

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة عمار تليجي بالاغواط

UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET INFORMATIQUE

**Mémoire de MASTER**

**Domaine :** Mathématiques et Informatique

**Filière :** Informatique

**Option :** Systèmes d'information et de décision(SID)

**Par :**

**Nariman TAHRI**

**THEME**

**Prédire l'insuffisance cardiaque à l'aide de l'apprentissage profond**

**Encadré par :** Dr. Narjes HAMINI

**Année Universitaire : 2023/2024**

## ***Remerciements***

Je tiens à remercier en premier lieu **DIEU** le tout puissant qui m'a donné le courage et la patience et qui a éclairé mon chemin pour achever ce travail

Plus particulièrement je remercie **Dr Narjes HAMINI** pour la confiance et le soutien qu'elle m'avait accordé tout le long de ce travail, pour son encadrement continu, ses remarques constructives, ses orientations, et ses conseils

## *Dédicaces*

**Je dédie ce mémoire à**

**Mes très chers parents**

Vous représentez pour moi la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez pour tous les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance.

**Mes très chers sœurs et frères**

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

## ملخص

تعد أمراض القلب من أكثر الأمراض شيوعا في العالم، وهي من بين الاسباب الرئيسية لارتفاع عدد الوفيات خاصة مرضى قصور القلب، لذلك أصبح من الضروري استخدام ادوات اكثر تطورا من اجل الكشف عن هذه الامراض وتصنيفها لتقليل مخاطر الإصابة بها. فالتنبؤ بأمراض القلب يساعدنا في تفادي المضاعفات الصحية للمرضى المصابين وتقليص مدة علاجهم، ويساعدنا ايضا في انقاص نسبة الوفاة التي هي في تزايد مستمر خاصة في السنوات الاخيرة، ونظرا للتطور الذي يشهده العالم في مجال الصحة والتكنولوجيا. أصبحت هناك حاجة ماسة الى استعمال اداة من ادوات الذكاء الاصطناعي والمتمثلة في التعلم العميق الذي يوفر نماذج ممتازة في مجال التنبؤ.

الهدف من هذا المشروع، هو تطوير نظام ذكي من اجل التنبؤ بمرض قصور القلب باستخدام التعلم العميق الذي يقدم لنا نموذج ذكي وفعال في تحليل البيانات والتنبؤ. من بين النماذج التي قمنا باستخدامها نموذج RNN (LSTM) الذي قام بتحليل مجموعة من البيانات الكبيرة التي تحتوي على 5000 سجل مريض. حيث استخدمناه في التنبؤ باحتمالية الاصابة بمرض قصور القلب اولا وتحصلنا على نتائج جد ممتازة . وايضا قمنا بانجاز تطبيق طبي سهل ومرن من حيث الاستعمال من اجل التنبؤ بمرض قصور القلب.

**الكلمات المفتاحية:** التعلم العميق ، الذكاء الاصطناعي ، قصور القلب ، نموذج ، البيانات، تحليل ، التنبؤ ، مرض، تطبيق

# Abstract

Heart diseases are among the most common diseases worldwide and are among the leading causes of high deaths, especially among patients with heart failure. It has therefore become necessary to use more advanced tools to detect and classify them in order to reduce the risk of contracting these diseases.

Predicting heart disease helps us avoid health complications in infected patients and reduce the duration of their treatment. This also helps us reduce the mortality rate, which is constantly increasing, especially in recent years, and taking into account the developments that the world is witnessing in the field of health and technology. It has become urgent to use an artificial intelligence tool, namely deep learning, which provides excellent models in the field of prediction.

The aim of this project is to develop an intelligent system for predicting heart failure using deep learning, which provides us with an intelligent and efficient model for data analysis and prediction. Among the models we used was an RNN(LSTM) model that analyzed Dataset containing 5000 patient records. We used it to predict the likelihood of developing heart failure first and got great results. We also developed an easy-to-use and flexible medical application to predict heart failure.

**Keywords:** deep learning, artificial intelligence, heart failure, model, data, analysis, prediction, disease, application

# Résumé

Les maladies cardiaques font partie des maladies les plus courantes dans le monde et comptent parmi les principales causes du nombre élevé de décès, en particulier chez les patients souffrant d'insuffisance cardiaque. Il est donc devenu nécessaire d'utiliser des outils plus avancés pour les détecter et les classer afin de réduire le risque de les contracter. Prédire les maladies cardiaques nous aide à éviter les complications de santé des patients infectés et à réduire la durée de leur traitement. Cela nous aide également à réduire le taux de mortalité, qui est en constante augmentation, surtout ces dernières années, et compte tenu de l'évolution à laquelle le monde est témoin dans le domaine de la santé et de la technologie. Il est devenu urgent d'utiliser un outil d'intelligence artificielle, à savoir le deep learning, qui fournit d'excellents modèles dans le domaine de la prédiction.

L'objectif de ce projet est de développer un système intelligent pour prédire l'insuffisance cardiaque à l'aide de l'apprentissage profond, qui nous fournit un modèle intelligent et efficace pour analyser les données médicales et prédire la maladie.

Parmi les modèles que nous avons utilisés figurait un modèle RNN(LSTM) qui analysait un Dataset contenant 5000 dossiers de patients. Nous l'avons utilisé pour prédire la probabilité de développer une insuffisance cardiaque en premier et nous avons obtenu d'excellents résultats. Nous avons également créé une application médicale simple et flexible à utiliser afin de prédire l'insuffisance cardiaque. Les outils utilisés dans cette étude sont Python et Google Colab. De plus, des bibliothèques Python ont été utilisées (TensorFlow, NumPy, Pandas, scikit learn).

**Mots-clés :** deep learning, intelligence artificielle, insuffisance cardiaque, modèle, données, analyse, prédiction, maladie, application.

## Table des matières

|  |    |
|--|----|
| Chapitre 1 : Introduction générale.....    | 14 |
| Contexte.....                              | 14 |
| Problématique.....                         | 14 |
| Objectifs .....                            | 14 |
| La structure du mémoire.....               | 14 |
| Chapitre 2: Les maladies cardiaques .....  | 16 |
| 2.1 Introduction .....                     | 17 |
| 2.2 Définition du cœur.....                | 17 |
| 2.3 Anatomie du cœur .....                 | 17 |
| 2.4.1 Circulation pulmonaire.....          | 18 |
| 2.4.2 Circulation systémique .....         | 18 |
| 2.5 Fonctionnement du cœur .....           | 19 |
| 2.6 Rythme cardiaque.....                  | 19 |
| 2.7 Circulation du sang dans le cœur ..... | 20 |
| 2.8 Réseau coronaire artériel .....        | 21 |
| 2.9 Les maladies du cœur .....             | 22 |
| 2.9.1 Insuffisance cardiaque.....          | 22 |
| 2.9.2 Arythmies cardiaques .....           | 23 |
| 2.9.3 L'arrêt cardiaque.....               | 24 |
| 2.9.4 L'infarctus du myocarde .....        | 24 |
| 2.9.5 Maladies vasculaires .....           | 25 |
| 2.10 Les causes de L'IC .....              | 25 |
| 2.11 Les facteurs de risque de L'IC .....  | 25 |
| 2.12 Les symptômes de L'IC .....           | 26 |

|  |  |    |
|--|--|----|
| 2.13   | Le diagnostic de L'IC.....   | 26 |
| 2.13.1   | Mesure des NT-proBNP.....  | 27 |
| 2.13.2   | Électrocardiogramme (ECG).....   | 27 |
| 2.13.3   | Échocardiogramme.....  | 27 |
| 2.13.4   | Épreuve d'effort .....   | 28 |
| 2.13.5   | Imagerie par résonance magnétique (IRM) cardiaque .....                              | 29 |
| 2.14   | Conclusion .....   | 30 |
| Chapitre 3: Apprentissage profond et apprentissage automatique ..... |  | 31 |
| 3.1  | Introduction .....   | 32 |
| 3.2  | L'Intelligence artificielle.....   | 32 |
| 3.3  | Santé & intelligence artificielle .....  | 32 |
| 3.4  | L'apprentissage automatique.....   | 34 |
| 3.4.1  | Définition de l'apprentissage automatique.....                                       | 34 |
| 3.4.2  | Types d'apprentissage automatique .....  | 34 |
| 3.4.3  | Algorithmes d'apprentissage automatique .....  | 35 |
| 3.4.4  | Domaines d'utilisation de l'apprentissage automatique .....                          | 38 |
| 3.5  | L'apprentissage profond.....   | 38 |
| 3.5.1  | Définition de l'apprentissage profond.....   | 38 |
| 3.5.2  | Fonctionnement de l'apprentissage profond .....                                      | 39 |
| 3.5.3  | Algorithmes d'apprentissage profond .....  | 40 |
| 3.5.4  | Applications de l'apprentissage profond.....   | 45 |
| 3.5.5  | Le futur de l'apprentissage profond .....  | 46 |
| 3.6  | Comparaisons clés entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond ..... | 46 |
| 3.7  | Conclusion.....  | 47 |
| Chapitre 4: Travaux anterieur.....                                   |  | 48 |

|   |  |    |
|---|--|----|
| 4.1   | Introduction .....   | 49 |
| 4.2   | Article1:.....   | 49 |
| 4.3   | Article2:.....   | 49 |
| 4.4   | Article3:.....   | 49 |
| 4.5   | Analyse les articles .....   | 50 |
| Chapitre 5: Etude comparative .....   |  | 52 |
| 5.1   | Introduction .....   | 53 |
| 5.2   | Problématique.....   | 53 |
| 5.3   | Architecture du système .....  | 53 |
| 5.4   | Dataset utilisée .....   | 54 |
| 5.5   | Prétraitement des données .....  | 55 |
| 5.5.1   | Normalisation .....  | 55 |
| 5.6   | Algorithmes de prediction .....  | 56 |
| 5.7   | Métriques de performance.....  | 59 |
| 5.7.1   | Matrice de confusion .....   | 59 |
| 5.7.2   | Précision .....  | 60 |
| 5.8   | Étapes de la formation du modèle RNN(LSTM) .....                         | 60 |
| 5.9   | Expériences et résultats obtenus.....                                    | 62 |
| 5.9.1   | Réseaux neuronaux récurrents RNN avec (LSTM) .....                       | 62 |
| 5.9.2   | Réseau neuronal convolutif unidimensionnel (1D CNN) .....                | 66 |
| 5.9.3   | Réseau Perceptron multicouche (MLP) .....                                | 67 |
| 5.9.4   | Comparaison entre le modèle RNN(LSTM) et les modèles 1D CNN et MLP ..... | 69 |
| Chapitre 6: Développement d'une application de prédiction de l'insuffisance cardiaque ..... |  | 71 |
| 6.2   | Objectif de l'Application .....  | 72 |
| 6.3   | Diagramme de séquence.....   | 72 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 6.3.1 | Processus de Prédiction avec le Modèle RNN ..... | 72 |
| 6.4   | Outils utilisés.....                             | 73 |
| 6.5   | Présentation de l'application .....              | 74 |
| 6.6   | Conclusion.....                                  | 77 |
|       | Conclusion générale .....                        | 78 |
|       | Bibliographie .....                              | 79 |

