalité est compatible avec les systèmes d'exploitation Windows, macOS et Linux

Spyder

Spyder, l'Environnement de Développement Scientifique pour Python, est un IDE open-source conçu spécifiquement pour les professionnels de la Data Science. Au début des années 2000, de nombreuses entreprises ont commencé à utiliser l'analyse de données pour leurs décisions stratégiques. Spyder est un IDE multiplateforme et extensible avec des plugins, offrant des outils interactifs pour l'inspection des données et des contrôles de qualité spécifiques à Python. Il est disponible sur différentes plateformes telles que Windows, macOS et les distributions Linux. Pierre Raybaut, un développeur français, a créé Spyder pour répondre aux besoins des analystes et Data Scientists en proposant une interface conviviale, et des fonctionnalités avancées pour accroître la productivité. En outre, Spyder intègre des



bibliothèques scientifiques populaires de Python comme NumPy, Pandas, Matplotlib et SciPy, offrant ainsi aux Data Scientists un environnement complet pour leurs projets [\[91\]](#)

Keras

Keras est une bibliothèque open source de haut niveau d'apprentissage en profondeur écrite en Python, qui s'exécute sur la plate-forme d'apprentissage automatique TensorFlow. Cette bibliothèque a été développée par François Chollet ; dans le but de permettre une expérimentation rapide. Elle offre la possibilité de passer rapidement de l'idée au résultat, ce qui est essentiel pour mener des recherches de qualité. Keras est utilisé pour le prototypage rapide, la recherche avancée et la production de modèles de réseaux neuronaux. [\[92\]](#) [80].

TensorFlow

TensorFlow est un logiciel open source pour le calcul numérique qui a été créé par les chercheurs de Google et publié en novembre 2015 sous licence Apache. Il est basé sur l'infrastructure DistBelief de Google, lancée en 2011, et propose une interface pour Python, Julia et R2. TensorFlow est l'un des outils les plus utilisés en intelligence artificielle dans le domaine de l'apprentissage automatique. Ce framework est conçu pour l'implémentation d'algorithmes d'apprentissage en profondeur ainsi que d'autres tâches d'analyse statistique et prédictive. Il offre une grande flexibilité pour le développement de réseaux de neurones convolutifs (CNN). TensorFlow est devenu extrêmement populaire dans le domaine de l'apprentissage en profondeur et des réseaux neuronaux en raison de sa flexibilité, de ses performances et de sa vaste communauté de développeurs [\[93\]](#).

Scikit-learn

Scikit-learn est un outil en Python dédié à l'apprentissage automatique, open source, qui offre diverses fonctionnalités telles que des classifications, des algorithmes de régression et de regroupement comme les machines à vecteurs de support (SVM), les forêts aléatoires, le boosting de gradient, les k-means. Cette bibliothèque est utilisée pour la création et la formation de modèles d'apprentissage automatique.

Nous avons employé cette librairie scikit-learn afin de réaliser les calculs requis pour la représentation graphique et statistique de divers éléments tels que la matrice de confusion, la fonction d'efficacité du récepteur et les paramètres d'apprentissage du modèle. Cette librairie repose sur NumPy, SciPy et matplotlib [\[84\]](#).



NumPy

La bibliothèque NumPy (Numerical Python) est la bibliothèque la plus populaire de calcul scientifique logicielle puissante et open source utilisée pour le calcul numérique en Python. Elle propose des structures de données de tableau multidimensionnel (array), divers objets dérivés (tels que des tableaux et des matrices masqués) et une variété de routines pour des opérations rapides sur des tableaux, incluant des opérations mathématiques, logiques, de manipulation de forme, de tri et de sélection. Nous avons utilisé cette bibliothèque pour adapter le type d'entrée et également pour la manipulation des tableaux [\[94\]](#).

Matplotlib

Matplotlib est un outil de traçage très utile pour Python, permettant de créer des visualisations statiques, animées et interactives dans ce langage de programmation. [\[60\]](#). Il est souvent combiné avec NumPy et SciPy pour des calculs scientifiques. Elle est conçue pour représenter et afficher des données sous forme de graphiques, c'est-à-dire fournir une représentation visuelle des résultats. Nous l'utilisons lorsque nous avons besoin de créer des images pour effectuer des comparaisons.

Cette bibliothèque est largement utilisée dans le domaine de la science des données, de la visualisation de données et de l'analyse exploratoire [\[95\]](#).

III.6.3 Environnement de programmation en ligne

L'apprentissage d'un réseau de neurones requiert une puissance de calcul considérable. Notre approche repose sur un réseau convolutif profond, ce qui implique un grand nombre de paramètres à entraîner. La formation sur un ordinateur portable aurait également demandé beaucoup de temps. Nous avons opté pour l'utilisation de l'environnement de bloc-notes Google Colab.

Google Colab

Google Colab (ou Colaboratory) est un service gratuit offert par Google pour vous initier à l'apprentissage profond. Il vous permet d'écrire et d'exécuter du code en Python dans un environnement Jupyter Notebook en ligne, sans avoir besoin de configurer un environnement Python localement sur votre machine. Google Colab vous offre également la possibilité d'utiliser des ressources puissantes de calcul, telles que des processeurs graphiques (GPU) et des unités de traitement tensoriel (TPU), pour accélérer l'exécution de certaines tâches de calcul intensif. De plus, vous pouvez importer et enregistrer vos blocs-notes depuis



et vers Google Drive, ce qui facilite la collaboration et le partage. Google Colab est basé sur Jupyter Notebook et est destiné à la formation et à la recherche dans l'apprentissage automatique. Cette plateforme vous permet d'entraîner des modèles de machine learning directement dans le cloud, encourageant ainsi la recherche sur l'apprentissage profond et l'intelligence artificielle. Elle élimine l'obstacle lié à la nécessité d'une puissance de calcul considérable pour l'apprentissage et le succès dans ces domaines. En utilisant Google Colab, vous pouvez améliorer vos compétences en codage Python, développer des applications en apprentissage profond en utilisant des bibliothèques populaires telles que Keras, TensorFlow, PyTorch et OpenCV, et accéder gratuitement à un GPU et à un TPU. Google Colaboratory fonctionne sur les serveurs Google, vous n'avez donc rien à installer, et vos documents Colab (Jupyter Notebook) sont enregistrés directement sur votre compte Google Drive. [96]

III.6.2 La base de données

De nombreuses bases de données d'IRM médullaire ont été publiées dans des études scientifiques. Dans notre cas, nous avons choisi une base de données appelée LSS Diag.zip, qui a été créée en 2020 et qui fait partie de Mendelay Data. Cette base de données contient trois dossiers importants : `Intermediary_Ground_Truth_Data`, `Final_Ground_Truth_Data` et `Predicted_Images`.

Le dossier `Final_Ground_Truth_Data` est celui qui nous intéresse le plus. À partir de ce dossier, nous avons extrait deux fichiers essentiels. Le premier fichier, `composite_images_Images`, contient 1545 images IRM originales. Ces images nous donnent une vue détaillée de la colonne lombaire. Le deuxième fichier, `Label_Images`, est composé de 1545 images segmentées qui mettent en évidence les zones d'intérêt. Ces images sont en fait des compositions 2D à 3 canaux. Les deux premiers canaux sont créés en utilisant une image fixe pondérée en T1 et en la transformant en une pondération T2. Le troisième canal est réglé pour représenter la distance de Manhattan entre les deux images, une mesure effectuée par les chercheurs.

L'ensemble de données LSS Diag.zip est divisé en deux parties. La première partie comprend **1000** images d'apprentissage. La deuxième partie comprend **309** images de test

III.7 L'évaluation métriques

Il est essentiel d'évaluer quantitativement un système d'aide au diagnostic médical pour démontrer son efficacité et sa robustesse. Plusieurs métriques d'évaluation peuvent être



calculées lors de la phase de test, fournissant des informations précises et spécifiques sur la fiabilité de la technique proposée.

III.7.1 La précision

Est un indicateur important pour évaluer la performance d'un modèle. Elle permet de mesurer le pourcentage de pixels correctement identifiés pour chaque classe. En d'autres termes, il s'agit du rapport entre les pixels correctement classés et le nombre total de pixels de cette classe. Cette mesure vise à détecter les faux positifs et négatifs dans les résultats du modèle.

$$\textit{Précision} = \frac{vp}{VP + Fp} \quad (4)$$

Vrai positif (VP) : le modèle prédit positif pour une valeur réellement positive.

Vrai négatif (VN) : le modèle prédit négatif pour une valeur réellement négative.

Faux positif (FP) : résultat erroné où le modèle prédit positif alors qu'il est en réalité négatif.

III.7.2 Coefficient de Dice

Le DSC est une mesure standard utilisée en segmentation d'images médicales, mais il présente un inconvénient majeur en étant sensible à la taille de l'objet évalué. Une erreur d'un pixel sur un petit objet aura un impact considérable sur le DSC par rapport à la même erreur sur un gros objet.

$$\text{DSC}(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{2(\mathbf{A} \cap \mathbf{B})}{(\mathbf{A} + \mathbf{B})} \quad (5)$$

Où :

- **A** est l'ensemble des pixels prédits comme appartenant à l'objet (ou à la région d'intérêt) par l'algorithme de segmentation,
- **B** est l'ensemble des pixels appartenant à l'objet selon la vérité terrain,
- $|\mathbf{A} \cap \mathbf{B}|$ est le nombre de pixels qui sont à la fois dans l'ensemble prédit **A** et dans l'ensemble de vérité terrain **B**
- $|\mathbf{A}|$ et $|\mathbf{B}|$ sont les nombres de pixels dans les ensembles **A** et **B**, respectivement.



En outre, cette mesure ne fournit aucune information sur la cohérence de la forme et de la position spatiale de la prédiction. Cependant, les distances de surface sont capables de détecter les valeurs aberrantes critiques et de montrer comment la prédiction a pu reconstruire correctement la forme de l'organe considéré.

III.7.3 Indice de Jaccard

L'indice Jaccard est une mesure de la similarité entre deux échantillons, En imagerie médicale, il peut être utilisé pour calculer la similarité entre deux régions.

$$J(A,B) = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (6)$$

Où :

- **A** est l'ensemble des pixels prédits comme appartenant à l'objet (ou à la région d'intérêt) par l'algorithme de segmentation,
- **B** est l'ensemble des pixels appartenant à l'objet selon la vérité terrain,
- $|A \cap B|$ est le nombre de pixels qui sont à la fois dans l'ensemble prédit **A** et dans l'ensemble de vérité terrain **B**
- $|A \cup B|$ sont les nombres de pixels dans les ensembles **A** ou **B**

III.8 Méthodes et Résultats

La segmentation des images médicales joue un rôle majeur dans le traitement d'images et pour l'aide au diagnostic surtout dans le cas des maladies musculosquelettiques. Parmi ces maladies, les hernies discales sont les plus courantes et ont un mauvais pronostic. Alors, dans ce travail nous présentons une technique de segmentation les disques intervertébraux à partir des images IRM axiales de colonne vertébrale en utilisant l'apprentissage profond afin de faciliter la détection des anomalies du rachis vertébrale. Dans cette section, nous allons nous concentrer principalement sur la mise en œuvre de notre projet, en décrivant principalement la création de nos modèles

III.8.1 Prétraitement

Le flux de travail proposé comprend trois phases principales

- Prétraitement des données
- Formation et validation



- Évaluation des performances

A. Prétraitement des données

1) Sélection de sous-volumes

La première étape du prétraitement des données implique l'acquisition d'un ensemble de données provenant du site Web de Mendelej. Cet ensemble comprend des images de vérité terrain représentant les disques intervertébraux du rachis lombaire en IRM selon cinq régions d'intérêt préalablement étiquetées : le disque intervertébral (IVD), l'élément postérieur (PE), le sac thécal (TS), la zone entre antérieur et postérieur (AAP), ainsi que les muscles et autres composants (Contexte). L'ensemble de données se compose de 1545 images, offrant une ampleur suffisante pour entraîner un réseau neuronal convolutif sophistiqué. Chaque image a été annotée avec cinq étiquettes, en conformité avec les recommandations des radiologues spécialisés, qui utilisent des tests axiaux pondérés en T1 ainsi que d'autres modalités pondérées en T1 et T2 pour l'interprétation IRM des disques intervertébraux.

2) Normalisation de l'image : Il est crucial de prétraiter les images en imagerie médicale pour obtenir des données extraites sans artefacts, assurant ainsi des résultats précis et de haute qualité lors des étapes subséquentes telles que la segmentation et l'extraction des caractéristiques. À cet effet, les valeurs des pixels sont normalisées pour avoir une moyenne de 1 et sont converties en nombres flottants de 32 bits. L'objectif du prétraitement est de faciliter la segmentation en améliorant la similarité entre les pixels appartenant à la même région tout en accentuant les différences entre ceux des régions distinctes.

III.8.2 L'augmentation de données

Est une étape essentielle dans le prétraitement des données. Elle consiste à créer de nouvelles données d'entraînement à partir des données existantes. Prenons l'exemple des images en utilisant des techniques d'augmentation, nous pouvons générer des variations des images, ce qui permet aux modèles d'apprentissage profond de mieux généraliser et d'appliquer ce qu'ils ont appris à de nouvelles images.