## Table des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 1: Anatomie du cœur [3] .....                        | 18 |
| Figure 2: Rythme cardiaque [6].....                         | 20 |
| Figure 3: Circulation du sang dans le cœur [7].....         | 21 |
| Figure 4: Réseau coronaire artériel [8].....                | 22 |
| Figure 5: Insuffisance cardiaque [10].....                  | 23 |
| Figure 6 : Arythmie cardiaque [12].....                     | 23 |
| Figure 7: L'arrêt cardiaque [14].....                       | 24 |
| Figure 8: L'infarctus du myocarde [16].....                 | 25 |
| Figure 9: Électrocardiogramme (ECG) [22].....               | 27 |
| Figure 10: Échocardiogramme [24].....                       | 28 |
| Figure 11: Épreuve d'effort sur vélo ergométrique [26]..... | 29 |
| Figure 12: IRM [28].....                                    | 30 |
| Figure 13: Régression linéaire [44].....                    | 35 |
| Figure 14: Modèle logit [44].....                           | 36 |
| Figure 15: Arbre de décision [30] .....                     | 36 |
| Figure 16: Machine à vecteurs de support [44].....          | 37 |
| Figure 17: Naïve bayésienne [44].....                       | 38 |
| Figure 18: Réseaux neuronaux profonds [31] .....            | 40 |
| Figure 19: CNN .....  | 41 |
| Figure 20: RNN .....  | 41 |
| Figure 21: RBFN.....  | 42 |
| Figure 22: LSTM.....  | 43 |
| Figure 23: GAN .....  | 43 |
| Figure 24: RBM.....   | 44 |
| Figure 25: Auto-encodeur .....                              | 44 |
| Figure 26: MLP .....  | 45 |

|   |    |
|---|----|
| <i>Figure 27: Architecture du système de prédiction des maladies cardiaques</i> .....         | 54 |
| <i>Figure 28: La formule de Normalisation des données [56]</i> .....                          | 55 |
| <i>Figure 29: Matrice de confusion [58]</i> .....   | 59 |
| <i>Figure 30: La formule d'Accuracy [58]</i> .....  | 60 |
| <i>Figure 31: Code de collecte de data</i> .....  | 60 |
| <i>Figure 32: Code de prétraitement des données</i> .....                                     | 60 |
| <i>Figure 33: Code de division des données</i> .....  | 61 |
| <i>Figure 34: Code de création du modèle LSTM</i> .....                                       | 61 |
| <i>Figure 35 : Code de compilation du modèle</i> .....  | 61 |
| <i>Figure 36: Code de l'entraînement du modèle</i> .....                                      | 61 |
| <i>Figure 37: Code de l'évaluation du modèle</i> .....  | 62 |
| <i>Figure 38: Accuracy du RNN</i> .....   | 62 |
| <i>Figure 39: La précision du modèle obtenue par RNN(LSTM)</i> .....                          | 63 |
| <i>Figure 40: La perte du modèle obtenue par RNN(LSTM)</i> .....                              | 64 |
| <i>Figure 41: Matrice de confusion</i> .....  | 65 |
| <i>Figure 42: Accuracy et Loss</i> .....  | 66 |
| <i>Figure 43: Résultat du Modèle 1D CNN</i> .....   | 67 |
| <i>Figure 44: Accuracy du MLP</i> .....   | 67 |
| <i>Figure 45: Accuracy et Loss</i> .....  | 68 |
| <i>Figure 46: Résultat du Modèle MLP</i> .....  | 68 |
| <i>Figure 47: Résultat obtenu selon l'accuracy</i> .....                                      | 69 |
| <b>Figure 48: Diagramme de séquence du système</b> .....                                      | 73 |
| <i>Figure 49: Page de prédiction de L'IC</i> .....  | 75 |
| <i>Figure 50: Page de prédiction cas "Il ne souffrira pas d'insuffisance cardiaque"</i> ..... | 76 |
| <i>Figure 51: Page de prédiction cas" Il souffrira d'insuffisance cardiaque"</i> .....        | 77 |

## Liste des tableaux

|   |    |
|---|----|
| <b>Table 1:</b> Comparaison entre ML et DL.....                                   | 46 |
| <b>Table 2:</b> Avantages et Inconvénients des Méthodes de Détection de L'IC..... | 50 |
| <b>Table 3:</b> Description des attributs de base des données utilisée.....       | 54 |
| <b>Table 4:</b> Structure.....  | 57 |
| <b>Table 5:</b> Approche.....   | 57 |
| <b>Table 6:</b> Avantages et Inconvénients.....                                   | 58 |

## **Liste des abréviations**

**IC** : Insuffisance cardiaque

**IRM** : Imagerie par résonance magnétique (IRM) cardiaque

**IA** : Intelligence artificielle.

**ECG** : Électrocardiogramme

**CNN** : Convolutional neural network.

**RBM** : Machines de Boltzmann restreintes

**RNN** : Réseaux neuronaux récurrents

**RBFN** : Réseaux de fonction de base radiale

**GAN** : Réseaux adversariaux génératifs

**LSTM** : Long Short-Term Memory

**NT et BNP** : Peptides natriurétiques

# Chapitre 1 : Introduction générale

## Contexte

Les maladies cardiaques sont l'une des maladies les plus courantes et affectent la santé humaine dans le monde, en particulier l'insuffisance cardiaque, car elles provoquent un grand nombre de décès chaque année. L'insuffisance cardiaque occupe une place particulière en raison de son impact important sur la qualité de vie et de l'urgence. Nécessité d'un diagnostic précoce afin de le traiter ou de réduire son risque.

En raison du taux de mortalité annuel élevé qui coïncide avec les développements dans les domaines médical et technologique, il est devenu urgent d'utiliser un outil d'intelligence artificielle représenté par l'apprentissage profond, qui fournit d'excellents modèles dans le domaine de la prédiction.

Modèle de réseaux neuronaux récurrents RNN avec (LSTM) qui analyse les données et les prédictions avec une grande précision. Ce modèle est efficace dans le traitement et l'analyse des données temporelles et sérielles.

Nous avons également complété une application médicale, car cette application que nous avons complétée nous a montré d'excellents résultats lors de tests visant à prédire l'insuffisance cardiaque.

## Problématique

Depuis l'Antiquité, l'insuffisance cardiaque est une des principales causes de décès dans le monde. Avec l'augmentation récente de son incidence, il est devenu crucial de développer des méthodes plus avancées pour la prédiction et le diagnostic précoce. L'apprentissage profond, notamment les RNN avec LSTM, offre un potentiel important pour l'analyse des données médicales temporelles et la prédiction des maladies cardiaques. Ce chapitre vise à développer un modèle basé sur RNN (LSTM) et à le comparer avec des modèles 1D CNN et MLP pour évaluer leur précision dans la prédiction de l'insuffisance cardiaque.

## Objectifs

L'objectif de ce projet est de développer un système intelligent pour prédire l'insuffisance cardiaque à l'aide de l'apprentissage profond, qui nous fournit un modèle intelligent et efficace pour analyser les données médicales et prédire la maladie.

## La structure du mémoire

### 1. Le premier chapitre:

Nous avons essayé de présenter le membre le plus important du corps humain, qui est le cœur, ses composants, son rôle, sa fonction et les concepts qui y sont liés. Ensuite, nous avons abordé des maladies qui pourraient affecter le cœur, dont la plus importante est l'insuffisance cardiaque, car nous avons abordé ses causes, ses facteurs de risque, ses symptômes et comment le diagnostiquer.

## **2. Le deuxième chapitre:**

Nous avons présenté des concepts et des définitions sur l'intelligence artificielle et ses branches, que sont l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond. Nous avons abordé les types et les structures de chaque type et avons également comparé ces branches.

## **3. Le troisième chapitre:**

Nous avons présenté quelques travaux appliquant l'apprentissage profond pour prédire l'insuffisance cardiaque à l'aide de différents modèles d'apprentissage profond.

## **4. Le quatrième chapitre :**

Nous avons créé un modèle intelligent grâce à l'apprentissage profond à l'aide de RNN (LSTM) afin d'analyser les données et de prédire l'insuffisance cardiaque, et nous l'avons également comparé avec les modèles 1D CNN et MLP en termes de précision, où la précision du premier modèle était excellente par rapport à d'autres modèles.

## **5. Le cinquième chapitre :**

Nous avons décrit le fonctionnement de notre application de prédiction de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un diagramme de séquence. De plus, nous l'avons décrite et illustrée en présentant des captures d'écran.

# **Chapitre 2: Les maladies cardiaques**

## **2.1 Introduction**

Les maladies cardiaques représentent une série de troubles affectant le cœur et les vaisseaux sanguins, constituant l'une des principales causes de décès dans le monde. Elle englobe une variété de conditions allant des maladies coronariennes aux cardiopathies congénitales, affectant la qualité de vie de millions de personnes. Comprendre ces maladies est essentiel pour développer des stratégies de traitement et de prévention efficaces [1].

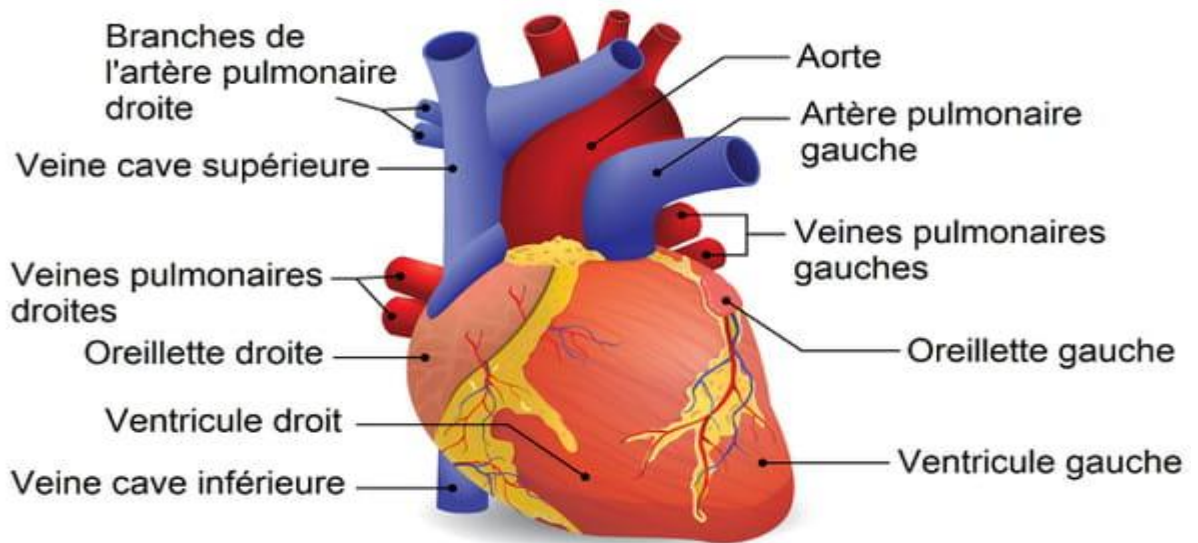
Ce premier chapitre se veut introductif et vise à donner une idée générale sur le cœur et ses maladies, en présentant notamment l'insuffisance cardiaque en détail et en mentionnant ses causes, ses facteurs de risque, ses symptômes et son diagnostic.

## **2.2 Définition du cœur**

Un organe important, le cœur, est situé dans la poitrine et bien entouré par les poumons. Il est situé en diagonale et sa partie supérieure est située légèrement à droite, donc environ les 3/2 de sa masse se trouvent sur le côté gauche du corps. Le cœur est un muscle creux qui pèse environ 300 grammes chez l'adulte. L'épicarde (enveloppe externe) et l'endocarde (enveloppe interne) sont 2 membranes minces qui la protègent [2].

## **2.3 Anatomie du cœur**

Le cœur est situé dans la cage thoracique centrale gauche. Il se compose de différentes parties qui jouent un rôle dans la circulation sanguine: 2 oreillettes et 2 ventricules droit et gauche, valves qui permettent la circulation entre les oreillettes et les ventricules. Le myocarde est constitué de 3 couches: l'endocarde, la partie la plus interne, le myocarde, contractile et péricarde, qui constituent l'enveloppe du cœur. Le cœur est alimenté par des artères coronaires et complexes. L'aorte et l'artère pulmonaire se connectent au cœur ainsi qu'aux veines pulmonaires et à la veine cave inférieure, comme le montre la figure 1 [3].



**Figure 1:** Anatomie du cœur [3]

## 2.4 Rôle du cœur

Le cœur, grâce à son rôle de double pompe d'aspiration et de refoulement, assure la circulation sanguine dans l'organisme pour apporter de l'oxygène et des nutriments aux tissus.

Il existe 2 types de circulation: la circulation pulmonaire et la circulation systémique.

### 2.4.1 Circulation pulmonaire

La circulation pulmonaire, ou microcirculation, a pour fonction de transporter le sang vers les poumons pour assurer l'échange gazeux et le renvoyer vers le cœur. Le côté droit du cœur constitue une pompe de circulation pulmonaire.

Le sang appauvri en oxygène et riche en CO<sub>2</sub> arrive du corps dans l'oreillette droite par la veine cave inférieure et supérieure. Le sang coule vers le ventricule droit, qui le draine dans 2 artères pulmonaires (troncs pulmonaires).

L'artère pulmonaire transporte ensuite le sang vers les poumons, où il élimine le CO<sub>2</sub> et absorbe l'oxygène. L'oxygène est ensuite redirigé à travers les veines pulmonaires vers le cœur dans l'oreillette gauche.

### 2.4.2 Circulation systémique

La circulation systémique assure la distribution générale du sang vers les tissus de tout le corps et son retour vers le cœur. Ici, c'est le cœur gauche qui agit comme une pompe.

Le sang réoxygéné arrive à l'oreillette gauche, puis traverse le ventricule gauche et le draine en se contractant dans l'artère aortique. De là, le sang est distribué à divers organes et tissus du corps. Il est ensuite renvoyé au cœur droit par un réseau veineux [4].

## 2.5 Fonctionnement du cœur

Le cœur agit comme une pompe, qui peut propulser le sang dans tout le corps et suit une voie très spécifique. Le myocarde, plus précisément les cellules musculaires, par des changements de potentiel, sont contractiles grâce à leur excitabilité nerveuse.

Pour cela, le cœur dispose d'un véritable "circuit électrique" - du nœud sinusal situé dans le coin supérieur gauche de l'oreillette droite au nœud auriculo-ventriculaire situé entre l'oreillette et le ventricule. Ensuite, le courant emprunte 2 faisceaux différents qui permettent la contraction des ventricules.

Au repos, les cardiomyocytes sont polarisés à  $-90$  Mv (millivolts), phénomène associé à un déséquilibre de la distribution des ions  $K^+$  (potassium) et  $Na^+$  (sodium).