Elle est particulièrement importante dans le domaine de l'apprentissage profond car il nécessite une grande quantité de données. En augmentant les données, nous pouvons créer plusieurs copies des mêmes données, on trouve 3090 images grâce à l'augmentation ce qui nous permet d'avoir un nombre suffisant d'échantillons d'entraînement. De plus,



l'augmentation de données est également utilisée pour équilibrer les données. Par exemple, en appliquant :

Les transformations : telles que le changement d'échelle, la rotation à différents angles, le cisaillement, la translation, ainsi que l'inversion horizontale et verticale, nous pouvons obtenir une variété de données qui représentent mieux la réalité et/ou l'axe Y.

- **La rotation** : elle consiste à modifier l'angle de l'image, à la faire tourner sur elle-même. Dans le cas d'une image carrée, la rotation de 90° préservera la taille de l'image.
- **L'opération de translation** : cette opération permet de déplacer l'image selon l'axe X
- **L'effet miroir** : représente un retournement selon l'axe horizontal et l'axe vertical.

L'effet miroir est comme si on regardait une image dans un miroir qui se retourne à la fois horizontalement et verticalement. Cela signifie que l'image est inversée à la fois de gauche à droite et de haut en bas. Cet effet est souvent utilisé dans l'art et la photographie pour créer des illusions ou des compositions intéressantes.

Ce qui aide à améliorer la qualité des données utilisées pour l'entraînement et l'apprentissage.

Ces approches permettent d'augmenter la taille des données, ce qui peut être utile dans différents domaines tels que la vision par ordinateur, l'apprentissage automatique et l'analyse de données. Par exemple, dans la vision par ordinateur, une plus grande quantité de données peut améliorer la précision des modèles d'apprentissage automatique utilisés pour la détection d'objets.

B. Conception de modèles :

Une des principales préoccupations dans ce flux de travail concerne le nombre d'instances nécessaires pour entraîner le modèle et les données. Notre modèle se compose de trois étapes :



Première expérimentation : architecture de réseau neuronal sans augmentation sur les images T1+T2

Nous avons réalisé une étude comparative entre deux architectures, UNeT et SegNet, afin de choisir la meilleure en fonction de leurs résultats.

➤ **Architecture UNET**

Nous introduisons l'image en ajustant la hauteur, la largeur de l'image et le nombre de canaux (256,256,3) en fonction des couches d'entrée. L'encodeur est composé de 5 couches de convolution avec normalisation par lots et pooling maximum. Pendant ce temps, l'encodeur capture le contexte et les caractéristiques de l'image. Le décodeur est constitué de 4 couches de convolution transposées avec des opérations de concaténation. La concaténation fusionne les fonctionnalités extraites du chemin de l'encodeur et de l'image transposée. Une fois la concaténation terminée, des convolutions sont effectuées avec normalisation par lots. Enfin, la couche de sortie produit un masque de l'image originale. Le chemin du décodeur ne récupère que les informations perdues pendant le processus de l'encodeur. ReLU a également été utilisé comme couche d'activation pour l'échantillonnage UP. Comme options d'apprentissage nous avons choisi : Optimiseur=Adam, Batch Size=16 avec 26 épochs.

➤ **Architecture SegNet**

Nous avons utilisé le modèle SegNet à notre ensemble d'images. Dans cette méthode, nous avons adopté un nombre de couches similaire à celui du modèle Unet , tout en choisissant également les mêmes paramètres d'apprentissage.

Résultats et Discussions

Model UNET



Figure III.7 : Les résultats de segmentation du model UNet

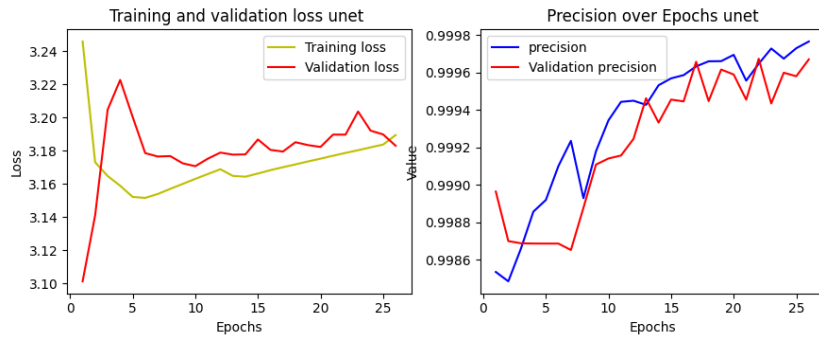


Figure III.8 : La précision et la perte du model UNet

Model SegNet :



Figure III.9 : Les résultats de segmentation du model SegNet

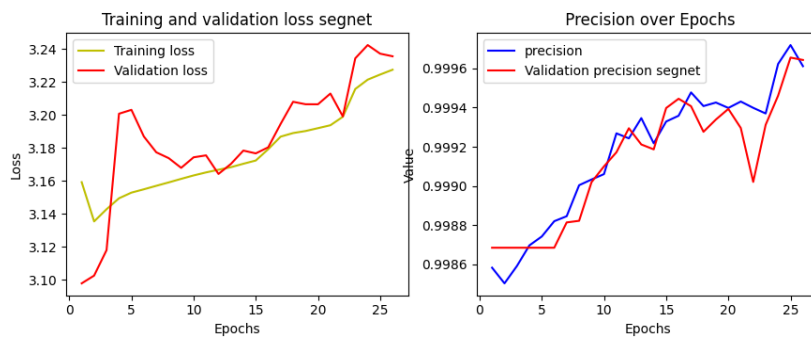


Figure III.10 : La précision et la perte du model UNet

Model	Précision	Indice de Jaccard	Indice de Dice	Temps
SegNet	99,96 %	95,22 %	97,55 %	4 min 55s
UNet	99,97 %	95,31 %	97,60 %	2min 8s

Tableau III.2 : Les résultats d'évaluation métriques du modelés UNet et SegNet



- D'après les résultats précédents, le modèle UNet se distingue par une performance et une rapidité supérieure dans la segmentation des images IRM par rapport au modèle SegNet, bien que leurs valeurs dans les métriques d'évaluation soient comparables.

Deuxième expérimentation : Variantes de l'architecture UNet avec augmentation sur les images T1+T2

Après avoir analysé les résultats précédents, nous avons choisi d'utiliser UNet en raison de sa capacité à fonctionner avec moins d'échantillons d'entraînement tout en offrant de meilleures performances pour les tâches de segmentation.

➤ **Model UNET**

Il s'agit de la même architecture unifiée mentionnée précédemment, avec l'augmentation de notre base de données.

➤ **Model UNet_VGG16**

Le modèle VGG16 est composé de 13 couches de convolution réparties en cinq blocs distincts. Les deux premiers blocs sont identiques, chacun comprenant 2 couches de convolution CONV de taille 3x3 avec 64 et 128 filtres respectivement, suivie de la fonction Relu. Les trois blocs suivants consistent en 3 couches CONV avec 256, 512 et 512 filtres respectivement, séparés par une couche de max pooling. Nous intégrons l'architecture pré-entraînée VGG-16 au modèle UNet pour l'extraction de caractéristiques, permettant ainsi d'améliorer les performances de segmentation des images IRM en vue axiale.

➤ **Model UNet_VGG19**

Similaire au modèle UNet_VGG16, à la différence que le VGG19 remplace le VGG16. Le VGG19 se distingue par l'ajout d'une couche de CONV supplémentaire dans chacun des trois derniers blocs, soit 4 couches CONV par bloc.



➤ Résultats et Discussions :

Model UNET :



Figure III.11 : Les résultats de segmentation du model UNet avec augmentation

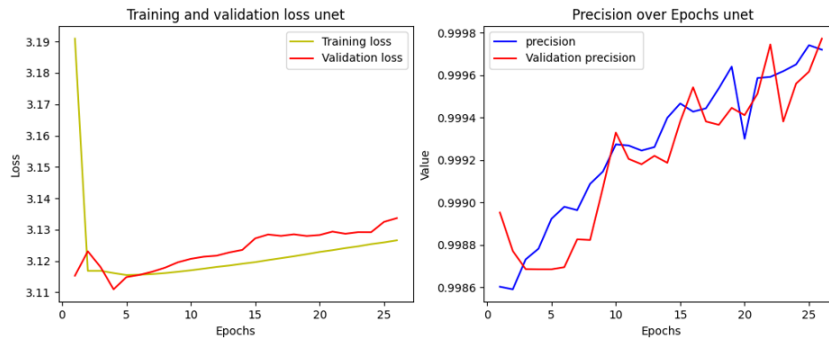


Figure III.12 : La précision et la perte du model UNet avec augmentation

Model UNet_VGG16 :



Figure III.13 : Les résultats de segmentation du model UNet_Vgg16 avec augmentation

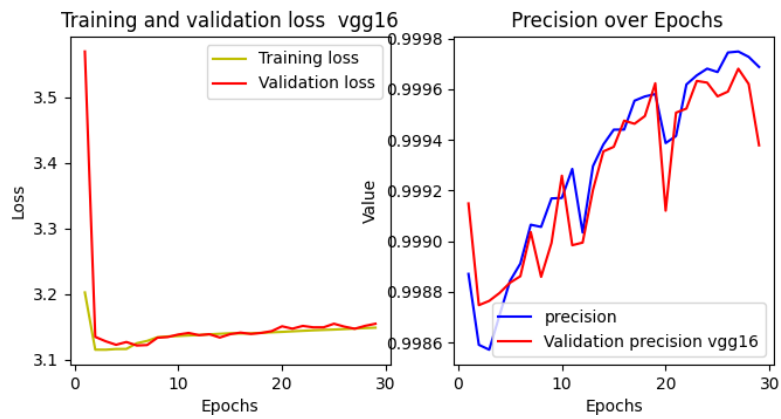


Figure III.14 : La précision et la perte du model UNet _Vgg16 avec augmentation

Model UNet_VGG19 :



Figure III.15: Les résultats de segmentation du model UNet_Vgg19 avec augmentation

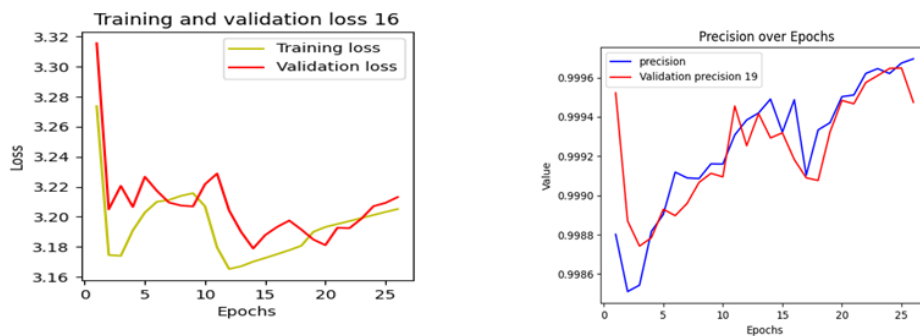


Figure III.16: La précision et la perte du model UNet _Vgg19 avec augmentation



Model	Précision	Indice de Jaccard	Indice de Dice	Temps
UNet	99,98 %	95,25 %	97,57 %	2 min 56s
UNet_Vgg16	99,96 %	95,23 %	97,55 %	3 min 2s
UNet_Vgg19	99,96 %	95,41%	97,65%	6 min 20s

Tableau III.3: Les résultats d'évaluation métriques des différentes model UNet avec augmentation

- Nous avons choisi le modèle UNet comme étant le plus efficace pour la segmentation des images IRM dans notre étude. Notre objectif était d'améliorer le modèle UNet en augmentant la base de données et en intégrant des architectures pré-entraînées comme VGG16 et VGG19. Les résultats ont indiqué que les modèles UNet-VGG16 et UNet-VGG19 ont montré des performances comparables, avec une précision de 99,96% et des métriques de similarité similaires, bien que le modèle UNet-VGG19 ait eu un temps d'évaluation légèrement supérieur en raison de ses couches supplémentaires. Après plusieurs tentatives d'amélioration, il est apparu que le modèle UNet avec augmentation des données était le plus performant et rapide, atteignant une précision de 99,98% avec un temps d'évaluation de 2 minutes et 56 secondes pour la segmentation.

Troisième expérimentation : l'apprentissage par transfert (transfert learning)

Dans cette phase de notre étude, nous avons exploré l'apprentissage par transfert en utilisant un modèle UNet pré-entraîné sur une vaste collection d'images médicales pour réaliser une segmentation multi-classe sur ces données. Par la suite, nous avons adapté ce modèle à notre base de données comprenant des images pondérées en T1 ainsi que des images combinant les pondérations T1 et T2, en appliquant des techniques d'augmentation pour évaluer sa performance dans la segmentation des disques intervertébraux à partir d'IRM.