Lorsque le potentiel membranaire monte à  $-50$  mV, les cellules cardiaques provoquent un phénomène appelé "potentiel d'action", c'est-à-dire qu'elles provoquent la contraction des cardiomyocytes avec deux phases différentes. :

- Phase de dépolarisation (diminution de la charge négative), entraînant une contraction des cellules cardiaques
- Puis phase de repolarisation. En fin de repolarisation, le potentiel membranaire est rétabli et la cellule est stationnaire [5].

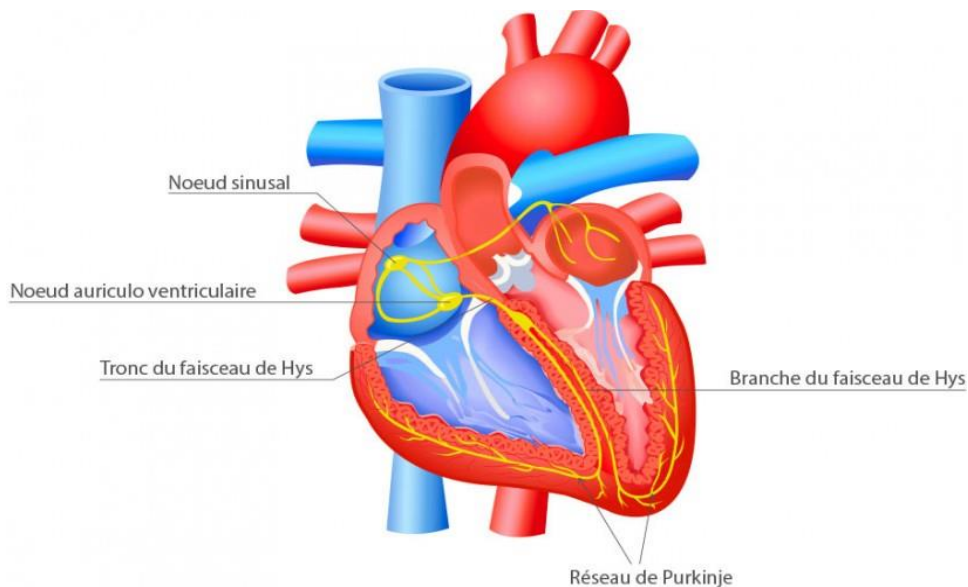
## 2.6 Rythme cardiaque

Le rythme cardiaque dépend de 2 composants :

1. Cycle cardio ou parties mécaniques pouvant être simplifiées en 3 étapes :
  - La phase diastolique, dite diastolique, permet de remplir la cavité cardiaque de sang.
  - La systolique, appelée systolique, se caractérise par une augmentation de la pression de la cavité.
  - Le stade de l'écoulement du sang dans le système circulatoire.
2. Composants électriques qui sont directement responsables de l'étape mécanique. Le myocarde est doté d'automatisation: il possède des fibres musculaires spécialisées dans la production d'une activité électrique répétitive spontanée. Ces fibres constituent ce qu'on appelle nodulaire tissue. Il se compose du premier groupe de cellules dans la paroi de l'oreillette droite près de la jonction de la veine cave supérieure - le nœud sino-auriculaire. Il a la propriété de produire rythmiquement des impulsions électriques qui se propagent aux deux oreillettes et provoquent leurs contractions. Les signaux électriques sont ensuite transmis aux nœuds auriculo-ventriculaires et relayés

vers les ventricules grâce au faisceau His et au réseau de Purkinje. La contraction ventriculaire survient 1 seconde après quelques millisecondes de contraction de l'oreillette, en tenant compte du temps de propagation de l'influx nerveux. D'autre part, il existe une systole auriculaire droite et gauche approximativement simultanée (suivie d'une diastole) et une systole ventriculaire droite et gauche simultanée (suivie d'une diastole).

- La fréquence cardiaque au repos est en moyenne de 60 à 80 battements par minute [6]



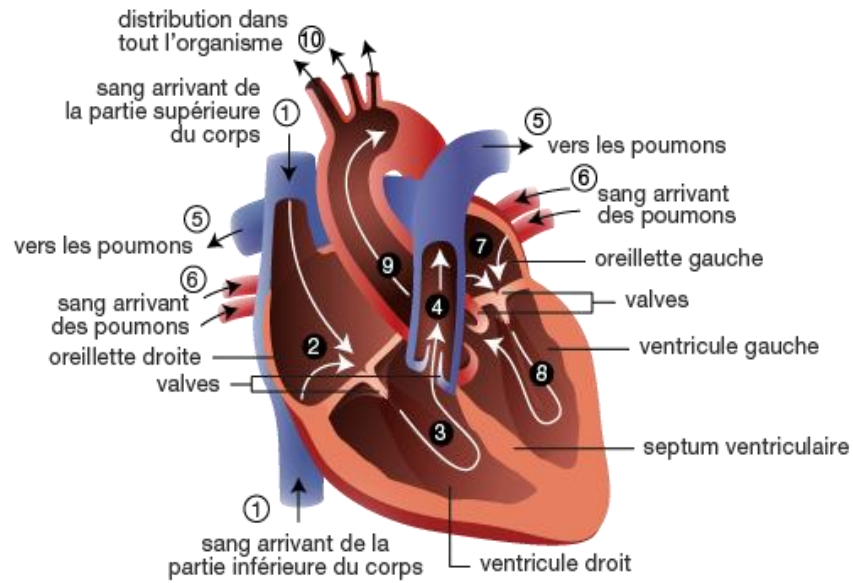
**Figure 2:** Rythme cardiaque [6]

## 2.7 Circulation du sang dans le cœur

Le sang désoxygéné, provenant de toutes les parties du corps (1), pénètre dans l'oreillette droite (2), provoquant la contraction du sang et son écoulement dans le ventricule droit (3). La vanne entre ces 2 compartiments se ferme. Le ventricule droit se contracte et propulse le sang dans le tronc pulmonaire (4). La valve à la base du tronc pulmonaire se ferme. Le sang est envoyé aux poumons (5), où il devient riche en oxygène.

Le sang oxygéné arrivant des poumons (6) est collecté par l'oreillette gauche (7), qui se contracte et se draine dans le ventricule gauche (8). La vanne entre ces deux compartiments se ferme. Le ventricule gauche se contracte et propulse le sang dans l'aorte (9). La valve au début de l'aorte se ferme. Le sang est distribué dans tout le corps (10).

Les artères coronaires alimentées par l'aorte assurent l'apport de sang oxygéné au cœur lui-même. Et les contractions cardiaques se produisent en parallèle dans les parties gauche et droite du cœur, voir Figure 3 [7].

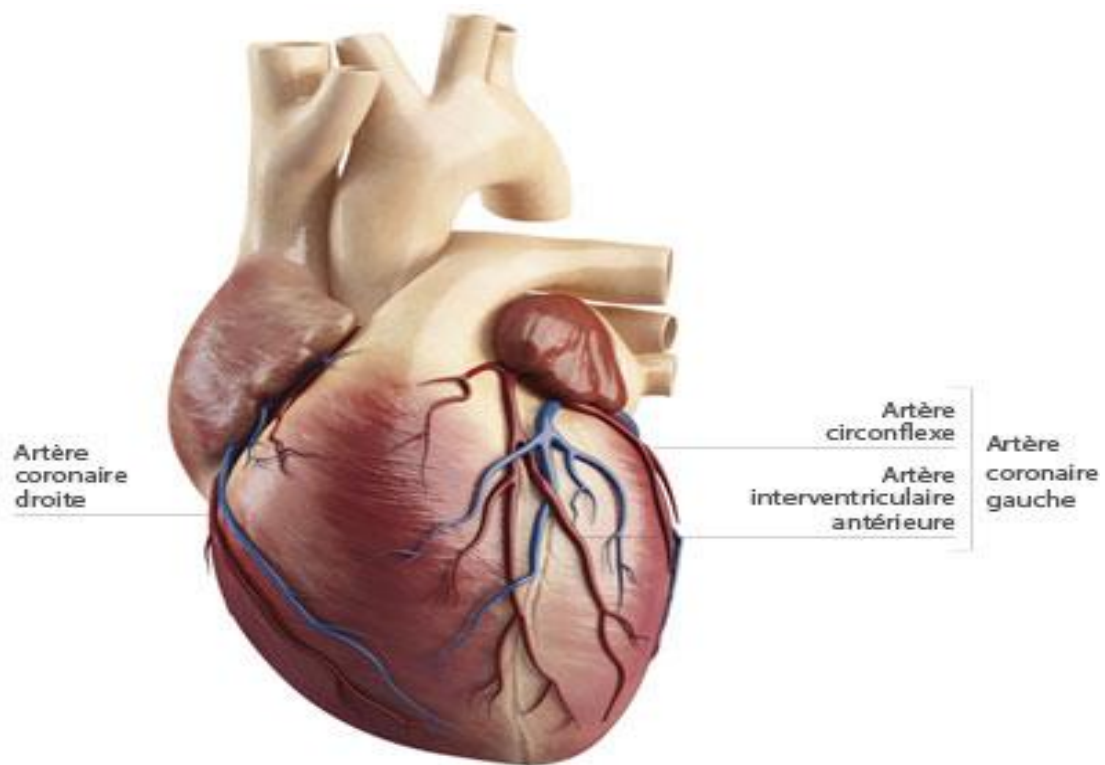


**Figure 3:** Circulation du sang dans le cœur [7]

## 2.8 Réseau coronaire artériel

Comme tout autre organe, le cœur a sa propre angiogenèse. Le réseau artériel, qui amène le sang oxygéné au muscle cardiaque, est constitué de deux artères coronaires qui prennent naissance dans l'aorte au niveau des sinus de Valsalva et se déplacent vers la pointe du cœur. :

1. L'artère coronaire gauche est divisée en deux branches: l'artère ventriculaire antérieure et l'artère contournée. Il irrigue le cœur gauche.
2. Artère coronaire droite alimentant le cœur droit [8]



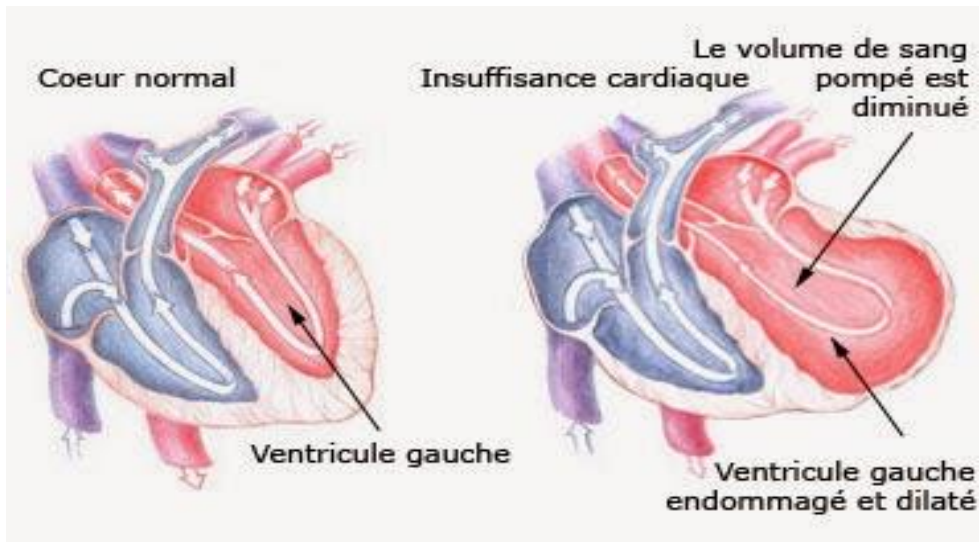
**Figure 4:** Réseau coronaire artériel [8]

## 2.9 Les maladies du cœur

Diverses pathologies peuvent affecter le cœur, les principales sont:

### 2.9.1 Insuffisance cardiaque

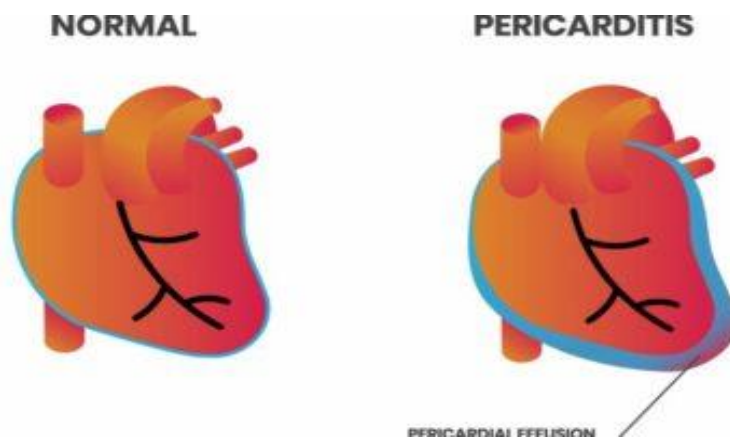
L'insuffisance cardiaque signifie que le cœur ne sera plus en mesure de pomper suffisamment de sang dans la circulation. Cela affecte la capacité physique et l'organisme dans son ensemble. Un traitement approprié et un mode de vie sain peuvent ralentir la progression de la maladie, soulager les symptômes, prévenir les urgences et améliorer la qualité de vie [9]



**Figure 5:** Insuffisance cardiaque [10]

## 2.9.2 Arythmies cardiaques

L'arythmie cardiaque est un problème dû au fonctionnement anormal de l'électricité du cœur. Le cœur bat habituellement entre 50 et 80 battements par minute au repos. Les arythmies peuvent ralentir le rythme cardiaque (bradycardie, c'est-à-dire moins de 50 battements par minute), les accélérer (tachycardie, c'est-à-dire plus de 100 battements par minute) ou provoquer des rythmes irréguliers (fibrillation auriculaire, extrasystole) [11].