➤ Résultats et Discussions

Sur les images T1+T2

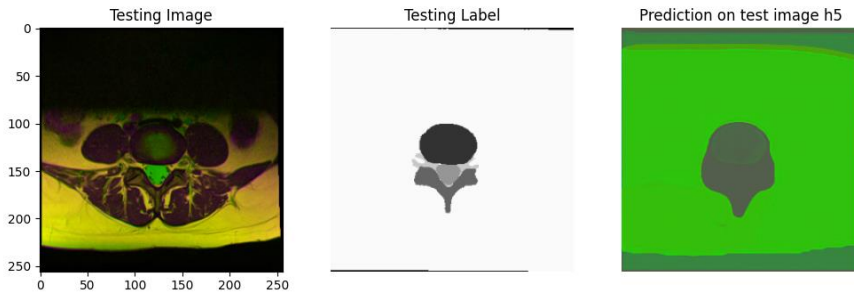


Figure III.17: Les résultats de segmentation du model UNet pré-entraîner sur les images pré-entraîner T1+T2

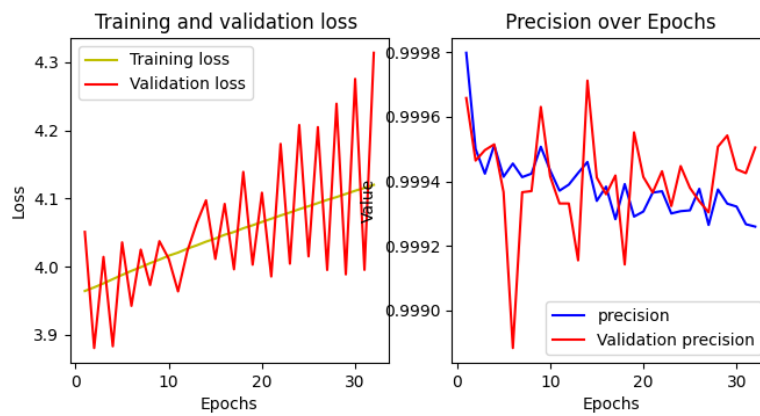


Figure III.18 : La précision et la perte du model UNet pré-entraîner sur les images pré-entraîner T1+T2

Sur les images T1

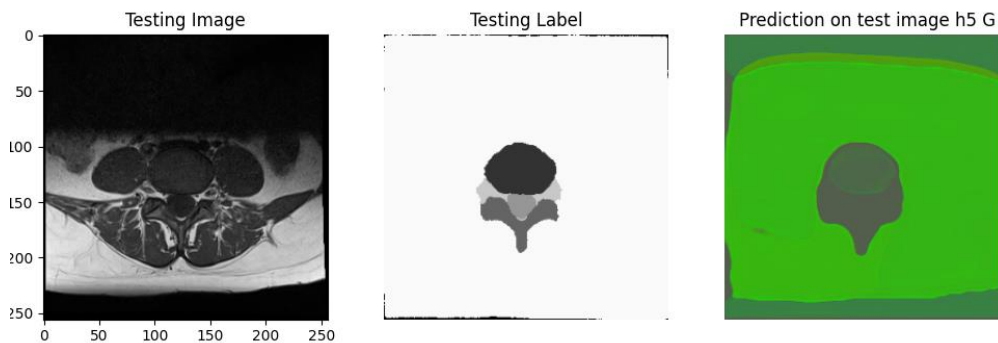


Figure III.19 : Les résultats de segmentation du model UNet pré-entraîner sur les images pondère T1

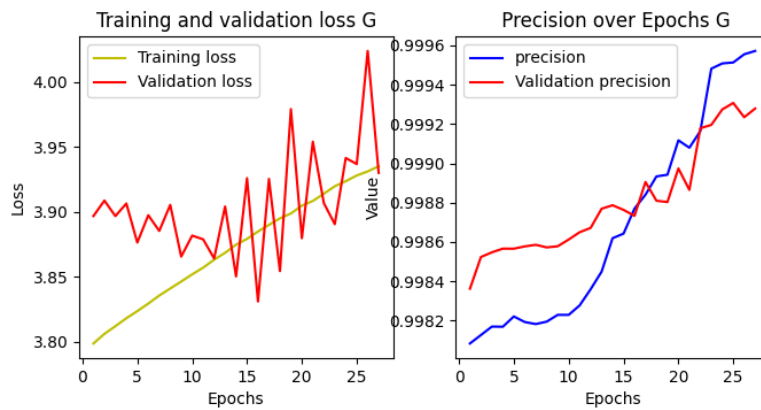


Figure III.20 : La précision et la perte du model UNet pré-entraîner sur les images pré-entraîner T1+T2

Model UNet	Précision	Indice de Jaccard	Indice de Dice	Temps
Images T1+T2	99,94 %	32,62 %	49,19 %	2 min 56s
Images T1	99,93 %	32,52 %	49,08 %	3 min 2s

Tableau III.4 : Les résultats d'évaluation métriques des différentes model UNet avec augmentation

➤ L'analyse des résultats révèle que le modèle utilisé pour la segmentation des images IRM présente des lacunes dans le contexte de l'étude. Bien que la précision soit élevée, les résultats montrent une segmentation insatisfaisante des images. Il est clair que des métriques telles que l'indice de Jaccard et le coefficient de Dice jouent un rôle crucial dans l'évaluation des performances de tout modèle de segmentation. Ces observations mettent en lumière l'importance capitale de ces métriques pour améliorer la qualité de la segmentation des images IRM

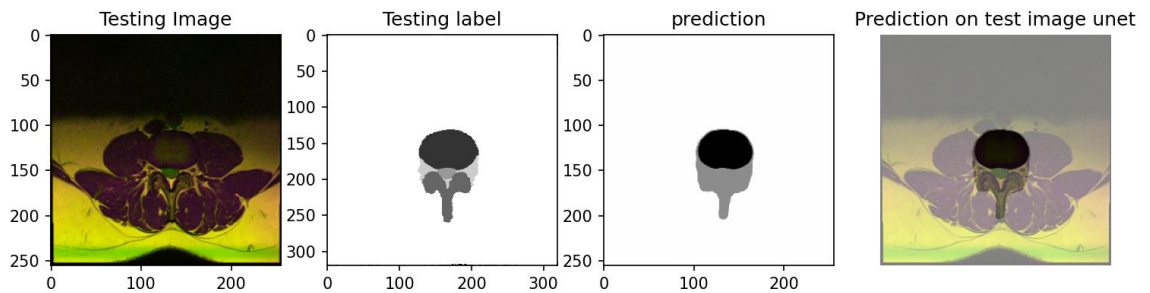
➤ **Le modelé propose**

Dans ce projet, notre méthode propose l'utilisation du modèle UNet avec augmentation pour réaliser une segmentation sémantique multi-classe des images IRM de la vue axiale du rachis lombaire. Cette approche vise à segmenter l'image en trois classes en améliorant le contraste de la région du disque intervertébral, facilitant ainsi la distinction précise des contours entre le disque et le sac thécal. Cette augmentation de contraste aide également à

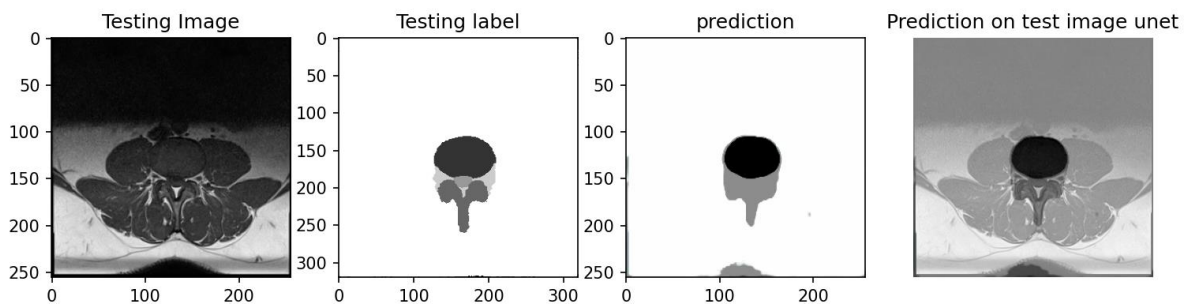


détecter efficacement les pathologies de la colonne lombaire telles que les hernies discales ou les sténoses lombaires, contribuant ainsi à améliorer la précision du diagnostic.

➤ **Résultat de modelé propose Sur les images T1+T2 :**



➤ **Résultat de modelé propose Sur les images T1 :**



III.8.3 Comparaison avec etat de l'art et l'apprentissage par transfert

Le tableau présenté ci-dessous met en lumière la comparaison entre les résultats obtenus grâce à notre méthode, l'apprentissage par transfert, et les méthodes existantes dans l'état de l'art, en termes de métriques d'évaluation. Tous ces travaux ont été testés sur la même base de données que celle utilisée dans notre étude. Cette analyse comparative nous permet de mieux comprendre l'efficacité de notre approche par rapport aux méthodes déjà établies, en mettant en évidence les points forts et les points faibles de chaque méthode. Ces résultats identifient également les axes d'amélioration potentiels pour notre méthode, ainsi que les domaines spécifiques sur lesquels nous devons nous concentrer pour améliorer nos performances.



Model	Précision	Indice de Jaccard	Indice de Dice
Mbarki et, al (2020)	/	98,1 %	89 %
Shukla, et al (2023)	99 %	71 %	/
Friska et, al (2020)	96,7%	/	/
Modelé d'apprentissage par transfert	99,93%	32,62 %	49,19
Notre modelé	99,98 %	95,25 %	97,57 %

Tableau III.5 : Évaluation des métriques de segmentation des différents modèles d'études

- Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus démontrent l'évaluation des diverses métriques utilisées dans les méthodes de pointe pour la segmentation des disques intervertébraux. Notre méthode se distingue par sa performance supérieure et sa précision accrue dans la segmentation des disques intervertébraux, facilitant ainsi la détection de diverses pathologies de la colonne lombaire et améliorant le processus diagnostique.

III.8.4 Application Medicale

HARB-MED

“Help Automatically the radiologist to give a Better diagnosis by musculoskeletal MEDICAL imaging MRI”

HARB-MED représente une avancée significative dans l'utilisation de l'intelligence artificielle pour automatiser la segmentation des images IRM musculosquelettiques.

En simplifiant ce processus, elle permet aux radiologues de réaliser des diagnostics rapides et précis, améliorant ainsi la qualité des soins aux patients. Ce projet répond à un besoin crucial en fournissant des diagnostics précis tout en évitant les retards et les erreurs associés à l'analyse manuelle.

Grâce à HARB-MED, les médecins peuvent prendre des décisions éclairées plus rapidement, ce qui améliore la prise en charge des patients. L'application comprend trois pages distinctes, chacune avec des fonctions spécifiques.



- ✓ La première est l'interface d'accueil, agissant comme une fenêtre de connexion où l'utilisateur doit saisir son nom d'utilisateur et son mot de passe pour accéder à l'application.

Application de Connexion

Université ABOU BEKR BEL KAID Tlemcen
faculté de technologie
Département de génie Biomédicale

Nom d'utilisateur

Se connecter

Bouazza Hadjer

- ✓ Une fois connecté, l'utilisateur s'est orienté vers la page d'information du patient, où le médecin peut saisir et enregistrer les données nécessaires

Application

HARB-MED

Univ-Tlemcen
GBM

Les informations du patient

Nom

Prénom

Age

Date de naissanc

État

Sexe

Type examen

Date

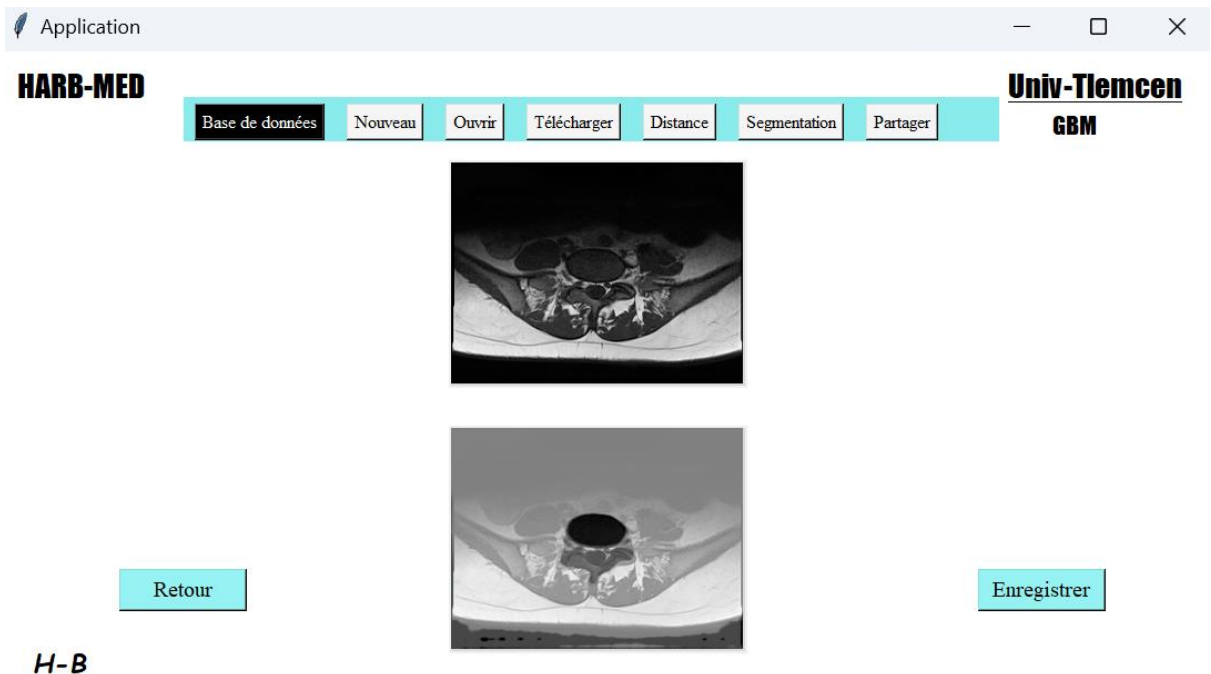
Enregistrer

Suivant

H-B



- ✓ Ensuite, il peut accéder à la page de consultation et de conseil , où il a la possibilité de télécharger des images pour une interprétation. En cliquant sur le bouton de segmentation, les résultats sont immédiatement affichés



- ✓ Enfin, l'utilisateur a la possibilité d'enregistrer et de sauvegarder ces résultats dans un dossier local ou de les partager par email avec d'autre utilisateur

III.9 Conclusion

ce dernier chapitre de ce manuscrit se concentre sur la la mise en œuvre de méthodes d'apprentissage profond pour la segmentation d'images IRM musculosquelettiques . En utilisant des techniques d'optimisation appropriées, nous avons implémenté et amélioré les performances des modèles SegNet et UNet, évaluant leur précision à l'aide de métriques spécialisées telles que l'indice de Dice, la précision et l'indice de Jaccard. Les expérimentations ont été conduites sur une plateforme matérielle puissante mentionnée précédemment, avec l'utilisation d'un langage de programmation dédié au traitement d'images. Les résultats obtenus ont été comparés à ceux d'études antérieures menées par d'autres chercheurs, démontrant que notre méthode surpassait les autres pour la détection des pathologies du rachis lombaire à partir de la segmentation d'images IRM. Ces travaux ont



permis le développement d'une application intégrant notre modèle, facilitant ainsi son utilisation par les médecins.

Conclusion générale

Ce manuscrit met en lumière l'importance de comprendre la structure de la colonne vertébrale et les pathologies qui peuvent l'affecter, en se concentrant particulièrement sur la hernie discale. Une analyse approfondie de l'anatomie, de la physiologie et des mécanismes physiopathologiques a été présentée, ainsi que les symptômes, les facteurs de risque, et les méthodes de diagnostic et de traitement. Ce cadre théorique est essentiel pour contextualiser les innovations technologiques introduites par notre projet.

Parallèlement, nous avons exploré les travaux existants sur les réseaux de neurones convolutionnels (CNN) et l'apprentissage profond. Les concepts essentiels de l'apprentissage profond et des architectures de segmentation ont été définis, mettant en avant le potentiel des CNN pour extraire et classifier des caractéristiques à partir d'images médicales. Cette exploration a souligné l'efficacité des réseaux de neurones dans le domaine de l'imagerie médicale, particulièrement pour la segmentation des images IRM.

Le dernier chapitre a été consacré à la réalisation de notre projet d'étude, basé sur les méthodes d'apprentissage profond pour la segmentation d'images IRM musculosquelettiques. En mettant en œuvre et en optimisant les modèles SegNet et UNet, nous avons amélioré la détection des pathologies du rachis lombaire. Nos résultats, évalués à l'aide de métriques spécialisées telles que l'indice de Dice, la précision et l'indice de Jaccard, ont démontré la supériorité de notre méthode par rapport aux études antérieures. Cette avancée a permis le développement d'une application intégrant notre modèle, facilitant ainsi son utilisation par les professionnels de santé.

Les perspectives

- ✓ Amélioration du modèle pour la détection d'autres anomalies musculosquelettiques
- ✓ Adaptation pour l'application sur une base de données locale ou des images TDM
- ✓ Calcul de la distance et amélioration du traitement de notre approche et la segmentation des autres structures voisines
- ✓ Création d'un site web pour notre entreprise
- ✓ Personnalisation du fonctionnement de l'application
- ✓ Intégration d'accès aux différentes modalités et partage en ligne

Annexe

1- Proposition de valeur (Value Proposition)

a. Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?

❖ Nous résolvons plusieurs problèmes cruciaux pour nos clients, notamment :

- La durée de traitement et d'analyse des images est excessive, de même que le nombre important d'images à traiter et à analyser.
- Il est souvent difficile de repérer de manière précise les anomalies des disques intervertébraux à partir des images médicales.
- Il existe un risque d'erreurs lié à la fatigue ou à l'inattention lors de l'analyse manuelle des images médicales.
- La variabilité dans la qualité des soins est due à la non-standardisation des procédures de traitement et d'analyse des images
- Il est souvent difficile de partager des images et des résultats entre différents praticiens et institutions.

b. Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?

❖ Notre service répond à divers besoins critiques de nos clients, Voici les principaux besoins que nous satisfaisons :

- **Efficacité opérationnelle** : Notre solution permette d'accélérer l'analyse et le diagnostic des images de la colonne vertébrale, ce qui optimise le déroulement des opérations.
- **Précision et fiabilité** : cette solution facilite l'identification des problèmes liés à la colonne vertébrale tels que les hernies discales ou la dégénérescence discale, améliorant ainsi la qualité du diagnostic et la prise en charge des patients. Grâce à des algorithmes de traitement d'image avancés, il est possible de fournir des diagnostics précis et fiables, ce qui revêt une importance capitale pour améliorer l'efficacité des traitements et la qualité des soins.
- **La standardisation** : la standardisation des diagnostics est rendue possible grâce à l'utilisation d'algorithmes d'intelligence artificielle, ce qui permet de réduire la variabilité entre les différents praticiens.

- **Collaboration interdisciplinaire** : Encourager la coopération entre les divers professionnels de la santé (radiologues, chirurgiens, physiothérapeutes) en utilisant des rapports partagés et des informations facilement accessibles.
- **Gestion de la Charge de Travail** : Diminuer la charge de travail des radiologues et des spécialistes.

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

❖ Notre offre se distingue de celle de nos concurrents par plusieurs caractéristiques uniques et avantages distinctifs :

- **Segmentation des zones d'intérêt de la colonne vertébrale** : La Segmentation des zones d'intérêt de la colonne vertébrale est une technique d'imagerie médicale utilisant l'intelligence artificielle pour identifier et délimiter précisément des zones d'intérêt sur des images IRM ou CT. Cette méthode permet de détecter, mesurer et suivre les anomalies comme les hernies discales, facilitant ainsi un diagnostic rapide et précis pour les professionnels de santé.
- **Technologie de pointe** :
 - Algorithmes de segmentation avancés : Nos algorithmes exploitent les plus récentes avancées en intelligence artificielle et en apprentissage profond afin de proposer des analyses plus précises et rapides que celles actuellement disponibles sur le marché.
 - Traitement d'image en temps réel : La capacité d'analyser des images en temps réel permet de réduire de manière significative le délai nécessaire pour obtenir des résultats diagnostiques.
- **Précision clinique** :
 - Réduction des erreurs humaines : L'utilisation de l'intelligence artificielle pour le diagnostic réduit les risques d'erreurs humaines et renforce la fiabilité des résultats obtenus.
- **Collaboration interdisciplinaire** :
 - Plateforme de collaboration : application permettant le partage en ligne sécurisé d'images et de résultats, favorisant la coopération entre radiologues, chirurgiens, physiothérapeutes et autres acteurs de la santé.

- **Expérience utilisateur :** Notre interface utilisateur a été spécialement conçue pour être conviviale et intuitive, même pour les utilisateurs non experts en technologie. Cela facilite grandement l'adoption et l'utilisation de notre solution par les professionnels de la santé, ce qui permet d'augmenter l'efficacité opérationnelle sans nécessiter une formation approfondie.
- **Relation client :**

- Engagement envers l'amélioration continue : Nous écoutons attentivement les retours des clients afin d'orienter les développements à venir et d'améliorer en permanence le produit.

d. Quelles est notre proposition unique de valeur ?

- ❖ Notre proposition de valeur distinctive réside dans notre capacité à fournir une solution de segmentation des zones d'intérêt de colonne vertébrale dans les images médicales, permettant un diagnostic précis et rapide, grâce à des algorithmes avancés d'IA. Cela garantit une prise de décision clinique optimale et une amélioration des résultats pour les patients, ainsi qu'une meilleure identification des pathologies des disques intervertébraux.

Segments de clients (Customer Segment) :

e. Quels sont nos clients principaux ?

- ❖ Notre service est indispensable pour :
- **Les radiologues et les spécialistes en imagerie médicale**
- **Centres de radiologie** : Établissements privés et autonomes proposant des services d'imagerie médicale.
- **Associations de radiologie** : Regroupements de radiologues collaborant ensemble, généralement au sein d'un hôpital ou d'un centre médical spécialisé.

f. Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?

- ❖ Les différents segments de clients que nous visons sont Les différents acteurs du secteur de la santé comprennent :
- **Institutions de Santé** : Hôpitaux Universitaires et Centres d'Imagerie Médicale, Cliniques Spécialisées.
- **Les professionnelles de sante** : les Radiologues

- **Institutions de Recherche et Universités** : Laboratoires de Recherche Biomédicale, Développeurs de Logiciels Médicaux.
- Ces acteurs contribuent tous à l'amélioration des soins de santé, que ce soit par la recherche, le développement de nouvelles technologies médicales ou la fourniture de soins spécialisés dans des domaines spécifiques.

g. Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment de clients ?

- ❖ Les besoins spécifiques de chaque segment de clients sont:

Institutions de Santé :

Hôpitaux Universitaires et Centres Médicaux Académiques

- Technologies de pointe : Besoin d'outils innovants pour le diagnostic précis et rapide.

Grands Hôpitaux et Réseaux de Santé

- Qualité des soins : Amélioration continue de la qualité des diagnostics et des traitements

Cliniques d'imagerie médicale

- Diagnostics spécialisés : Outils précis pour diagnostiquer de manière fiable.

Professionnels de la Santé :

Radiologues

- Précision des diagnostics : Besoin de solutions qui augmentent la précision des diagnostics et réduisent les erreurs et le temps d'analyse des images
- Efficacité opérationnelle : Automatisation des tâches répétitives pour libérer du temps pour des analyses complexes.
- Rapidité des résultats : Besoin de fournir des diagnostics rapides pour accélérer la prise de décision clinique.

Institutions de Recherche et Universités :

Laboratoires de Recherche Biomédicale

- Données précises : Accès à des outils de segmentation avancés pour obtenir des données précises pour la recherche.
- Technologies de pointe : Besoin de solutions innovantes pour explorer de nouvelles approches dans le traitement des hernies discales.
- Collaboration scientifique : Partage et collaboration faciles des données de recherche avec d'autres institutions.

Développeurs de Logiciels Médicaux :

- Collaboration technologique : Besoin de partenariats pour enrichir leurs solutions avec des technologies de segmentation avancée.
- Innovation continue : Recherche de solutions innovantes pour rester compétitifs sur le marché.

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

- ❖ La catégorisation des clients dans le domaine de la santé peut être effectuée en se basant sur divers critères :

Par Type d'Institution

a. Hôpitaux et Centres Médicaux

- Grands Hôpitaux Universitaires
- Hôpitaux Généraux

b. Cliniques et Centres de Santé

- Cliniques d'imagerie médicale
- Cabinets Médicaux Privés

c. Instituts de Recherche et Universités

- Laboratoires de Recherche Biomédicale
- Développeurs de Logiciels Médicaux

Par Rôle Professionnel

a. Professionnels de la Radiologie

- Radiologues

- Techniciens en Imagerie Médicale

d. Chercheurs et Académiques

- Chercheurs Biomédicaux
- Professeurs et Enseignants en Médecine
- Étudiants en Médecine et Radiologie

2- Relation avec les clients (Consumer Relationship) :

a. Quel type de relation chaque segment de clients attend il de nous ?

Institutions de Santé :

- **Hôpitaux Universitaires et Centres Médicaux Académiques :** Nous avons établi un partenariat stratégique solide avec des fournisseurs fiables et stables, fondé sur la confiance et la fiabilité. Nous collaborons conjointement à des projets de recherche et développement.
- **Grands Hôpitaux et Réseaux de Santé :** Assistance technique et opérationnelle, un support technique disponible 24h/24 et 7j/7 afin de résoudre rapidement les problèmes rencontrés.
- **Cliniques d'imagerie médicale :** Assistance sur mesure un support dédié est disponible pour répondre promptement aux besoins spécifiques.

Professionnels de la Santé :

- **Radiologues et Centres d'Imagerie :** une relation de fournisseur de solution (B2C) avec une entreprise offrant des outils de traitement des images médicales avancés et adaptés à leurs spécialités. Elles souhaitent une collaboration étroite pour le développement de fonctionnalités spécifiques à leur pratique et pour fournir des retours pour améliorer la solution

Institutions de Recherche et Universités :

- **Laboratoires de Recherche Biomédicale :** Ces entreprises sont intéressées par des relations B2B stratégiques, privilégiant des partenariats de développement à long terme plutôt que des transactions ponctuelles. Elles sont à la recherche d'une assistance technique et d'un soutien pour une intégration réussie de notre solution dans leurs produits.
- **Développeurs de Logiciels Médicaux :** La collaboration technologique offre un support précieux aux entreprises pour les aider à intégrer efficacement

nos technologies dans leurs solutions, renforçant ainsi leur compétitivité sur le marché.

b. Comment entretenons-nous actuellement les relations avec nos clients ?