**Figure 6 :** Arythmie cardiaque [12]

### 2.9.3 L'arrêt cardiaque

L'arrêt cardiaque est défini par l'arrêt de l'activité mécanique du cœur, ce qui entraîne l'arrêt de la circulation sanguine et l'interruption de l'apport de sang (et donc d'oxygène) aux organes vitaux. En l'absence de contrôle, l'arrêt cardiaque entraîne un taux de mortalité de 90% si les mesures d'urgence ne sont pas prises rapidement [13].

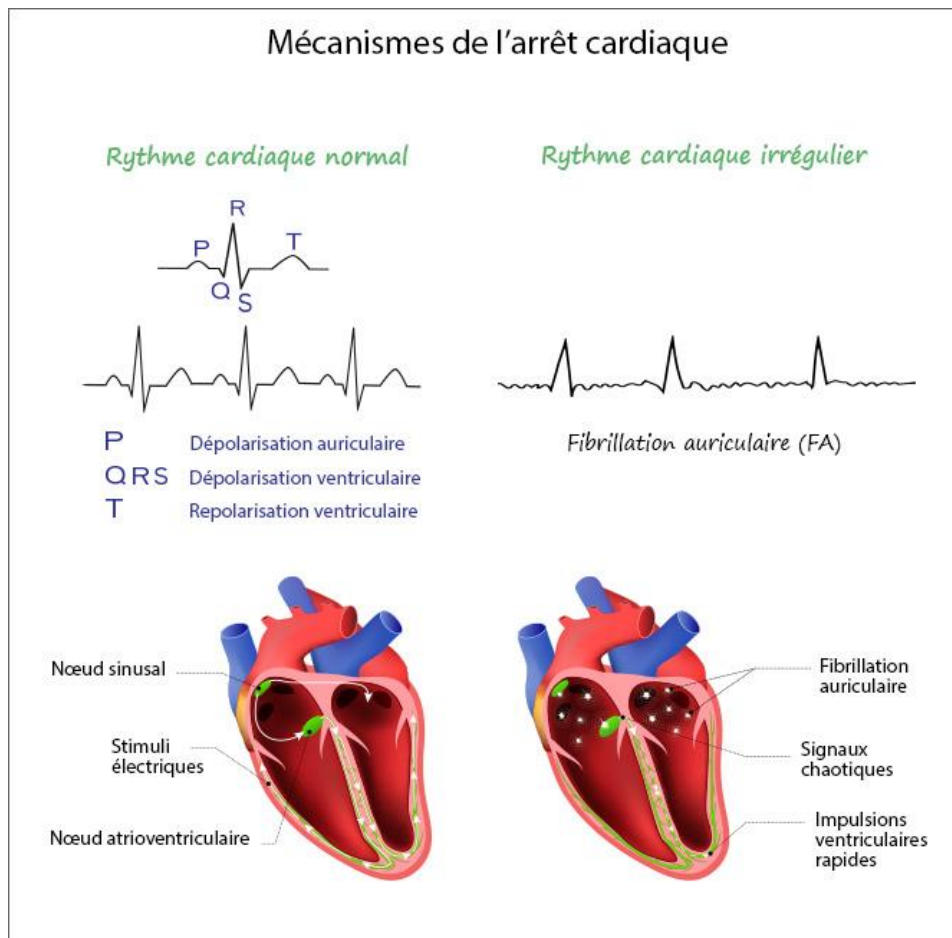
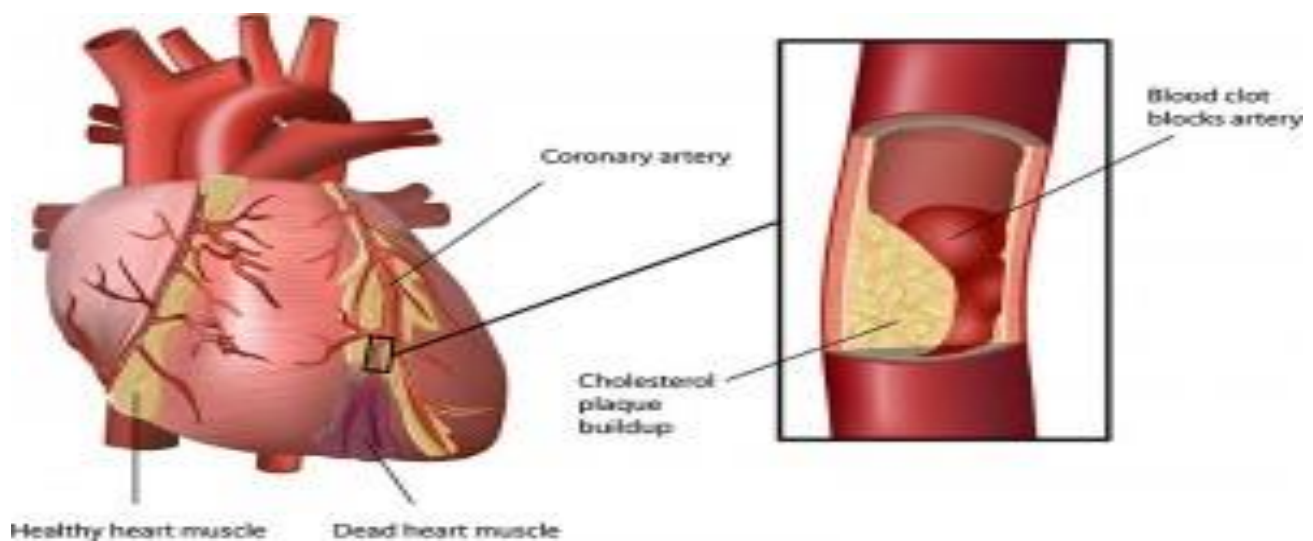


Figure 7: L'arrêt cardiaque [14]

### 2.9.4 L'infarctus du myocarde

Infarctus du myocarde (ou crise cardiaque) Cela correspond à la nécrose d'une partie du muscle cardiaque due au blocage d'une artère qui alimente le cœur. Notez que l'inconfort cardiaque est la manifestation des symptômes d'une crise cardiaque [15].



**Figure 8:** L'infarctus du myocarde [16]

### 2.9.5 Maladies vasculaires

Les maladies cardiovasculaires peuvent être une maladie ou une blessure qui affecte le cœur, les vaisseaux sanguins qui alimentent le cœur ou le réseau de vaisseaux sanguins (artères et veines) dans tout le corps et dans le cerveau [17].

### 2.10 Les causes de L'IC

En général, l'insuffisance cardiaque se développe lentement après une lésion cardiaque. Il n'y a pas de cause unique, et la cause peut être inconnue.

Les causes les plus courantes d'insuffisance cardiaque sont :

- Antécédents de crise cardiaque (infarctus du myocarde)
- Coronaropathie
- Hypertension artérielle
- Maladie des valves cardiaques (valvulopathie)
- Infection cardiaque (myocardite)
- Maladie cardiaque congénitale
- Inflammation de l'enveloppe interne du cœur (endocardite)
- Diabète (carence ou défaut d'utilisation de l'insuline) [18]

### 2.11 Les facteurs de risque de L'IC

Facteurs de risque pour le développement d'une insuffisance cardiaque.

- Diminution de la fonction ventriculaire gauche;
- affection coronarienne;
- hypertension artérielle;
- hypertrophie ventriculaire gauche;
- diabète;
- obésité;
- dyslipidémie;
- tabagisme;
- manque d'activité physique;
- microalbuminurie;
- antécédents familiaux de cardiomyopathie;
- insuffisance rénale [19]

## **2.12 Les symptômes de L'IC**

Certains de ces symptômes peuvent survenir lorsque le pompage cardiaque tourne mal et qu'une congestion se produit :

- Augmentation de l'essoufflement, particulièrement répandu
- Sensation continue de gonflement ou de remplissage
- Symptômes de toux et de rhume qui durent plus d'une semaine
- Fatigue, perte d'énergie et épuisement extrême
- Perte ou fluctuation de l'appétit
- Gonflement accru des chevilles, des pieds, des jambes, du sacrum (base de la colonne vertébrale) ou de l'abdomen (autour de l'estomac);
- Besoin d'uriner plus souvent la nuit
- Extrémités froides
- Nouvelles expériences de troubles cognitifs (confusion et difficulté à penser clairement) [19].

## **2.13 Le diagnostic de L'IC**

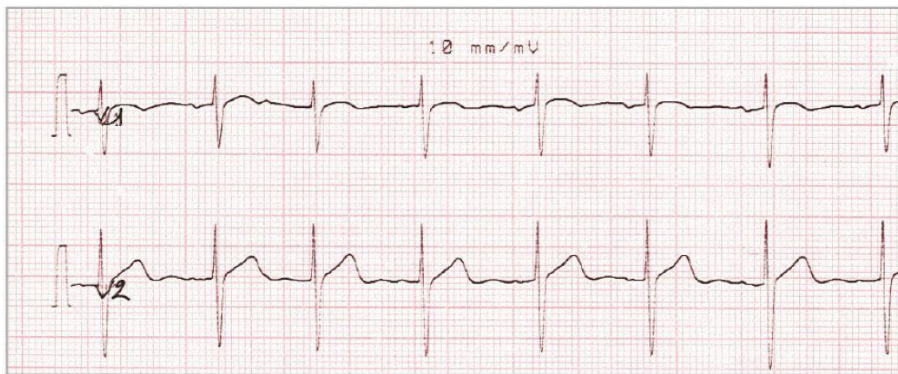
Le médecin peut utiliser plusieurs tests, tels que [19]:

### 2.13.1 Mesure des NT-proBNP

NT-proBNP et BNP sont des peptides natriurétiques qui sont utilisés comme biomarqueurs pour le diagnostic de l'insuffisance cardiaque(IC) et sont principalement utilisés pour traiter les maladies cardiaques [20].

### 2.13.2 Électrocardiogramme (ECG)

Un électrocardiogramme est un test qui montre et enregistre l'activité électrique du cœur à un moment précis. Il vérifie à quelle vitesse le cœur bat (fréquence cardiaque), si le cœur bat normalement (fréquence cardiaque) et l'efficacité du muscle cardiaque. L'électrocardiogramme est également appelé ECG [21].

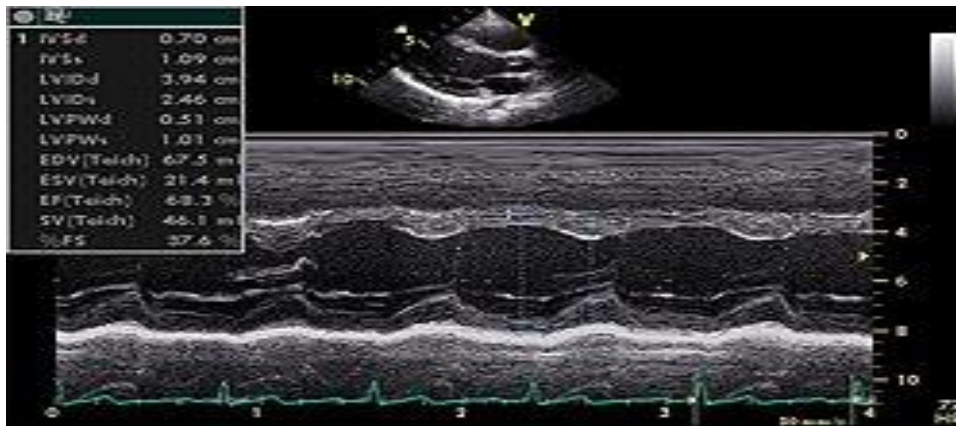


**Figure 9:** Électrocardiogramme (ECG) [22]

### 2.13.3 Échocardiogramme

L'échocardiographie est une technique d'imagerie médicale basée sur l'utilisation des ultrasons, qui permet de visualiser l'intérieur du corps. L'examen échographique du cœur, ou échocardiographie, permet d'observer toutes les structures du cœur: valves et cavités (oreillettes et ventricules). Il donne également un aperçu de la tension du muscle cardiaque.