❖ Nous entretenons actuellement les relations avec nos clients par les stratégies suivant :

- **Le service client** : consiste à mettre en relation directe le client avec le personnel de l'entreprise, que ce soit par téléphone, par e-mail ou en personne, dans le but de l'accompagner et de le conseiller pour tout achat ou service après-vente. L'objectif est de fournir un support client réactif et de qualité, en répondant rapidement aux demandes et en résolvant efficacement les problèmes rencontrés.
- **Formation et Éducation** :
 - Webinaires et séminaires : Nous planifions fréquemment des webinaires et des séminaires afin d'instruire nos clients sur l'utilisation de notre outil et les nouveautés de notre service.
 - Matériels éducatifs : Fourniture de manuels d'utilisation, de guides pratiques, de vidéos tutoriels et de documentation technique détaillée et des FAQ (Frequently Asked Questions) afin d'assister les clients dans la résolution autonome de problèmes fréquents.
- **Collaboration et Partenariats** :
 - Projets de recherche collaboratifs : Partenariats avec des hôpitaux universitaires, des centres de recherche et des entreprises technologiques pour développer de nouvelles fonctionnalités et améliorer les solutions existantes.
 - Programmes de feedback client : Sollicitation régulière de retours d'expérience et de suggestions d'améliorations de la part des clients pour adapter nos produits à leurs besoins évolutifs.
- **Communication Continue**
 - Newsletters : Envoi de newsletters régulières pour tenir les clients informés des dernières mises à jour, des nouvelles fonctionnalités et des événements à venir.

- Visites de suivi : Visites régulières des représentants de notre service pour discuter des besoins des clients, recueillir des retours et offrir une assistance personnalisée.
- **Engagement sur les réseaux sociaux** : Utiliser les médias sociaux afin d'interagir avec les clients, répondre à leurs interrogations et diffuser des informations pertinentes (Facebook, site web)

C. Comment pouvons-nous améliorer ou personnaliser nos interactions avec nos clients ?

- **Automatisation et IA**

- Chabots et assistants virtuels : Déployer des chabots et des assistants virtuels alimentés par l'IA pour fournir un support instantané et des réponses personnalisées aux questions courantes des clients.

- **Programmes de Formation Personnalisés**

- Webinaires et ateliers interactifs : Organiser des webinaires et des ateliers interactifs régulièrement pour répondre aux questions des clients, présenter de nouvelles fonctionnalités et partager les meilleures pratiques.

- **Communication Personnalisée**

- Newsletters segmentées : Envoyer des newsletters personnalisées basées sur les segments de clients, leurs intérêts et leurs besoins spécifiques.

- **Engagement Continu**

- Visites de suivi personnalisées : Planifier des visites régulières des représentants de notre service pour discuter des besoins des clients, recueillir des retours et offrir un support personnalisé.
- Événements clients exclusifs : Organiser des événements exclusifs, tels que des conférences, des ateliers et des séminaires, pour renforcer les relations avec les clients et offrir des opportunités de networking et de collaboration.

- **Solutions Adaptée :**

- Offres modulaires : Développer des solutions modulaires qui peuvent être personnalisées en fonction des besoins spécifiques des clients, permettant une plus grande flexibilité et une meilleure adaptation aux différentes situations cliniques.
- Innovation collaborative : Impliquer les clients dans le processus de développement des produits en sollicitant leurs retours et en intégrant leurs suggestions dans les nouvelles versions des solutions.

4-Canaux de distribution (Channels):

a- Par quels canaux nos clients veulent-ils être atteints ?

❖ Canaux Préférés par Nos Clients pour Être Atteints :

- **Réunions en personne** : Préfèrent des réunions en personne pour des discussions approfondies et des démonstrations de produits et pour l'achat en direct du fournisseur pour favoriser une relation de vente personnalisée et une meilleure compréhension des besoins du client.
- **Webinaires et Séminaires** : Participation à des webinaires et séminaires pour se tenir informés des dernières innovations et pratiques. Utilisation des vidéos tutoriels pour la formation continue.
- **Emails** : Envoi d'emails pour les mises à jour techniques et les informations sur les nouvelles versions. Communication pour des rapports et des invitations à des événements et les annonces de nouvelles fonctionnalités.
- **Téléphone** : Préfèrent les appels téléphoniques pour un support rapide et des consultations techniques.
- **Visites sur site** : Préfèrent des visites sur site pour des formations et des démonstrations personnalisées.

b- Quels canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients ?

- ❖ Les canaux sont les plus efficaces pour atteindre chaque segment de clients
- **Réunions en personne** : Très efficaces pour des discussions approfondies et des démonstrations de service. Permettent une interaction directe et une compréhension détaillée des besoins spécifiques.

- **Téléphone** : Très efficace pour un support rapide et des consultations techniques. Permet une résolution immédiate des problèmes et des clarifications instantanées.
- **Emails** : Efficaces pour les mises à jour techniques, les rapports et les invitations à des événements et les informations sur les nouvelles versions. Facilitent la communication formelle et suivie.
- **E-commerce** : Parfait pour les mises à jour de logiciels, offrir un processus d'achat en ligne sur notre site Web, permettant aux clients de découvrir les fonctionnalités, pour des formations et des démonstrations personnalisées. Permettent une interaction directe et une adaptation immédiate aux besoins spécifiques et les tarifs et de procéder à l'achat en toute simplicité.
- **Salons et conférences** : La présence lors de salons et de conférences médicales permet d'établir un contact direct avec des experts de la santé, offrant ainsi l'opportunité de présenter notre service en personne et de conclure des ventes sur place. Ces événements sont également efficaces pour la formation continue et l'acquisition de nouvelles compétences, favorisant une interaction en temps réel et un apprentissage visuel et interactif.

c- Comment pouvons-nous intégrer différents canaux pour améliorer l'expérience clients ?

- ❖ Pour améliorer l'expérience clients nous pouvons intégrer différents canaux de la manière suivante :
 - **Salons et conférences** : Profite de ces occasions pour collecter les informations de contact des participants, puis suivre les, en leur envoyant des e-mails personnalisés ou en les appelant. Nous pouvons également utiliser ces événements pour promouvoir notre site Web et encourager les achats en ligne ou achat en directe.
 - **Site Web et E-commerce** : Nous garantissons que notre site Web est convivial et que le processus d'achat est facile et intuitif.
 - **Marketing par e-mail** : nous Utilisons le marketing par e-mail électronique afin de tenir nos clients informés des dernières mises à jour de produits, des promotions spéciales et de leur fournir des informations utiles. Nous veillons à inclure des liens vers notre site Web pour faciliter leurs achats.

5-Partenaires clés (Key Partnerships) :

a- Qui sont nos partenaires clés ?

❖ Nos principaux partenaires clés sont :

- **Hôpitaux Universitaires et Centres d'imagerie médicale :** Accès à des volumes importants de données médicales de haute qualité et à des experts cliniques pour des retours sur les performances des outils tels que (CHU DE TLEMCCEN).
- **Développeurs de Logiciels d'Analyse d'Images Médicales :** Des développeurs expérimentés en informatique avec des compétences en traitement d'images, en apprentissage automatique et en développement logiciel. Accélèrent le développement de nouvelles fonctionnalités et améliorent l'interopérabilité avec d'autres logiciels médicaux.
- **Organismes de Réglementation :** Assurent la conformité réglementaire et la sécurité des produits pour les utilisateurs finaux tels que (IANOR, associations de radiologie, Ministère de la santé Algérie).

b- Quels sont les partenariats qui nous aident à réduire les coûts, à accéder à de nouvelles ressources ou à améliorer notre proposition de valeur ?

❖ Les partenariats sont essentiels pour réduire les coûts, accéder à de nouvelles ressources et améliorer notre proposition de valeur. Nous collaborons avec différents partenaires pour atteindre à notre objectif :

- **Partenaires Académiques et de Recherche :** Utilisation des laboratoires et des équipements des institutions partenaires, réduisant ainsi les coûts de développement.
- **Institutions Médicales et Centres d'Imagerie :** Collaboration pour tester et valider les outils de traitement dans des environnements cliniques réels, augmentant la fiabilité et la crédibilité des solutions. Obtention de retours d'expérience directement des utilisateurs finaux pour améliorer continuellement les produits en fonction des besoins réels des professionnels de santé.
- **Organismes de Réglementation et Associations Professionnelles :** Collaboration pour garantir que notre service répond aux normes de sécurité et

de qualité, facilitant ainsi l'approbation réglementaire et l'accès au marché comme : CE, IANOR, associations de radiologie, Ministère de la santé Algérie

c- Comment pouvons-nous aligner nos intérêts avec ceux de nos partenaires ?

❖ Aligner les intérêts avec ceux de nos partenaires est essentiel pour le succès de tout projet collaboratif par :

- **Définir des objectifs communs** : Une fois que les objectifs de chaque partenaire sont bien compris, il est possible de collaborer pour établir des objectifs communs qui profitent à tous et Identifier les domaines d'intérêt et les problèmes partagés que nous souhaitons résoudre ensemble.
- **Communication ouverte et transparente** : Il est essentiel d'avoir une communication transparente afin de clarifier les attentes de chaque partie et de garantir une compréhension mutuelle. Il est important de mettre en place des canaux de communication ouverts et réguliers pour discuter des avancées, des difficultés et des opportunités. Il est également primordial d'encourager un retour d'information continu et constructif afin d'ajuster les initiatives en temps réel. Nous veillons à ce que toutes les parties prenantes soient bien informées et impliquées dans le processus afin de favoriser une collaboration fructueuse.
- **Comprendre les objectifs de nos partenaires** : Chacun des partenaires possède ses propres buts et motivations. Il est primordial de bien saisir ces objectifs afin de pouvoir harmoniser nos intérêts, Évaluation des compétences techniques et les ressources disponibles chez chaque partenaire afin de maximiser les contributions efficaces. Et Identification des différentes ressources (humaines, technologiques, financières) que chaque partenaire est en mesure d'apporter.
- **Négociation et consensus** : Il arrive parfois qu'un conflit d'intérêts se manifeste, ce qui nécessite la recherche de négociations et de solutions répondant aux besoins de toutes les parties impliquées. Cette situation exige une interaction basée sur la volonté de compromis et de coopération.
- **Engagement envers les accords** : Une fois que les accords sont conclus, il est impératif que chaque partie les respecte et s'engage à les mettre en œuvre en fonction

des exigences. Il est essentiel d'assurer la transparence et la responsabilité dans la mise en œuvre de ces accords.

- **Apporter un soutien mutuel** : La coopération et le soutien mutuel sont les fondements d'une relation entre partenaires solide. Lorsqu'ils se soutiennent mutuellement, les partenaires peuvent faire face aux difficultés avec plus de rapidité et d'efficacité.

6-Activités clés (Key Activities) :

a. Quelles sont les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur ?

❖ Les actions principales que nous devons entreprendre pour livrer notre proposition de valeur sont :

- **Marketing et vente** : Cela peut nécessiter l'adoption de diverses stratégies de marketing et de vente, comme la vente directe et en ligne (e-commerce), le marketing par e-mail, la publicité de nos services en ligne via le site web ou les réseaux sociaux, ainsi que les canaux de distribution en participant à des salons et des conférences.
- **Support Technique** : Offrir un support technique de haute qualité pour l'installation, l'intégration et l'utilisation des solutions.

b. Quelles sont les opérations essentielles pour notre entreprise ?

La prestation de service :

- **Conception UX/UI** : Il est crucial de garantir que l'application médicale soit conviviale et intuitive pour les utilisateurs finaux, notamment les professionnels de la santé, en concevant l'expérience utilisateur (UX) et l'interface utilisateur (UI) de manière adéquate.
- **Développez et testez l'application** : Pour concevoir une application médicale efficace, il est essentiel d'appliquer les meilleures pratiques de développement logiciel de manière itérative. Cela implique de passer par des étapes successives de conception, développement et programmation, en utilisant diverses technologies, Framework et langages de programmation pour créer une application fonctionnelle et conviviale. Les tests sont cruciaux pour garantir le bon fonctionnement de

l'application, notamment les tests unitaires, d'intégration et d'acceptation utilisateur. Avant le déploiement, des tests approfondis de validation et de vérification doivent être réalisés pour assurer la fiabilité et la précision de l'application médicale. Il est essentiel de s'assurer que l'application répond aux exigences spécifiques et qu'elle peut être utilisée en toute sécurité par les professionnels de la santé.

- **Conformité réglementaire** : Il est essentiel de bien saisir les réglementations locales et internationales relatives aux applications médicales. Cela englobe les normes de confidentialité des données telles que le RGPD en Europe et la HIPAA aux États-Unis, parmi d'autres. Il est primordial d'obtenir les certifications requises des autorités sanitaires pour pouvoir commercialiser les solutions. Il convient également de garantir que les produits et les processus sont en conformité avec les réglementations locales et internationales, comme le GDPR et la HIPAA.
- **Assistance technique** : Offrir une assistance technique afin de résoudre efficacement les problèmes auxquels les utilisateurs sont confrontés.
- **Ressources documentaires et guides** : Mettre à disposition des manuels d'utilisation, des guides et des FAQ pour accompagner les utilisateurs dans l'optimisation des solutions proposées.
- **Marketing et commercialisation** : Cela peut nécessiter l'adoption de diverses stratégies de marketing et de vente, comme la vente directe et en ligne (e-commerce), le marketing par e-mail, la publicité de nos services en ligne via le site web ou les réseaux sociaux, ainsi que les canaux de distribution en participant à des salons et des conférences.

c. Quelles sont les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients ?

❖ Les activités qui créent le plus de valeur pour nos clients :

- **Développer une Interface Utilisateur Intuitive** : Développer une interface utilisateur intuitive et facile à utiliser, permettant aux professionnels de santé de naviguer facilement et d'obtenir des résultats rapidement.
- **Simplifier ou automatiser des processus complexes** : Notre application est automatisée car elle est créée par l'intelligence artificielle, ce qui permet aux médecins

de réduire les efforts nécessaires dans l'interprétation des images médicales et de gagner du temps.

- **Un réseau et une plateforme** : un site internet innovant, qui offrent la possibilité de mettre en relation avec nos clients et partenaires. Grâce à ces outils numériques, nous avons la capacité de créer des interactions et des échanges fructueux, permettant ainsi de renforcer nos relations commerciales et de favoriser la croissance de notre activité. Ces plateformes nous offrent également la possibilité de promouvoir nos services de manière efficace. En somme, notre réseau et notre plateforme web constitue des atouts majeurs pour notre entreprise, nous permettant de consolider notre présence sur le marché et de créer des opportunités de développement significatives.
- **Support Client et Formation** : Proposer une assistance technique accessible 24h/24 et 7j/7 afin d'aider les utilisateurs à résoudre efficacement et rapidement leurs problèmes. Fournir des guides d'utilisation complets, des FAQ et des tutoriels vidéo pour accompagner les utilisateurs dans l'utilisation des outils.
- **Collaboration avec les Professionnels de Santé** : Travailler en étroite collaboration avec les experts de la santé afin de recueillir leurs retours d'expérience et d'apporter des améliorations continues aux produits. Inclure les utilisateurs dans le processus de développement pour garantir que les solutions répondent parfaitement à leurs besoins.

7- Ressources clés (Key resources) :

a. Quels sont nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels ?

❖ Nos actifs matériels, immatériels et humains essentiels sont :

Actifs Matériels :

- **Équipements de Développement** : Ordinateurs puissants, stations de travail et équipements de test nécessaires pour le développement et la validation de nos algorithmes et le traitement d'images.
- **Bureaux et Espace de Travail** : Local pour abriter les équipes de développement, de support technique

Actifs Immatériels :

- **Outils de Développement Logiciel :** Parmi eux, on retrouve des environnements de développement intégrés (IDE), des bibliothèques de traitement d'images et des outils de gestion de versions.

Actifs Humains :

- **Expert en marketing :** Un spécialiste en marketing est à notre disposition pour élaborer une stratégie de commercialisation performante pour notre application de traitement d'images médicales. Le marketing joue un rôle essentiel dans la promotion et l'acceptation de notre solution par les acteurs de la santé et les utilisateurs finaux.
- **Techniciens de Support :** Personnes chargées de fournir un support technique et de résoudre les problèmes rencontrés par les utilisateurs.

Actifs financiers :

- **Source de financement :** Posséder un financement solide nous permettant de soutenir le développement, la recherche et la commercialisation de notre application de traitement d'images médicales. Le développement de logiciels médicaux peut nécessiter des investissements conséquents en termes de recherche, de développement, de ressources humaines, d'infrastructures technologiques.
- **Subventions et Fonds d'investissement :** Réduction des coûts de développement et accès à des ressources supplémentaires pour l'innovation tel que : l'ASF (Algerian start up fund)

b. Quels sont les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir ?

- ❖ Les outils, les technologies ou les partenariats dont nous avons besoin pour réussir sont :

Outils et technologies :

- **Outils de développement de logiciels**
- **Technologies d'IA et de ML :** Il est possible d'utiliser des Framework tels que TensorFlow, PyTorch ou Keras pour développer et entraîner des modèles de traitement d'images.

- **Bibliothèques et Framework de traitement d'images** : Il existe de nombreux bibliothèques et Framework spécialisés dans le traitement d'images qui peuvent simplifier le traitement et l'analyse des images médicales. Par exemple, TensorFlow, PyTorch et Open CV sont largement utilisés pour le développement d'applications d'apprentissage automatique et de vision par ordinateur

Partenariats :

- **Hôpitaux et cliniques** : Collaborations pour les validations cliniques, les tests sur le terrain et la collecte de données réelles.
- **Collaborations Académiques** : Travaillez en collaboration avec des universités et des institutions de recherche afin d'obtenir un accès aux dernières ressources en matière de traitement d'images médicales et d'apprentissage automatique.
- **Organismes de réglementation** : Lors de la création d'une application médicale, il est essentiel de se conformer aux réglementations et normes en matière de sécurité des données et d'approbation réglementaire. Collaborer avec des spécialistes de la réglementation médicale peut s'avérer bénéfique pour assurer la conformité de votre application.
- **Collaborations avec des Experts Médicaux** : Établissez des collaborations avec des médecins, des radiologues et des spécialistes en imagerie médicale afin de proposer des conseils et des informations précieuses sur les particularités des images médicales et les exigences cliniques.
- **Collaborations avec des Entreprises Technologiques** : Collaborez avec des sociétés expertes dans la conception de logiciels médicaux, des fournisseurs de technologies d'imagerie ou des entreprises de données afin d'enrichir nos compétences et nos ressources.

c. Quels sont les principaux avantages concurrentiels de nos ressources ?

❖ Les principaux avantages concurrentiels de nos ressources sont :

- **Informations détaillées et exploitables** : Notre application de santé est en mesure de fournir aux professionnels de la santé des informations détaillées et exploitables.

- **Base de Données d'Images Médicales** : En cas de constitution d'une base de données étendue d'images médicales annotées et variées, vous pourrez alors concevoir des modèles plus solides et plus généralisables.
- **Performance et précision** : Nos algorithmes utilisent les dernières avancées en intelligence artificielle et en apprentissage profond, offrant des niveaux de précision et de fiabilité inégalés dans notre solution
- **Expérience Utilisateur et Facilité d'Utilisation** : En cas de réussite dans la proposition d'une expérience utilisateur exceptionnelle et d'une interface conviviale

8- Charges et coûts (Coste structure) :

a. Quels sont les coûts fixes et variables associés à notre modèle économique ?

- ❖ Les coûts fixes et les coûts variables associés à notre activité. Ces coûts couvrent une variété d'aspects allant du développement technologique à la commercialisation et au support client.

Coûts Fixes :

- Équipements de Bureau et Matériel Informatique : Investissement initial dans le matériel informatique pour les développeurs et autres membres de l'équipe.
- Salaires des Employés : personnel de support technique et expert de marketing
- Avantages Sociaux : Coûts des assurances santé
- Location des Bureaux : Loyers de local où les équipes travaillent.
- Utilités et Services Publics : Électricité, internet et téléphone

Coûts variables

- **Tests et Validations Cliniques** : Coûts liés aux essais cliniques et à la validation des algorithmes, souvent variables selon la portée et la durée des essais.
- **Coûts de Cloud Computing** : Frais variables basés sur l'utilisation des services cloud pour le traitement des données et l'hébergement des applications.
- **Partenariats et Collaborations** : Coûts variables liés aux collaborations avec des universités et des établissements de santé pour des projets spécifiques.

b. Quels sont les coûts les plus importants pour notre entreprise ?

❖ Les coûts les plus importants pour notre entreprise sont :

- **Personnel de Support et Service Client** : Ils fournissent une assistance technique et répondent aux besoins des clients, garantissant ainsi une satisfaction élevée
- **Assurance Santé** : Offrir des avantages sociaux compétitifs est crucial pour attirer et retenir les talents
- **Personnel de service commerciale et marketing**
- **Hébergement et Traitement des Données** : Les coûts liés aux serveurs et aux services de cloud Computing (AWS, Google Cloud, Azure) sont élevés en raison des besoins importants en stockage et en puissance de calcul pour traiter les images médicales.
- **Ordinateurs Puissants et Stations de Travail** : Les équipements nécessaires pour le développement et les tests doivent être de haute performance, ce qui représente un investissement significatif + Équipements de Bureau et Matériel Informatique.
- **Participation à des Conférences et Salons** : Présenter les lors de conférences médicales et technologiques pour accroître la visibilité et générer des leads
- **Location des Bureaux** : Loyers des locaux où les équipes travaillent
- **Utilités et Services Publics** : internet et téléphone et Électricité

Tableau des coûts

Les coûts	Prix par mois (DA)	Prix par ans (DA)
Salaires des Employés	100,000	1,200,000
Avantages Sociaux	4,500	54,000
Hébergement d'application	5000	60,000
Location des Bureaux	30,000	360,000
Électricité	7000 / 3	280,000
Internet	2000	24,000

Téléphone	10.000	120.000
Équipements de Bureau et Matériel Informatique	340,000	340,000
Participation à des Conférences et Salons ou sponsor	500,000	500,000
Total	2,686,000	

c. Comment pouvons-nous réduire les coûts ou améliorer l'efficacité de nos opérations ?

- ❖ Pour réduire les coûts tout en améliorant l'efficacité opérationnelle est crucial pour maintenir la compétitivité et la rentabilité. Voici quelques stratégies qui peuvent être mises en place pour atteindre ces objectifs :
- **Adopter des Outils Open Source** : Utiliser des Framework et bibliothèques open source pour le développement de nos algorithmes et solutions logicielles peut réduire les coûts liés aux licences logicielles.
- **Collaborations Académiques** : S'associer avec des universités pour codévelopper des technologies et partager les coûts de recherche.
- **Évaluation des Performances** : Mener des évaluations régulières des performances pour identifier les employés clés et optimiser l'allocation des ressources humaines.
- **Équipes Multidisciplinaires** : Former des équipes multidisciplinaires pour maximiser l'efficacité et réduire les besoins en personnel supplémentaire.
- **Travail à Distance** : Encourager le télétravail pour réduire les coûts liés aux infrastructures de bureau et les avantages physiques.

9- Revenus (Revenue) :

a. Quels produits ou services nos clients sont-ils prêts à payer ?

- ❖ Nos clients sont prêts à payer pour les services suivants :
- **Support Technique 24/7** : Un support technique disponible 24 heures sur 24, 7 jours sur 7, pour résoudre rapidement les problèmes et assurer une continuité de service.

- **Modèles d'Abonnement** : Des modèles de tarification basés sur l'abonnement, permettant aux clients de payer un montant fixe mensuel ou annuel pour accéder aux logiciels et services.

b. Quels sont les différents moyens par lesquels nous pouvons générer des revenus ?

- ❖ Les différentes façons de générer des revenus :
 - **Abonnements Mensuels/Annuels** : Proposer des licences de logiciels sous forme d'abonnements mensuels ou annuels
 - **Licences Perpétuelles**
 - Paiement Unique : Vendre des licences perpétuelles pour un paiement unique, avec des frais supplémentaires pour les mises à jour et le support technique.
 - **Support Technique**
 - Interventions à la Demande : Facturer les interventions techniques à la demande pour des services spécifiques ou des résolutions de problèmes complexes.

c. Quel est notre modèle de tarification ?

Tarification Basique :

- Abonnement Annuel
- Paiement directement

Tableau des revenus

Modèle de tarification	La quantité	Nombre de fois par mois	Prix (DA)	Total par mois (DA)	Bénéfice pendant 1 ans (DA)
Abonnement Annuel	1	3	600,000	1,800,000	18,914,000
Paiement directement	1	3	1,500,000	4,500,000	15,314,000

Business Model Canevas: BMC

Partenaires clés

Hôpitaux universitaires
Développeurs des logiciels
Organismes de réglementation

Activités clés

Conception et le développement et le test d'application

Cherche des partenaires
Conformité réglementaire
Support d'assistance et amélioration technique
Marketing et commercialisation

Ressources clés

Espace de travail
Équipement de développement
Expert de marketing et de commercialisation

Proposition de valeur

Facilité d'utilisation
Segmentation des disques intervertébraux et autres structures
La précision et la rapidité
Utilisation de l'intelligence artificielle
Offre de partage en ligne

Relation clients

Sensibilisation et formation des clients (vidéos tutoriels)

Le contact direct et la négociation avec le client

Prestation professionnelle en collaboration avec des organisations liées au marché du domaine de la santé (les cliniques - les cabinets médicaux).

Accompagnement continu

La publicité vise nos clients potentiels

Sponsor

Canaux de distribution

Emailing

Organisation des événements

Étudiants en médecine

Salon et les conférences

E-paiement

Segment client

Les radiologues

Les centres d'imagerie médicale et les associations de radiologie (les hôpitaux, les cliniques, les cabinets)

Coûts par mois (DA)

Salaires des Employés pour chacun (assistant technique, Expert de marketing et de commercialisation)	50,000
Avantages Sociaux	4,500
Hébergement d'application	60,000
Location des Bureaux	30,000
Électricité	7,000
Internet	2,000
Téléphone	10,000
Équipements de Bureau et Matériel Informatique (Ordinateurs Puissants et Stations de Travail)	340,000
Sponsoriser ou Participation à des Conférences et Salons	500,000
Total des cout par ans	2,686,000

Revenus

Modèle de tarification	Quantité par mois	Prix (DA)	Bénéfice pendant 1 ans (DA)
Abonnement Annuel	3	600,000	18,914,000
Accompagnement et actualisation		300,000	
Paiement directement (accompagnement et actualisation gratuit)	3	1,500,000	15,314,000



Attestation

BOUAZZA HADJAR

A suivi avec assiduité la formation « **développement des compétences entrepreneuriales dans le cadre de l'arrêté ministériel 1275 (label)** » organisée par Le centre I2E de l'université de Tlemcen le **21 AVRIL 2024**.