L'échographie est un test indolore et non invasif, elle est donc prescrite en première intention lorsque le médecin soupçonne une anomalie cardiaque [23].



**Figure 10:** Échocardiogramme [24]

### 2.13.4 Épreuve d'effort

Le test d'effort cardiaque est un examen médical très important qui vous permet d'évaluer la capacité du patient à résister à un effort physique et de déterminer la présence d'éventuelles anomalies cardiaques. Ce test est généralement recommandé pour les personnes souffrant de douleurs thoraciques, de palpitations, d'essoufflement ou de fatigue anormale. Il est également souvent pratiqué par les sportifs de haut niveau ou ceux pratiquant une activité physique régulière [25].



**Figure 11:** Épreuve d'effort sur vélo ergométrique [26]

### **2.13.5 Imagerie par résonance magnétique (IRM) cardiaque**

L'imagerie par résonance magnétique (IRM) est un type d'imagerie médicale qui utilise un champ magnétique puissant et des ondes radio à très haute fréquence pour produire des images à haute résolution, en particulier du cœur et de la poitrine [27].



**Figure 12:** IRM [28]

## 2.14 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué le cœur et ses diverses maladies, en particulier l'insuffisance cardiaque, et nous l'avons expliqué en détail. Dans le deuxième chapitre, nous nous concentrerons sur les concepts scientifiques et technologiques les plus importants qui nous aident à étudier les données des patients atteints d'insuffisance cardiaque et à réduire autant que possible son incidence.

# **Chapitre 3: Apprentissage profond et apprentissage automatique**

## 3.1 Introduction

Alors que les défis liés au fonctionnement systématique du secteur de la santé ne cessent de s'intensifier, l'intelligence artificielle (IA) est en plein essor. Les solutions d'IA stimulent la transformation des soins de santé en réduisant la charge de travail des médecins épuisés, en simplifiant les tâches de gestion et en accélérant la prise de décision clinique et les diagnostics [40].

L'apprentissage en profondeur, un sous-domaine de l'intelligence artificielle, est largement reconnu comme la technologie la plus innovante et la plus puissante de ces dernières années. Ses capacités exceptionnelles sous-tendent de nombreux produits et services actuels ainsi que les technologies émergentes [53].

Ce chapitre vise à donner une idée générale de l'intelligence artificielle et de ses applications dans le domaine médical, notamment en décrivant en détail les deux branches, celle du machine learning et celle du deep learning.

## 3.2 L'Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est un moyen informatique d'effectuer des tâches qui nécessitent normalement une intelligence humaine [45].

## 3.3 Santé & intelligence artificielle

L'intelligence artificielle est partout, mais elle trouve des applications plus particulièrement intéressantes dans le domaine de la santé. Les données médicales sont une ressource précieuse pour prédire les maladies, diagnostiquer les conditions médicales ou améliorer le suivi des patients. Voici les huit dernières avancées dans ce domaine [50].

### — Aide à la décision

Savoir si un grain de beauté est un mélanome, interpréter un scanner cérébral ou une radiographie des poumons: l'IA peut poser un diagnostic fiable ou éveiller les soupçons sur une condition médicale en injectant des milliards de données dans un programme d'apprentissage, l'algorithme apprend à "reconnaître" les signes de la maladie. Google AI, la branche de recherche d'Alphabet, a développé une IA qui prédit le cancer du poumon avec un taux de réussite de 94,4%. Ces procédures permettent également d'éviter les tests invasifs tels que les biopsies. L'IA fournit également une aide à la prescription, par exemple en détectant automatiquement le risque d'allergies et d'interactions médicamenteuses.

### — Chirurgie assistée par ordinateur

Les robots chirurgicaux se répandent de plus en plus dans la salle d'opération. Il est plus précis et fiable que les mains humaines, réduit les risques et limite les

complications et les cicatrices. Grâce aux bras articulés, ils peuvent effectuer une chirurgie mini-invasive ou même effectuer une opération à distance.

#### — **Prévention épidémiologique**

Même si l'application "Stop Covid" n'a pas connu le succès escompté, l'intelligence artificielle est un outil précieux pour prévenir et suivre les épidémies. Des chercheurs américains du Boston Children's Hospital ont conçu un algorithme pour prédire l'évolution des cas de grippe grâce aux observations médicales et aux requêtes Google. À Taïwan, le site officiel montre l'évolution possible de l'épidémie et estime le nombre de patients qui consulteront un médecin ou utiliseront les services d'urgence dans les 4 prochaines semaines. L'IA peut également exercer des missions pharmacocinétiques en détectant les effets secondaires des médicaments.

#### — **Nouveaux médicaments**

En passant au crible des milliards de molécules, l'intelligence artificielle peut prédire quelles molécules correspondent à des récepteurs cellulaires ou à des virus. En juillet 2019, une équipe australienne a conçu le premier vaccin utilisant des adjuvants découverts par un algorithme. L'IA permettra aux chercheurs d'élargir le champ des candidats médicaments à des molécules sans méfiance et de mieux prédire les futurs effets secondaires des médicaments.

#### — **Médecine personnalisée**

Il y a des changements importants dans la façon dont les individus réagissent au traitement. Grâce aux progrès de la génétique, de la pharmacie et de l'informatique, il est devenu possible de prescrire des médicaments presque sur mesure, en fonction du profil du patient et du degré de maladie. Ainsi, l'IA permet de prescrire des molécules plus efficaces, de réduire les effets secondaires, et parfois la dose requise. Le problème reste le prix, et ces traitements personnalisés sont plus coûteux à développer.

#### — **Téléconsultation médicale**

Plus fiables que les informations collectées ici et là sur Internet, les chatbots répondent à la plupart des questions en parlant directement avec les patients. Le chatbot Vik, spécialisé dans le cancer du sein, donne ainsi accès à de nombreuses informations sur la maladie et son traitement. Après avoir posé quelques questions, le chatbot peut faire un pré-diagnostic, diriger une consultation avec un médecin et gagner un temps précieux. Les chatbots peuvent également être d'une grande aide dans le domaine de la santé mentale. Des études ont montré que les gens sont plus susceptibles de faire confiance aux robots qu'aux humains.

## **3.4 L'apprentissage automatique**

### **3.4.1 Définition de l'apprentissage automatique**

L'apprentissage automatique fait partie du domaine de l'intelligence artificielle, qui est en constante évolution, permettant aux machines d'apprendre à partir d'ensembles de données antérieurs et d'effectuer certaines tâches automatiquement [42].

### **3.4.2 Types d'apprentissage automatique**

Il existe 3 types d'apprentissage automatique: l'apprentissage supervisé, l'apprentissage non supervisé et l'apprentissage par renforcement.

- **L'apprentissage supervisé**

Dans ce cas, les données sont étiquetées pour indiquer la catégorie ou la valeur cible à prédire. Par conséquent, la machine se forme sur un ensemble de données étiquetées et utilise ces informations pour faire des prédictions.

Ce type d'apprentissage automatique nécessite moins de formation que d'autres. En fait, les résultats du modèle peuvent être comparés directement avec les données étiquetées.

- **L'apprentissage non supervisé**

Pour l'apprentissage non supervisé, les informations ne sont pas étiquetées. Par conséquent, la machine explore les données à la recherche de structures ou de motifs cachés. De grandes quantités de données sont saisies et la machine utilise des algorithmes pour déterminer les caractéristiques pertinentes, trier, classer et grouper les données sans intervention humaine.

Cette technique n'est pas facile à mettre en œuvre. Contrairement à la première approche d'automatisation de la prédiction et de la prise de décision, l'apprentissage non supervisé identifie des modèles et des relations que les humains ne peuvent pas identifier dans les données.

- **L'apprentissage par renforcement**

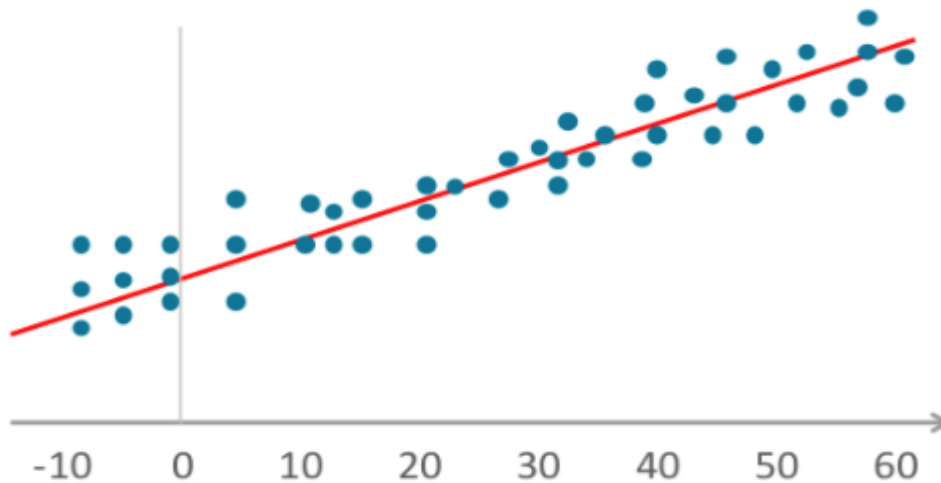
La méthode consiste à laisser l'algorithme s'entraîner et à apprendre de ses erreurs pour atteindre l'objectif. Dans cette configuration d'apprentissage automatique, l'algorithme essaie diverses méthodes pour fournir les résultats attendus.

Selon l'exactitude de ses résultats, il sera récompensé ou pénalisé. Par conséquent, il sait s'il doit continuer dans la même direction ou changer d'approche [43].

### 3.4.3 Algorithmes d'apprentissage automatique

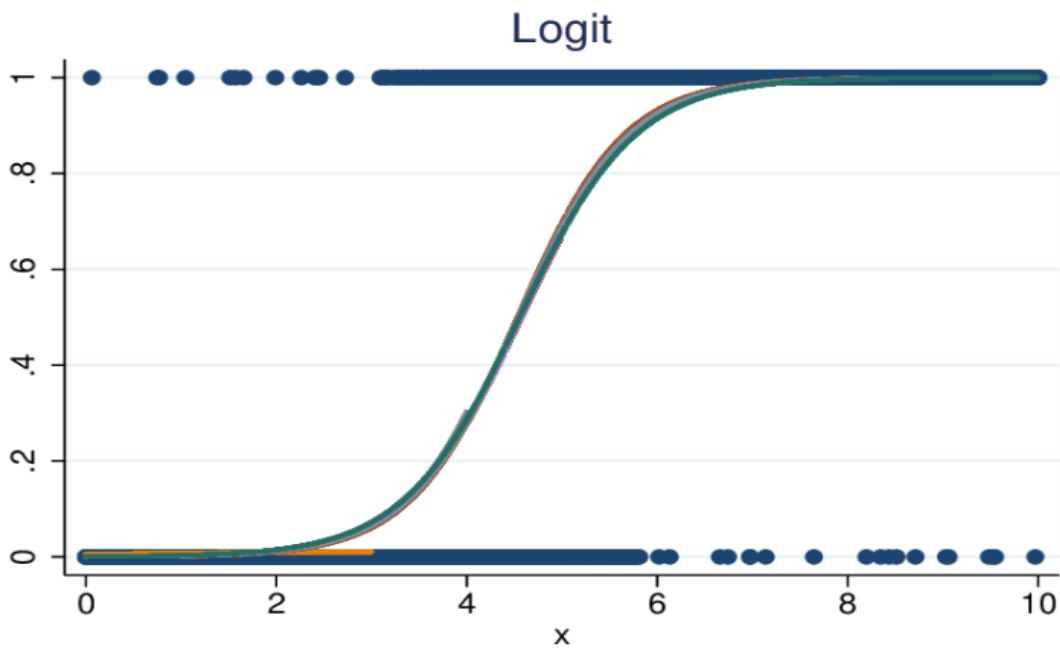
Les algorithmes d'apprentissage automatique prennent en charge les processus d'apprentissage automatique supervisés, non supervisés ou améliorés. Un ingénieur de données écrit un morceau de code qui est un algorithme qui permet aux machines d'apprendre ou de trouver la signification des données. Les 5 algorithmes les plus utilisés actuellement sont [44]:

- **L'algorithme de régression linéaire** établit des relations en plaçant les données dépendantes et indépendantes sur un graphique, puis en traçant une ligne droite pour déterminer une moyenne ou une tendance. Selon Merriam-Webster, la régression est définie comme "une fonction qui permet d'obtenir la valeur moyenne d'une variable aléatoire lorsque des valeurs spécifiées sont présentes dans une ou plusieurs variables indépendantes." Cette définition s'applique également à la régression logistique.



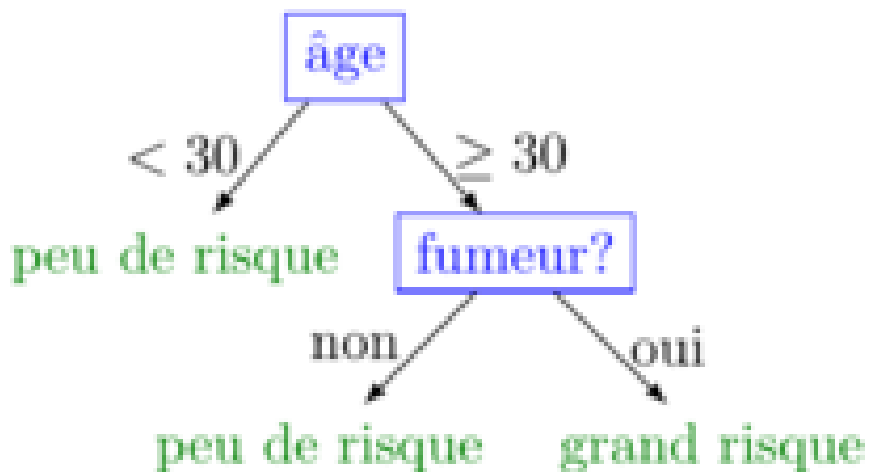
**Figure 13:** Régression linéaire [44]

- **La régression logistique** (ou modèle logit) place également des variables sur un graphique, tout comme la régression linéaire, mais les relations ne sont pas linéaires. Dans ce cas, la relation est représentée par une courbe en forme de sigmoïde.



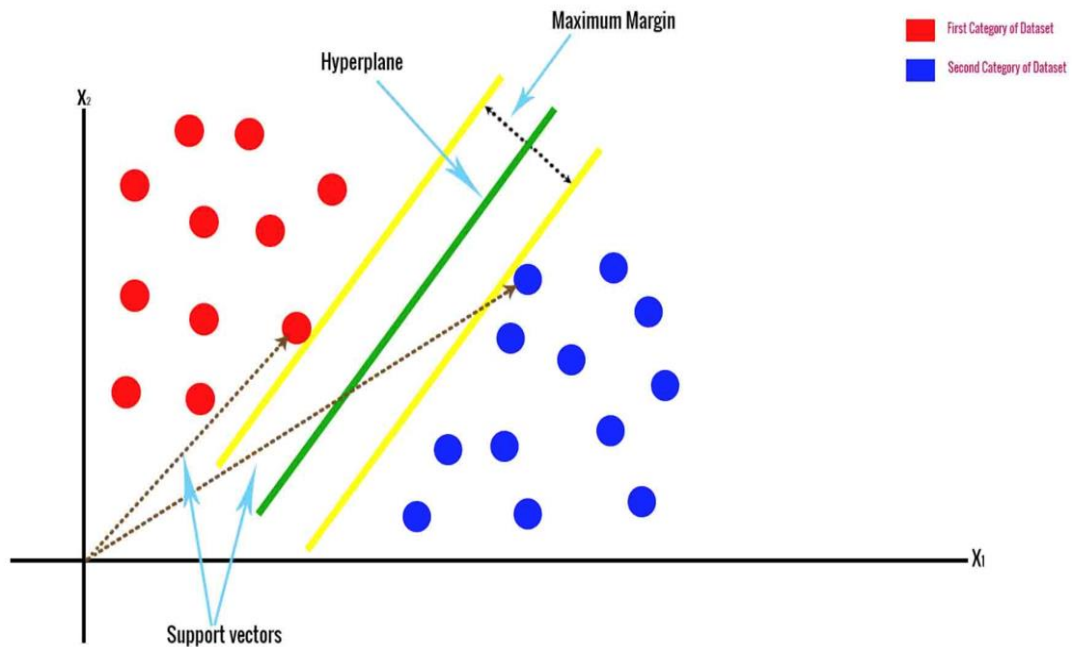
**Figure 14:** Modèle logit [44]

- **Un arbre de décision** est un outil d'aide à la décision qui présente un ensemble de choix sous la forme d'un schéma arborescent. Les décisions possibles se trouvent aux extrémités des branches (appelées "feuilles"), et sont atteintes en fonction des choix effectués à chaque étape. L'arbre de décision est utilisé dans divers domaines tels que la sécurité, l'exploration de données, la médecine, etc. Il a l'avantage d'être facile à lire et rapide à exécuter, voir Figure 15 [30], (Figure 15: est un exemple d'un arbre de décision pour décider si une personne a des risques d'avoir un accident cardiovasculaire).



**Figure 15:** Arbre de décision [30]

- **La Machine à Vecteurs de Support (SVM)**, ou Support Vector Machine en anglais, est un algorithme d'apprentissage supervisé couramment utilisé pour la classification, la régression et la détection d'anomalies. Introduit dans les années 1990 par Vladimir Vapnik, le SVM repose sur le concept de séparation des données en classes distinctes à l'aide d'une frontière optimale. L'objectif principal est de maximiser la marge, c'est-à-dire la distance entre les groupes de données et la frontière de séparation [29].



**Figure 16:** Machine à vecteurs de support [44]

- **La classification naïve bayésienne** calcule effectivement la probabilité d'un résultat en utilisant le théorème de Bayes. Elle est généralement efficace mais n'est pas toujours supérieure à tous les modèles de classification plus sophistiqués. Le modèle suppose que les caractéristiques sont indépendantes les unes des autres, ce qui peut être une approximation simplificatrice et pas nécessairement exacte dans tous les cas.

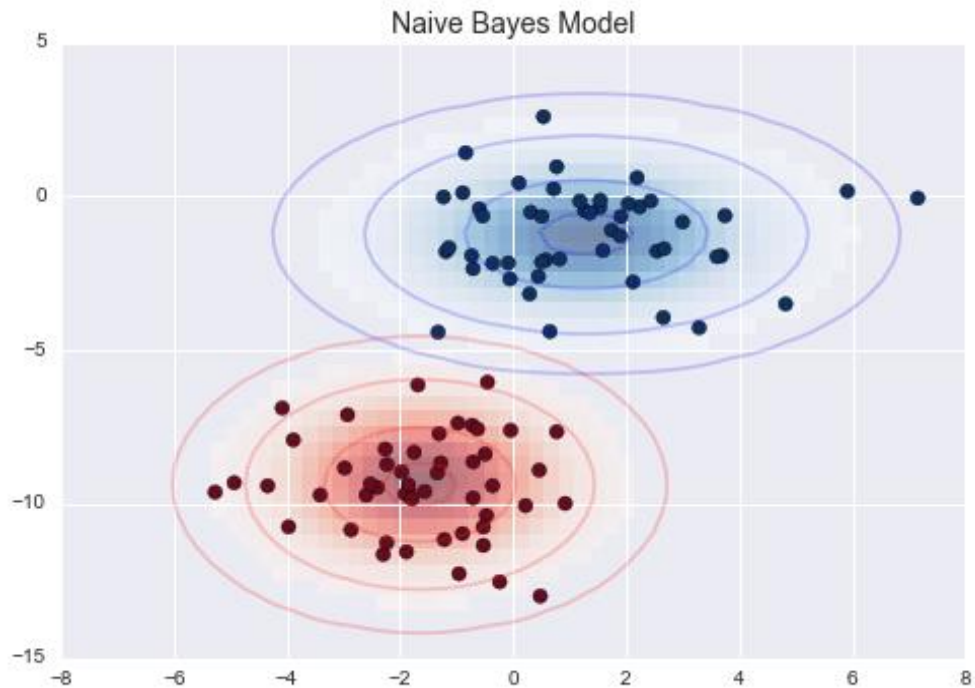


Figure 17: Naïve bayésienne [44]

### 3.4.4 Domaines d'utilisation de l'apprentissage automatique

L'apprentissage automatique est utilisé dans divers domaines pour optimiser les processus et améliorer les performances. Voici quelques domaines d'utilisation de l'apprentissage automatique :

- **Secteur industriel:** Maintenance prédictive et suivi des équipements
- **Entreprise:** Vente incitative et Marketing multicanal
- **Santé et Sciences de la Vie:** Diagnostic et Réduction des Risques
- **Tourisme et Hôtellerie:** Tarification dynamique
- **Services Financiers:** Analyse des Risques et Réglementation
- **Énergie:** Optimisation de l'offre et de la demande [45].

## 3.5 L'apprentissage profond

### 3.5.1 Définition de l'apprentissage profond

L'apprentissage en profondeur est un sous-ensemble spécialisé de l'apprentissage automatique. Techniquement, cela fonctionne exactement comme l'apprentissage automatique, mais les fonctionnalités et les approches sont différentes. Dans le deep learning,

les modèles apprennent et découvrent des idées à partir de données en utilisant différentes couches.

L'apprentissage en profondeur est basé sur la fonction des cellules du cerveau humain, appelées neurones, ce qui nous amène au concept de réseaux de neurones artificiels et parle également de réseaux de neurones profonds ou d'apprentissage neuronal profond [42].

### **3.5.2 Fonctionnement de l'apprentissage profond**

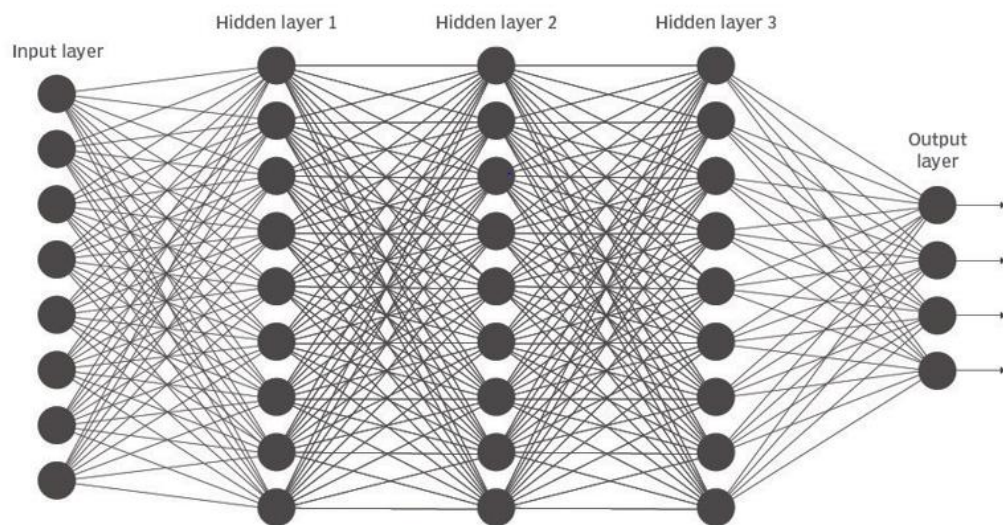
L'apprentissage en profondeur est basé sur des réseaux de neurones artificiels qui imitent le cerveau humain. Cette structure est située en plusieurs couches, interconnectées les unes avec les autres.

La première couche correspond au neurone d'entrée et la dernière couche transmet le résultat de sortie. Entre les deux, il y a plusieurs couches intermédiaires où l'information est traitée. Cette architecture est spécifique au deep learning, permettant à chaque couche d'analyser les données d'entrée avec plus de précision.

Par conséquent, plus le réseau de neurones artificiels est profond et contient donc plusieurs couches, plus les tâches que le système peut effectuer sont complexes. Il peut apprendre à représenter et à interpréter par lui-même les données qu'il reçoit, que ce soit des images ou du texte.

À chaque nouvelle information intégrée, les connexions entre les neurones se développent et évoluent. C'est pourquoi les systèmes d'IA équipés d'apprentissage en profondeur ont la capacité d'apprendre de nouvelles connaissances de manière autonome. Ils améliorent également de manière autonome leurs capacités de prédiction et de prise de décision, sans nécessiter d'intervention humaine. Ainsi, ces systèmes ont la capacité distinctive d'apprendre de leurs erreurs [46].