Directeur d'incubateur





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان
حاضنة الاعمال الجامعية



رقم الحاضنة / FT_022 / 2024

شهادة توظيف / تحضين " مشروع مبتكر ضمن قرار 1275 "

أنا الممضي اسفله، السيد(ة): سليمان سفيان
مسير (ة) حاضنة الأعمال: جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان
المقر الاجتماعي / العنوان: 22، شارع أبي عياد عبد الكريم، نهج باستور، ص.ب. 119، تلمسان
رقم علامة الحاضنة: 0809213030
تاريخ تسليم العلامة: 09/09/2021
أشهد أن الطالب /الطالبة التالية أسمائهم:

الاسم واللقب	تاريخ ومكان الأزداد	رقم تسجيل الطالب	الطور الدرامي	التخصص	الكلية
بوعزة هاجر	2001/12/06 عين تموشنت	191937000377	ماستر 2	هندسة بيوطبية	التكنولوجيا

حت اشراف الأستاذ /الاساتذة التالية اسمائهم

الاسم واللقب	الرتبة	التخصص	الكلية
بوكلي حسن اسماعيل	بروفيسور	هندسة بيوطبية	التكنولوجيا

تم احتضانه على مستوى حاضنة الاعمال لجامعة. أبو بكر بلقايد تلمسان بمشروع تحت اسم : HARB_MED
خلال السنة الجامعية 2024/2023.
سلمت هذه الشهادة بطلب من المعني(ة) للإدلاء بها في حدود ما يسمح به القانون.

حرر في تلمسان بتاريخ 27 ماي 2024

مدير الحاضنة
رئيس مصلحة
الحاضنة
تلمسان
سليمان سفيان

Références bibliographiques

- [1] "Quelques éléments d'information destinés aux professionnels de santé concernant le patient adulte atteint de Lomalgie commune". Assurance Maladie .PP.9. (2017)
https://www.has-sante.fr/portail/jcms/c_1700724/fr/label-de-la-has-surveillance-medico-professionnelle-du-risque-lombaire-pour-les-travailleusexposes-a-des-manipulations-de-charges (date de consultation 23/03/2024)
- [2] Pr. Z. BOUKERMA, Dr. H. HAMADOUCHE., Dr. Z. HAMITI , "Epidémiologie des lombalgies en milieu de travail», Journal de la médecine du travail; nouvelle série, n °1 – juin 1998 .PP.12 . (2019)
- [3] Richard A. Deyo, M.D., M.P.H., and Sohail K. Mirza, M.D., M.P.H, " *Herniated Lumbar Intervertebral Disk*", N Engl J Med , vol.374,No.18,pp.1763-72 , (2017)
DOI: 10.1056/NEJMcp1512658
- [4] Schwarzer AC, A. C. ,The prevalence and clinical features of internal disc disruption in patients with chronic low back pain . *Spine (Phila Pa. 1995;20(17):1878–1883.*
- [5] Eeric Truumees MD, (2015). " *A History of Lumbar Disc Herniation From Hippocrates to the 1990s*", Clin Orthop Relat Res, VOL. 473,PP.1885–1895 , (1976)
DOI: 10.1007/s11999-014-3633-7
- [6] D. Scott Kreiner, MDa,* , Steven W. Hwang, MDb, John E. Easa, MDc, Daniel K. Resnick, MDd, Jamie L. Baisden, MDe, Shay Bess, MDf, Charles H. Cho, MD, MBAg, Michael J. DePalma, MDh, Paul Dougherty, II, DCi, Robert Fernand, MDj, Gary Ghiselli, MDk, Amgad S. Hanna, MDl, Tim Lamer, MDm, Anthony J. Lisi, DCn, Daniel J. Mazanec, MDo, Richard J. Meagher, MDp, Robert C. Nucci, MDq, Rakesh D. Patel, MDr, Jonathan N. Sembrano, MDs, Anil K. Sharma, MDt, Jeffrey T. Summers, MDu, Christopher K. Taleghani, MDv, William L. Tontz, Jr., MDw, John F. Toton, MDx, " *An evidence-based clinical guideline for the diagnosis and treatment of lumbar disc herniation with radiculopathy*", The Spine Journal ,VOL.14, pp.180–191 , (2014).
<http://dx.doi.org/10.1016/j.spinee.2013.08.003> (date de consultation 27\01\2024).
- [7] O. R. Fjeld, L. Grøvle, J. Helgeland, M. C. Småstuen, T. K. Solberg, J-A. Zwart, M. Grotle , " *Complications, reoperations, readmissions, and length of hospital stay in 34 639 surgical cases of lumbar disc herniation*", Bone Joint J; vol.101,pp.470–477 ,(2019)
DOI:10.1302/0301-620X
- [8] Rao, D., Scuderi, G., Scuderi, C., Grewal, R., & Sandhu, S.. " *The use of imaging in management of patients with low back pain*" . *J. Clin. Imaging Sci.*, 8, 30, (2018).

- [9] Prof Christopher J L Murray, " *Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990–2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019*". Lancet , vol.396,pp.1204–22 , (2020) DOI: 10.1016/S0140-6736(20)30925-9 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140673620309259> (date de consultation 23/03/2024)
- [10] Yu L-P, Qian W-W, Yin G-Y, Ren Y-X, Hu Z-Y (2012) "*MRI Assessment of Lumbar Intervertebral Disc Degeneration with Lumbar Degenerative Disease Using the Pfirrmann Grading Systems*". PLoS ONE, vol.7, No.12 , pp. e48074. DOI:10.1371/journal.pone.0048074
- [11] Mohamed-Amine Chetoui, "*Modélisation du comportement biomécanique du disque intervertébral*". thèse de doctorat Génie mécanique. Ecole Centrale Marseille, École nationale d'Ingénieurs de Monastir (Tunisie) , (2017)
- [12] Rannou, F. M.-B," *Anatomy, biology, physiology, and biomechanics of intervertebral disk and other anatomical structures of the lumbar spine*". 1 :487–507 ,(2004).
- [13] Nassim GUERROUMI," *Segmentation automatique par apprentissage profond de la colonne vertébrale scoliotique à partir d'images de résonance magnétique* ", Mémoire de master, école de technologie supérieur université de Québec (2019)
- [14] Pr Lioté et Maillot, " *Sémiologie rhumatologique et orthopédique du rachis*", Cours n°6, UE 11 - Appareil locomoteur ,pp. 14 , (5 Février 2020)
- [15] P. Chenaie , Y. Wang , F. Jeanguyot ,"*Les pathologies de la colonne vertébrale*", Propriété de Bauerfeind ,vol.9,pp. 59258-95957 ,(2019)
- [16] R. J. Moore," *The vertebral end-plate: what do we know?*", Eur Spine J ,vol.9 ,pp. 92–96, (2000) DOI: 10.1007/s005860050217 <http://link.springer.com/10.1007/s005860050217> (date de consultation 30\01\2024).
- [17] K.A. Tomaszewski, K. Saganiak, T. Gładysz1, J.A. Walocha , "*The biology behind the human intervertebral disc and its endplates*", Folia Morphol. Vol. 74, No. 2, pp. 157–168 , (2015) .DOI: 10.5603/FM.2015.0026
- [18] John S. Gero and Fay Sudweeks" *Artificial Intelligence in Design '96*", Kluwer Academic Publishers Softcover reprint of the hardcover 1 st edition, in Press , (1996) DOI: 10.1007/ 978-94-009-0279-4
- [19] Fackson Mwale Æ James C. Iatridis Æ John Antoniou," *Quantitative MRI as a diagnostic tool of intervertebral disc matrix composition and integrity*", Eur Spine J ,vol.17 ,pp. S432–S440 , (2008) DOI :10.1007/s00586-008-0744-4

- [20] Harry G," *The Installation Restoration Program Toxicology Guide*", DOE Interagency Agreement , vol.5, (1990) DOI: 10.1007/s005860050217 <http://link.springer.com/10.1007/s005860050217> (date de consultation 12\02\2024).
- [21] Thomas Figard,"*prise en charge pluridisciplinaire d'une hernie discale L4-L5 gauche operer* " ,institut Lorraine de formation en masso-kinistherapie de NANCY (France) ,(2010)
- [22] Dr. Dominique Paquette," *L'hernie discale*" ,fiche clinique, JVECC 2007,vol.17,NO. 1,pp. 72-76 ,(2007)
- [23] Leone A, G. G.-P. "*Lumbar intervertebral instabi-lity*" . *l.Radiology* , 245:62–77, (2007)
- [24]Dr. Mansour "La hernie discale", languedocia, pp.3
- [25] Dr Jean Lambert," *La hernie discale*" ,<http://www.orthopedie-et-readaptation.com/rachis.htm> (date de consultation 27\01\2024).
- [26] Mirza Pojskic , Erica Bisson , Joachim Oertel , Toshihiro Takami , Corinna Zygourakis , Francesco Costa," *Lumbar disc herniation: Epidemiology, clinical and radiologic diagnosis WFNS spine committee recommendations*", Elsevier,(2024) , DOI: 10.1016/j.wnsx.2024.100279 <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2590139724000103>
- [27] MALKI Ahlem " *sciatique par hernie discale lombaire : de la physiopathologie aux traitements* " Thèse de DOCTEUR EN PHARMACIE. Université d’Aix-Marseille – Faculté de Pharmacie , (2020).
- [28] Nassim GUERROUMI , " *Segmentation automatique par apprentissage profond de la colonne vertébrale scoliotique à partir d’images de résonance magnétique* ",Mémoire de master, école technologie supérieur de Québec,(2019).
- [29] xavier banse ,ludovic kaminski ,frédéric lecouvet ," *Hernie discale thoracique*".Conference paper In Orthopédie pratique - Le bon diagnostic pour le bon traitement - Pathologies rachidiennes, UCLouvain, Bruxelles ,(2022)
- [30] Ashia C. Wilson, Rebecca Roelofs, Mitchell Stern, Nathan Srebro, and Benjamin Recht," *The Marginal Value of Adaptive Gradient Methods in Machine Learning*", (2018) ,DOI:1705.08292v2
- [31] David Stelzeneder , Goetz Hannes Welsch , Balázs Krisztián Kovács , Sabine Goed , Tatjana Paternostro-Sluga , Marianna Vlychou , Klaus Friedrich , Tallal Charles Mamisch , Siegfried Trattng," *Quantitative T2 evaluation at 3.0 T compared to morphological*

grading of the lumbar intervertebral", European Journal of Radiology, vol. 81,pp. 324–330 ,(2012) DOI: 10.1016/j.ejrad.2010.12.093

[32] Jo Jordan, Kika Konstantinou, and John O'Dowd," *Herniated lumbar disc*", Clinical Evidence,vol.06,pp.11-18 ,(2010) DOI: 10.1111/j.1526-4637.2010.00908.x

[33] Kaplan A, Haenlein M. Siri, Siri,"*in my hand: Who's the fairest in the land? On the interpretations, illustrations, and implications of artificial intelligence*". Bus Horiz vol.62,pp.15–25. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.08.004>, (2019) (date de consultation 05/01/2024)

[34] Shiqiang Wu, Xiaoming Bai, Liquan Cai, Liangming Wang, XiaoLu Zhang, Qingfeng Ke, Jianlong Huang,"

Bone tumor examination based on FCNN-4s and CRF fine segmentation fusion algorithm", Elsevier ,(2023) <https://doi.org/10.1016/j.jbo.2023.100502> (date de consultation 05/01/2024)

[35] Mohammad Hesam Hesamian · Wenjing Jia · Xiangjian He · Paul Kennedy," *Deep Learning Techniques for Medical Image Segmentation: Achievements and Challenges*", Digital Imaging ,vol. 32,pp.582–596 ,(2019) <https://doi.org/10.1007/s10278-019-00227-x> (date de consultation 06/01/2024)

[36] Haissam Haidar Ahmad, Mohamed Alamin Hamid Salih, Alison Luangrath, Théo Sede, Lucas Zugaj, "*Intelligence artificielle et imagerie médicale*".Memoire de master. Université de Technologie de Compiègne ,Technologies Biomédicales et Territoire de Santé ,(2022) DOI : 10.34746/kbkc-cd39 <https://travaux.master.utc.fr/formations-master/ingenierie-de-la-sante/ids122/> (date de consultation 07/01/2024)

[37] SmartSoft Ltd., Gen.Kolev ," *Automatic Segmentation of Lumbar Spine MRI Using Ensemble of 2D Algorithms*",CSI, LNCS vol.11397, pp. 154–162 ,(2019) https://doi.org/10.1007/978-3-030-13736-6_13 (date de consultation 10/01/2024)

[38] Dr. B. H. Barhate, "*Emerging Trends in Computer and Information Technology*" , Special Issue on 7th National Conference ,vol.7,No.1 ,(2021)

[39] C.J.M. Jongeneelen," *Biomechanics in the intervertebral disc*", these de doctorat , Eindhoven University of Technology Department of Biomedical Engineering ,(2006) .