# Deep neural network



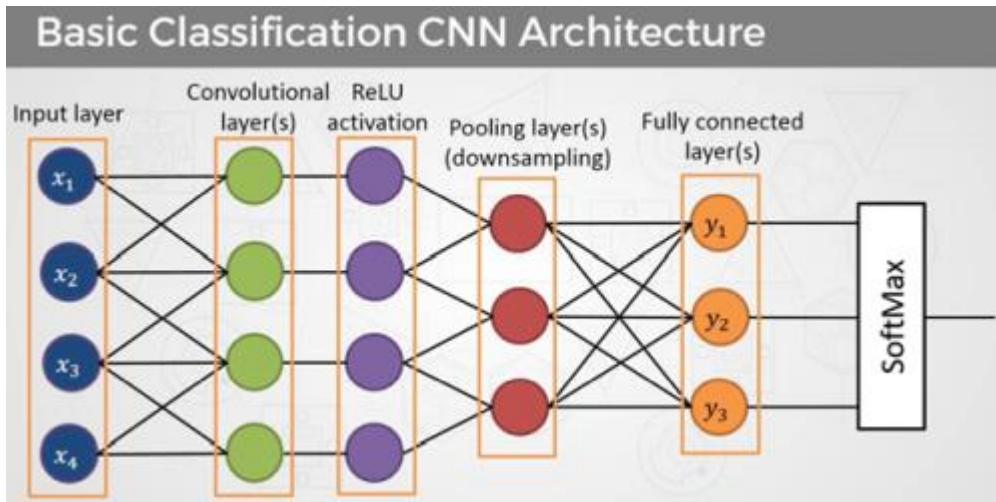
**Figure 18:** Réseaux neuronaux profonds [31]

## 3.5.3 Algorithmes d'apprentissage profond

En apprentissage profond, plusieurs types d'algorithmes sont utilisés. Chaque algorithme a sa spécificité et son application [43]:

### — Réseaux neuronaux convolutifs (CNN)

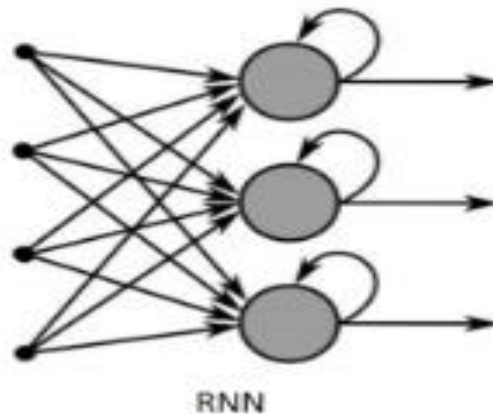
Cnn, également connu sous le nom de ConvNets, se compose de nombreuses couches pour le traitement et l'extraction des caractéristiques des données. Plus précisément, les réseaux de neurones convolutifs sont utilisés pour analyser et détecter des objets. Ainsi, par exemple, il peut être utilisé pour reconnaître des images satellites, traiter des images médicales, détecter des anomalies ou prédire des séries chronologiques.



**Figure 19: CNN**

— **Réseaux neuronaux récurrents (RNN)**

Un réseau neuronal récurrent a des connexions qui constituent un cycle dirigé. Cela permet à la sortie du LSTM d'être utilisée comme entrée pour le niveau de phase actuel. La sortie du LSTM passe à l'entrée de la phase en cours. Vous pouvez donc utiliser la mémoire interne pour vous souvenir de l'entrée précédente. En pratique, les Rnn sont utilisés pour les sous-titres d'images, le traitement du langage naturel et la traduction automatique.



**Figure 20: RNN**

— **Réseaux de fonction de base radiale (RBFN)**

Ces algorithmes sont des réseaux de neurones à rétroaction très spécialisés. Ils utilisent une fonction de base radiale comme fonction d'activation. Ils se composent d'une couche

d'entrée, d'une couche cachée et d'une couche de sortie. En général, la pnb est utilisée dans la classification, la prédiction de séries chronologiques et la régression linéaire.

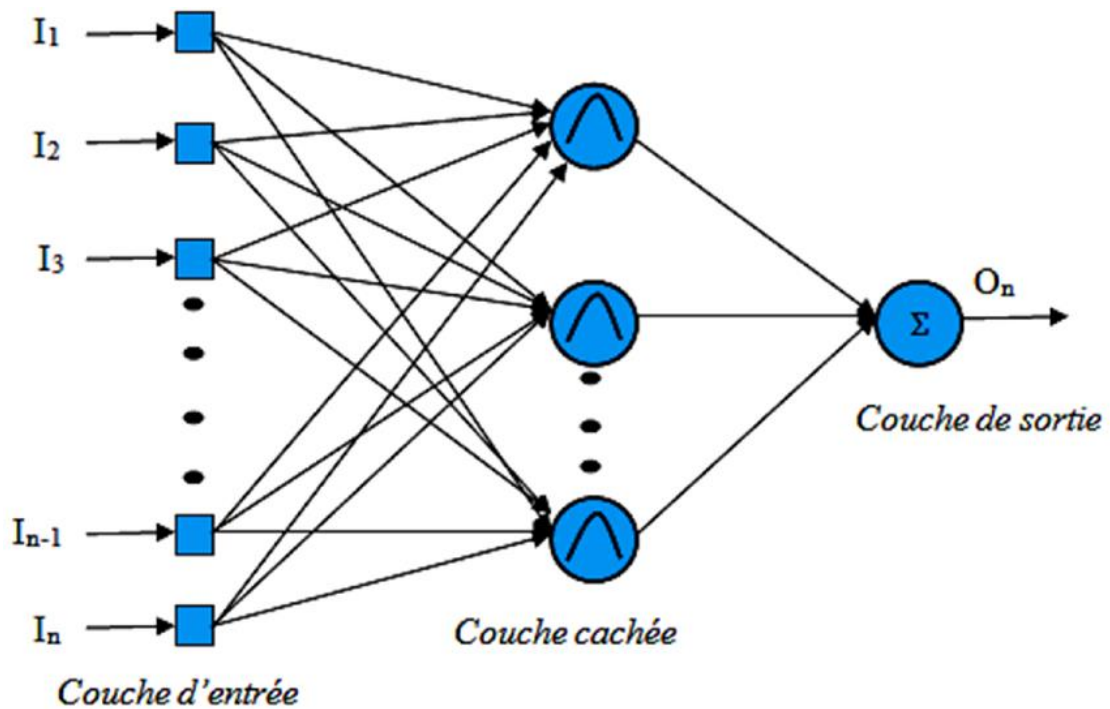


Figure 21: RBFN

#### — Réseaux de mémoire à long et court terme (LSTM)

LSTM est un dérivé de RNN. Ils peuvent apprendre et mémoriser la dépendance sur une longue période de temps. Par conséquent, Lstm conservera les informations stockées pendant une longue période. Il est particulièrement utile pour prédire les séries chronologiques car il se souvient de l'entrée précédente. En plus de ce cas d'utilisation, Lstm est également utilisé pour composer des notes et reconnaître les voix.

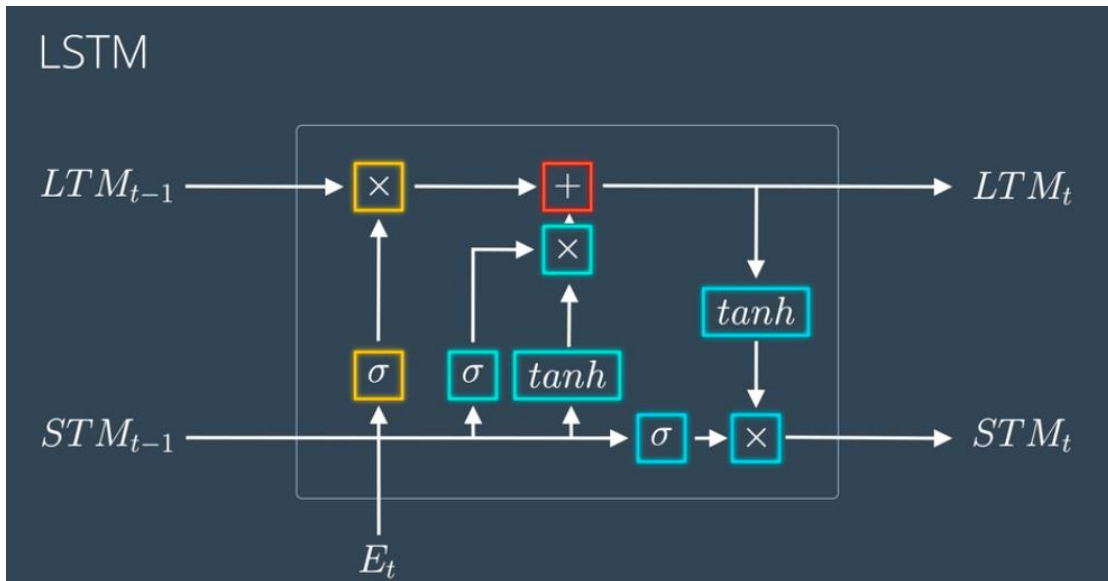


Figure 22: LSTM

### — Réseaux adversariaux génératifs (GAN)

GAN crée de nouvelles instances de données similaires aux données d'apprentissage en profondeur. Ils ont 2 composants principaux: générateur et discriminateur. Si le générateur apprend à générer de fausses informations, le discriminateur apprend à exploiter de son côté ces fausses informations. Le Gan est couramment utilisé par les créateurs de jeux vidéo pour améliorer les textures 2D.

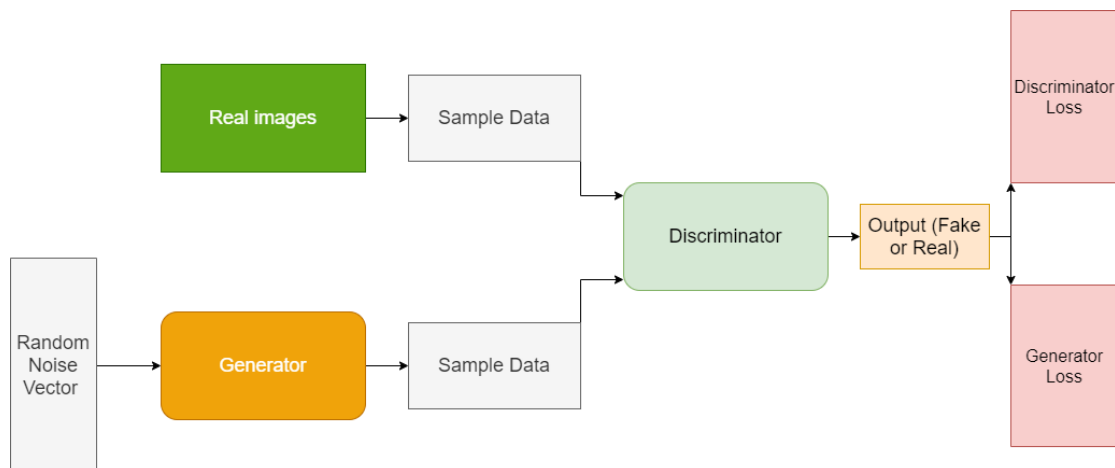
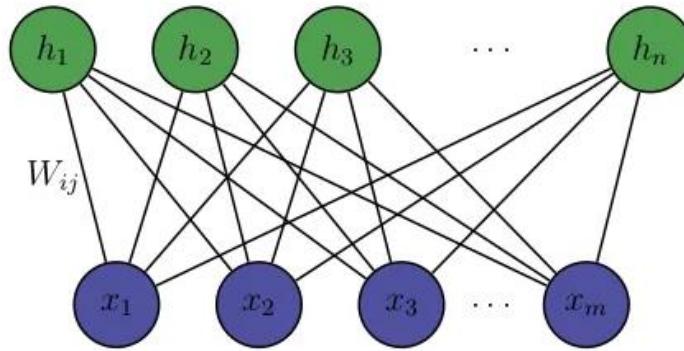


Figure 23: GAN

— **Machines de Boltzmann restreintes (RBM)**

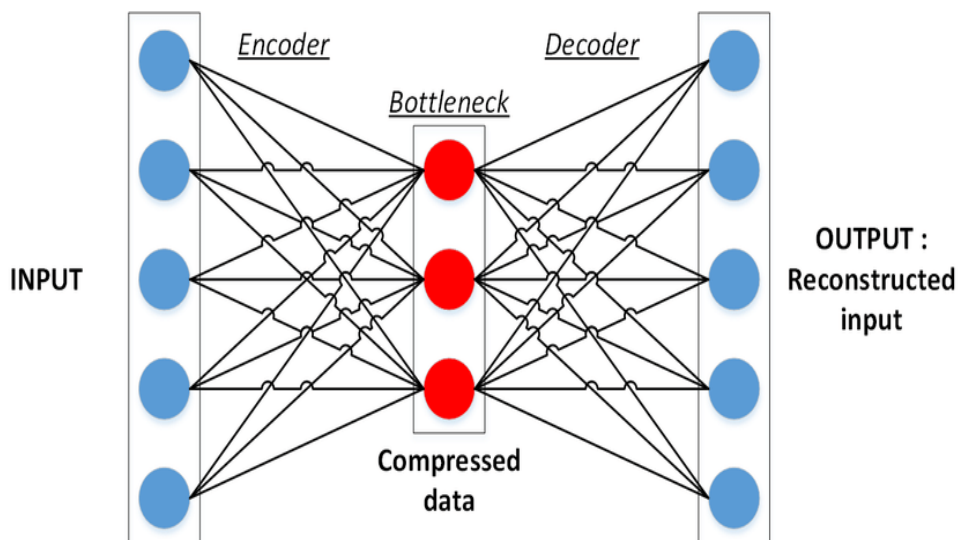
C'est le professeur Geoffrey Hinton qui a développé cet algorithme. En d'autres termes, une machine de Boltzmann restreinte est un réseau neuronal stochastique constitué de 2 couches d'unités visibles et cachées. Ces réseaux artificiels peuvent être appris à partir de distributions de probabilités sur un ensemble d'entrées.