[40] dou yazid , chaab zakaria nouh," *Détection du Covid-19 à l'aide d'approches basées sur l'apprentissage en profondeur*", mémoire de master , Université AMO de Bouira Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées Département d'Informatique ,(2022)

- [41] Yoshua Bengio†, Aaron Courville, and Pascal Vincent, " *Representation Learning: A Review and New Perspectives*", (2014) DOI:1206.5538v3
- [42] Yann Lecun, Yoshua Bengio, Geoffrey Hinton. " *Deep learning*". Nature, HAL pp.436-444 , (2015) <https://hal.science/hal-04206682> (date de consultation 05/03/2024)
- [43] Jürgen Schmidhuber . " *Deep Learning in Neural Networks*", Neural Network, vol.61 pp.85-117 , (2015) DOI 10.1016/j.neunet.2014.09.003
- [44] Dan Cire , san Ueli Meier J` urgen Schmidhuber, " *Multi-column Deep Neural Networks for Image Classification*" , Dalle Molle Institute for Artificial Intelligence ,(2012)
- [45] Junyan Hu , Hanlin Niu , Joaquin Carrasco , Barry Lennox , Senior Member, IEEE, and Farshad Arvin, " *Voronoi-Based Multi-Robot Autonomous Exploration in Unknown Environments via Deep Reinforcement Learning* ", IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY, VOL. 69, NO. 12,pp. 14413-14423,(2020) DOI: 10.1109/TVT.2020.3034800
- [46] Alex Krizhevsky , Ilya Sutskever , Geoffrey E. Hinton, " *ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks*", ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks,vol.60, NO.6,pp.84-90 ,(2024) DOI: 10.1145/3065386
- [47]"*Modèles du neurone biologique*", https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Modèles_du_neurone_biologique&oldid=2067973 (date de consultation 07/03/2024)
- [48] Moi Hoon Yap , Member, IEEE, Gerard Pons, Joan Martí ´, Sergi Ganau, Melcior Senti ´s, Reyer Zwigelaar, Adrian K. Davison, Member, IEEE, and Robert Martí," *Automated Breast Ultrasound Lesions Detection Using Convolutional Neural Networks*", IEEE JOURNAL OF BIOMEDICAL AND HEALTH INFORMATICS, VOL. 22, NO. 4,pp. 1218-1226 ,(2018) DOI: 10.1109/JBHI.2017.2731873
- [49] Ryad Zemouri, Christine Devalland, Séverine Valmary-Degano, Noureddine Zerhouni, " *Intelligence artificielle : quel avenir en anatomie pathologique ?*". Annales de Pathologie, vol.39 , No.2, pp.119-129. (2019) DOI: 10.1016/j.annpat.2019.01.004
- [50] ARASAD SABRINA , LAOUDJ SABRINA , " *Détection de lésions cutanées sur des images macroscopiques en utilisant l'apprentissage profond*" ,Mémoire de Master , université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou Faculté de de Génie Electrique et d'informatique département d'informatique ,(2020)

- [51] Lopez-Bernal, D. Balderas, D. Ponce, P. Molina, A." *Education 4.0: Teaching the Basics of KNN, LDA and Simple Perceptron Algorithms for Binary Classification Problems*". Future Internet, vol.13,No. 193. ,(2021) <https://doi.org/10.3390/fi13080193> (date de consultation 08/03/2024)
- [52] BOUDALI Abdellah BENCHAIIB Aymen Abdelfattah," *Détection précoce de la maladie d'Alzheimer sur les images IRM*» , Mémoire de Master , université ibn Khaldoun -Tiaret ,Faculté des Mathématiques et de l'informatique département d'informatique ,(2022)
- [53] Tom Brosch¹, Youngjin Yoo¹, Lisa Y.W. Tang, David K.B. Li, Anthony Traboulsee, and Roger Tam," *Deep Convolutional Encoder Networks for Multiple Sclerosis Lesion Segmentation*", researchgate ,(2015) , DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_1 <https://www.researchgate.net/publication/283327375> (date de consultation 08/03/2024)
- [54] Sahli Aoulia,"*Segmentation des images médicales par apprentissage profond*" , Mémoire de Master , Université Larbi Tebessi Faculté des sciences exactes et sciences de la nature et de la vie Département de Mathématiques et Informatique ,(2021)
- [55] Bibby, S. R. (2001). The pathophysiology of the intervertebral disc. *Joint Bone Spine*. 68 :537–542
- [56] CHERGUI Yakout , BOUSSAHA Chaimaa," *Détection des anomalies par segmentation des images médicales cérébrales*" , Mémoire de Master , université ibn Khaldoun -Tiaret ,Faculté des Mathématiques et de l'informatique département d'informatique ,(2022)
- [57] HAMLAOUI Mohammed Yazid," *Classification du COVID'19 en utilisant CNN dans les images X-ray*", Mémoire de Master , Université de 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Mathématiques, d'Informatique et des Sciences de la matière Département d'Informatique ,(2021)
- [58] Haouaia Amina & Adnane Nour El Houda Ahlem," *Approche de reconstruction d'images IRM parallèle* ", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen Faculté de Technologie , Département Génie Biomédicale (2023)
- [59] BELHADJER Hakim, SAROUER Brahim," *Classification des images avec les réseaux de neurones Convolutionnels*", Mémoire de Master, Université Mouloud

MAMMERY de Tizi-Ouzou Faculté de Génie Electrique et d'Informatique Département d'informatique , (2018)

[60] Mohamed Elssaleh Bachiri," *Application de deep learning dans les images médicales*", thèse de Doctorat , Université M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES , Faculté de Technologie ,(2023)

[61] Ashia C. Wilson, Rebecca Roelofs, Mitchell Stern, Nathan Srebro, and Benjamin Recht," *The Marginal Value of Adaptive Gradient Methods in Machine Learning*",31st Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2017), Long Beach, CA, USA . ,(2018) <http://arxiv.org/abs/1705.08292> (date de consultation 24/04/2024)

[62] Saad Hikmat Haji, Adnan Mohsin Abdulazeez,"*Comparison Of Optimization Techniques Based On Gradient Descent Algorithm*" , Palarch's Journal Of Archaeology Of Egypt/Egyptology ,vol.18,No.4,pp. 2715-2743 .(2021)

[63] Hind Amara," *Développement d'un système d'aide au diagnostic pour la détection et classification du cancer du poumon*", Mémoire de Master, Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen Faculté de TECHNOLOGIE , Département Génie Biomédicale ,(2023)

[64] Kim T, Kim Y-G, Park S, Lee J-K, Lee C-H, Hyun S-J, et al, "*Diagnostic triage in patients with central lumbar spinal stenosis using a deep learning system of radiographs*". J Neurosurg Spine,vol.37,pp.104–11 .(2022) <https://doi.org/10.3171/2021.11.SPINE211136>. (date de consultation 24/04/2024)

[65] Mbarki W, Bouchouicha M, Frizzi S, Tshibusu F, Ben Farhat L, Sayadi M," *A novel method based on deep learning for herniated lumbar disc segmentation*". 4th Int. Conf. Adv. Syst. Emergent Technol. ICASET, Hammamet, Tunisia: IEEE,pp. 394–9. (2020) https://doi.org/10.1109/IC_ASET49463.2020.9318261 (date de consultation 24/04/2024)

[66] Abhinav Shukla a , Saurabh Bhardwaj b , Mandeep Singhc," *Segmentation for Lumbar Spinal Stenosis Using Convolutional Neural Networks*",Procedia Computer Science ,vol.218 ,pp. 2210–2223 ,(2023) ,DOI: 10.1016/j.procs.2023.01.197 <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0> (date de consultation 24/04/2024)

[67] Rizwan Qureshi , MOHAMMED GAMAL RAGAB , SAID JADID ABDULKADER , amgad muneer , ALAWI ALQUSHAIB , EBRAHIM HAMID SUMIEA , and Hitham Alhussian," *A Comprehensive Systematic Review of YOLO for Medical Object Detection (2018 to 2023)*"IEEE ACCESS,vol.11 ,pp.32 ,(2023)

- [68] D. Silver, A. H. "Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search". Nature, Vol. 529,pp.484–489. (2016).
- [69] Tang H, Pei X, Huang S, Li X, Liu C." *Automatic Lumbar Spinal CT Image Segmentation With a Dual Densely Connected U-Net*". IEEE Access, vol.8,pp.89228–38 .(2020) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993867>. (date de consultation 24/04/2024)
- [70] Zoulikha BERRAHOU." *Segmentation des polypes colorectaux par les réseaux de neurones entièrement convolutifs*".Mémoire de Master. Université Aboubakr Belkaïd Tlemcen Faculté de TECHNOLOGIE , Département Génie Biomédicale ,(2022)
- [71] FOUZIA ALTAF1, SYED M. S. ISLAM2,3, NAVEED AKHTAR3 AND NAEEM KHALID JANJUA4." *Going Deep in Medical Image Analysis: Concepts, Methods, Challenges and Future Directions*". IEEE Access ,vol.4,pp.34 .(2019) DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2929365
- [72] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox." *U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation*".Computer Science Department and BIOS Centre for Biological Signalling Studies, University of Freiburg, Germany . .(2015) DOI: 505.04597v1
- [73] Wang X, Jing S, Dai H, Shi A." *High-resolution remote sensing images semantic segmentation using improved UNet and SegNet*". Comput Electr Eng, vol.108,pp.108-734. .(2023) <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2023.108734>. (date de consultation 30/04/2024)
- [74] Tom Brosch, Youngjin Yoo, Lisa Y.W. Tang, David K.B. Li, Anthony Traboulsee, and Roger Tam." *Deep Convolutional Encoder Networks for Multiple Sclerosis Lesion Segmentation*" . researchgate. .(2015) DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_1 <https://www.researchgate.net/publication/283327375> . (date de consultation 30/04/2024)
- [75] Vijay Badrinarayanan, Alex Kendall, Roberto Cipolla, Senior Member. " *SegNet: A Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Image Segmentation*".IEEE,pp.14 (2016).
- [76] Rao, D., Scuderi, G., Scuderi, C., Grewal, R., & Sandhu, S." *The use of imaging in management of patients with low back pain* ". J. Clin. Imaging Sci., 8, 30. (2018).
- [77] Karen Simonyan* & Andrew Zisserman." *VERY DEEP CONVOLUTIONAL NETWORKS FOR LARGE-SCALE IMAGE RECOGNITION*".conference paper at ICLR . (2015) DOI: 1409.1556v6

- [78] Goutam B, Hashmi MF, Geem ZW, Bokde ND, "A Comprehensive Review of Deep Learning Strategies in Retinal Disease Diagnosis Using Fundus Images". IEEE Access, vol.10 , pp.57796–823. (2022) <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3178372>.(date de consultation 30/04/2024)
- [79] Tom Schaul, Ioannis Antonoglou, David Silver, "Unit Tests for Stochastic Optimization" .(2014). <http://arxiv.org/abs/1312.6055> (date de consultation 30/04/2024)
- [80] Haifeng Jin Fran , cois Chollet ,Qingquan Song ,Xia Hu 3., "AutoKeras: An AutoML Library for Deep Learning".Machine Learning Research , vol. 24,pp. 1-6 .(2023) <http://jmlr.org/papers/v24/20-1355.html>. (date de consultation 30/04/2024)
- [81]Sudirman, Sud ; Al Kafri, Ala ; Natalia, Friska ; Meidia, Hira; Afrilliana, Nunik ; Al-Rashdan, Wasfi ; Bachtawi, Mohammad ; Al-Jumaily, Mohammed, « Données de vérité d'image d'étiquette pour l'ensemble de données IRM de la colonne lombaire », Mendeley Data, v2, (2019) <http://dx.doi.org/10.17632/zbf6b4pttk.2> (date de consultation 30/04/2024)
- [82] DELUZARCHEFUTURA-SCIENCES. .(14 OCTOBRE 2023).<HTTPS://WWW.FUTURA-SCIENCES.COM/TECH/DEFINITIONS/INTELLIGENCE-ARTIFICIELLE-DEEP-LEARNING-17262/> (DATE DE CONSULTATION 25/03/2024)
- [83] https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_de_neurones_artificiels .(date de consultation 25/03/2024)
- [84] Saily Shah.(15 Mar, 2022) , <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2022/01/convolutional-neural-network-an-overview/> .(date de consultation 25/03/2024)
- [85] Pascal Monasse , Kimia Nadjahi (08/07/2022) . [openclassrooms .https://openclassrooms.com/fr/courses/4470531-classez-et-segmentez-des-donnees-visuelles/5083336-decouvrez-les-differentes-couches-dun-cnn](https://openclassrooms.com/fr/courses/4470531-classez-et-segmentez-des-donnees-visuelles/5083336-decouvrez-les-differentes-couches-dun-cnn) .(date de consultation 27/03/2024)
- [86] poojahajan. (2 jul 2020), *medium*. [Online] <https://poojahajan5131.medium.com/max-pooling-210fc94c4f11> , (date de consultation 27/03/2024)
- [87] TOM KELDENICH.(14 FÉVRIER 2021). <https://inside-machinelearning.com/cnn-couche-de-convolution/#boxzilla-12065> .(date de consultation 27/03/2024)

- [88] <https://www.mathworks.com/solutions/image-video-processing/semantic-segmentation.html> .(date de consultation 27/03/2024)
- [89] <https://techterms.com/definition/python> .(date de consultation 02/04/2024)
- [90] <https://www.journaldunet.fr/web-tech/dictionnaire-du-webmastering/1445304-python-definition-et-utilisation-de-ce-langage-informatique/> .(date de consultation 02/04/2024)
- [91] <https://datascientest.com/spyder-tout-savoir> .(date de consultation 03/04/2024)
- [92] <https://keras.io/about/> .(date de consultation 03/04/2024)
- [93] <https://www.techtarget.com/searchdatamanagement/definition/TensorFlow> .(date de consultation 03/04/2024)
- [94] <https://numpy.org/doc/stable/user/whatisnumpy.html> .(date de consultation 03/04/2024)
- [95] <https://matplotlib.org> . (date de consultation 04/04/2024)
- [96] <https://www.geeksforgeeks.org/how-to-use-google-colab/> .(date de consultation 04/04/2024)