**Figure 24:** RBM

— **Auto-encodeur**

Les auto-encodeurs sont des réseaux de neurones spécialisés avec un nombre identique de neurones dans les couches d'entrée et de sortie. L'objectif d'un auto-encodeur est de produire une sortie aussi proche que possible de l'entrée initiale. Ainsi, l'apprentissage est auto-supervisé, car la perte minimisée représente la différence entre la sortie reconstruite et l'entrée originale. Étant donné que les données servent de leur propre étiquette, il n'est pas nécessaire de les étiqueter, faisant de ce modèle un modèle non supervisé [52].



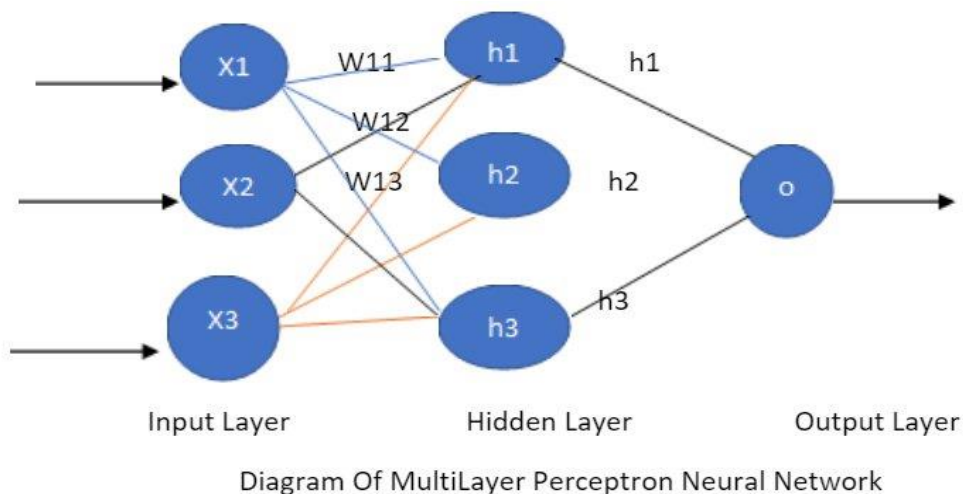
**Figure 25:** Auto-encodeur

## – Le réseau neuronal perceptron multicouche (MLP)

Le réseau neuronal perceptron multicouche (MLP) est un type de réseau neuronal artificiel qui appartient à la famille des réseaux de neurones à propagation avant. Dans un MLP, tous les nœuds sont interconnectés entre les différentes couches du réseau.

Frank Rosenblatt a introduit le concept de perceptron dans son programme Perceptron, définissant ainsi l'unité de base d'un neurone artificiel dans un réseau neuronal. Le perceptron est un algorithme d'apprentissage supervisé qui utilise des nœuds, des fonctions d'activation, des entrées et des poids pour calculer sa sortie.

Le MLP fonctionne uniquement dans le sens direct, où chaque nœud envoie sa valeur au nœud suivant dans les couches supérieures du réseau. Tous les nœuds sont connectés de manière complète au réseau. Pour améliorer la précision du modèle, le réseau neuronal MLP utilise un algorithme de rétropropagation, qui ajuste les poids des connexions en fonction des erreurs calculées par rapport aux sorties attendues lors de l'entraînement [60].



**Figure 26: MLP**

### 3.5.4 Applications de l'apprentissage profond

L'apprentissage profond est devenu un outil essentiel dans de nombreux domaines, offrant des solutions avancées à des problèmes complexes, ses applications sont vastes et variées. Voici quelques-unes des applications les plus remarquables de l'apprentissage profond :

- La reconnaissance visuelle, par exemple la reconnaissance de panneaux de signalisation par des robots ou des véhicules autonomes, ou la reconnaissance de lieux dans une image en combinant des caractéristiques telles que des lits, des fenêtres, des affiches, etc.

- Aide à prédire certaines caractéristiques (comme les caractéristiques du sol prélevé par le robot).
- L'analyse du mouvement et de la position des doigts de la main aide à traduire la langue des signes.
- Télédétection (en particulier les images satellites).
- Reconnaissance vocale de la voix humaine et des signaux vocaux.
- Robotique.
- Sécurité.
- Pédagogie assistée par ordinateur.
- Traduction automatique (moteurs tels que Google Translate, DeepL et Pons).
- Dans le système médical, l'apprentissage en profondeur est également possible.
- L'application de l'apprentissage profond en santé publique est basée sur le projet Horus, qui aide les aveugles et les malvoyants à s'orienter et à reconnaître les personnes et les objets.
- En physique, l'apprentissage en profondeur est utilisé pour étudier des particules exotiques [48].

### 3.5.5 Le futur de l'apprentissage profond

L'apprentissage en profondeur, qui ne fait que commencer, devrait connaître une croissance exponentielle et transformer la société. L'apprentissage en profondeur et l'intégration avec d'autres technologies avancées, telles que la réalité augmentée et virtuelle, pourraient révolutionner notre façon de vivre et d'interagir avec le monde qui nous entoure. Une simple promenade dans les rues d'une ville peut être enrichie par des informations instantanées sur les bâtiments et les monuments environnants. Le monde virtuel devient plus immersif et réaliste.

Sous la direction des normes internationales et sous l'impulsion de la créativité et de l'ingéniosité humaines, le futur paysage de l'apprentissage en profondeur est fascinant, passionnant et presque infini [45].

## 3.6 Comparaisons clés entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond

Les principales différences entre ces deux termes sont décrites dans le tableau 1 en fonction de différents paramètres [51]:

**Table 1:** Comparaison entre ML et DL

| Paramètre                                      | Machine Learning (ML)  | Deep Learning (DL)   |
|--|--|--|
| <b>Dépendance vis-à-vis des données</b>        | Bien que les deux apprentissages dépendent d'une grande quantité de données, le ML peut fonctionner avec une plus petite quantité de données.  | Les algorithmes d'apprentissage profond (DL) reposent en grande partie sur une vaste quantité de données (qui doivent être pures), les moteurs doivent donc être alimentés avec d'énormes quantités de données et éventuellement être réentraînés pour obtenir de bonnes performances.   |
| <b>Temps d'exécution</b>                       | L'algorithme d'apprentissage automatique (ML) prend moins de temps pour entraîner le modèle que celui de l'apprentissage profond, mais tester le modèle peut prendre beaucoup de temps.                    | Le DL nécessite un certain temps d'exécution pour entraîner le modèle et des GPU sont généralement nécessaires. Tester et obtenir les résultats est généralement plus rapide.  |
| <b>Dépendance vis-à-vis du matériel</b>        | Comme les modèles d'apprentissage automatique n'ont pas besoin de beaucoup de données, ils peuvent fonctionner sur des machines bas de gamme.  | Les modèles d'apprentissage profond ont besoin d'une énorme quantité de données pour fonctionner efficacement, ils ont besoin de GPU et donc de machines haut de gamme.  |
| <b>Feature Engineering</b>                     | Les modèles d'apprentissage automatique ont besoin d'une étape d'extraction de caractéristiques, qui doit être réalisé par un expert, avant de pouvoir poursuivre leur apprentissage.                      | Le DL est une version améliorée du ML. Il n'est donc pas nécessaire de développer un extracteur de caractéristiques pour chaque problème. Au lieu de cela, il essaie d'apprendre par lui-même des caractéristiques de haut niveau à partir des données.  |
| <b>Approche par résolution de problèmes</b>    | Pour résoudre un problème donné, le modèle ML traditionnel divise le problème en sous-parties, et après avoir résolu chaque partie, il produit le résultat final.  | L'approche de résolution de problèmes d'un modèle DL est différente de celle du modèle ML traditionnel, car il prend part à un problème donné et produit le résultat final. Il suit donc une approche de bout en bout.   |
| <b>Interprétation du résultat</b>              | Le résultat pour un problème donné peut être facilement interprété. Comme c'est souvent le cas lorsque nous travaillons avec l'apprentissage automatique, nous pouvons facilement interpréter le résultat. | L'interprétation du résultat pour un problème donné peut être complexe. Nous pouvons obtenir un meilleur résultat pour un problème donné qu'avec le modèle ML, mais le réseau agit comme une « boîte noire » ; nous ne pouvons pas savoir pourquoi il a produit un résultat particulier ni comprendre la logique sous-jacente. |
| <b>Type de données</b>                         | Les modèles ML nécessitent principalement des données sous une forme structurée.   | Les modèles DL peuvent fonctionner avec des données structurées et non structurées, car ils dépendent des couches du réseau neuronal artificiel.   |
| <b>À quoi ces modèles peuvent-ils servir ?</b> | Les modèles ML sont utilisés pour résoudre des problèmes aussi bien simples que complexes.   | Les modèles DL sont principalement utilisés pour résoudre des problèmes complexes.   |

### 3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons expliqué l'intelligence artificielle et son fonctionnement, et nous avons également abordé ses applications dans le domaine médical. Après cela, nous avons expliqué le concept de la machine learning et du deep learning ainsi que leurs algorithmes, puis avons énuméré leurs domaines d'application.

# **Chapitre 4: Traveaux anterieur**

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques travaux antérieurs sur l'apprentissage profond et son utilisation pour prédire l'insuffisance cardiaque. L'objectif de ce chapitre est de fournir un contexte approfondi pour notre propre étude, qui se concentre sur l'utilisation d'un modèle d'apprentissage profond RNN(LSTM) pour prédire l'insuffisance cardiaque.

## 4.2 Article1:

**” Détection de l’insuffisance cardiaque à l’aide d’un réseau neuronal convolutif via les signaux ECG”**

**Résumé :** Le but de l'étude est de détecter automatiquement l'insuffisance cardiaque à l'aide de l'apprentissage profond, représenté par l'utilisation du modèle CNN, de sorte que ce modèle proposé ne nécessite pas de prétraitement du signal de l'électrocardiogramme (ECG) ni d'extraction de caractéristiques.

Le modèle a été entraîné et testé à l'aide d'un ensemble équilibré de données extraites des bases de données MIT-BIH et BIDMC, et les résultats ont montré qu'il atteint une précision de 99,33 %, une sensibilité de 99,10 % et une spécificité de 99,57 % [32].

## 4.3 Article2:

**”Stratification automatique de l’insuffisance cardiaque à l’aide d’un réseau neuronal convolutif ”**

**Résumé :** Le but de l'étude est de détecter automatiquement l'insuffisance cardiaque à l'aide de l'apprentissage profond, qui consiste à utiliser un modèle CNN dans lequel le modèle CNN proposé ne nécessite pas d'extraction de caractéristiques et seulement un prétraitement minimal des signaux VFC.

Le modèle a été entraîné et testé à l'aide d'un ensemble de données équilibré extrait des bases de données de signaux d'intervalle RR, et les résultats ont montré qu'il atteint une précision de 95,33 %, une sensibilité de 87,14 % et une spécificité de 95,70 % [33].

## 4.4 Article3:

**”An Attention-based Deep Learning Approach for Lifespan Assessment of Heart Failure Risk Among Patients with Congenital Heart Disease ”**

**Résumé :** Le but de l'étude est de développer une méthode de formation automatisée pour évaluer les trajectoires de risque d'insuffisance cardiaque au cours de la vie des patients en intégrant le profil médical complet des patients atteints de cardiopathie congénitale.

Cette étude a montré que les modèles de formation approfondie peuvent évaluer avec précision les risques de l'IC sur la vie des patients [34].

## 4.5 Analyse les articles

Le tableau présente une comparaison de trois articles scientifiques en ce qui concerne les avantages et les inconvénients des méthodes d'apprentissage profond appliquées à la détection de l'insuffisance cardiaque.

**Table 2:** Avantages et Inconvénients des Méthodes de Détection de L'IC

| Article  | Avantages   | Inconvénients  |
|--|---|--|
| <p><b>Détection de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un réseau neuronal convolutif via les signaux ECG</b></p>                                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Haute précision dans la détection des schémas ECG.</li> <li>- Dépendance réduite à l'analyse manuelle.</li> <li>- Innovations dans l'utilisation du CNN pour le diagnostic médical.</li> </ul>                                       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La formation nécessite un grand ensemble de données.</li> <li>- Complexité de l'interprétation.</li> <li>- peut ne pas refléter les différences biologiques entre les patients de différentes populations.</li> </ul> |
| <p><b>Stratification automatique de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un réseau neuronal convolutif</b></p>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- La capacité de classer les patients en différents niveaux de risque.</li> <li>- Précision de la détection des niveaux de risque.</li> <li>- Facilité d'utilisation pour les décisions médicales.</li> </ul>                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Intégration complexe avec les systèmes existants.</li> <li>- Dépend de la qualité des données d'entrée.</li> <li>- Les décisions modèles peuvent manquer de transparence.</li> </ul>                                  |
| <p><b>An Attention-based Deep Learning Approach for Lifespan Assessment of Heart Failure Risk Among Patients with Congenital Heart Disease</b></p> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mécanismes d'attention qui mettent l'accent sur les caractéristiques les plus importantes.</li> <li>- Fournit une évaluation globale du risque à vie.</li> <li>- Applicabilité générale à différents groupes de patients.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Cela nécessite des ressources de calcul considérables.</li> <li>- Des données de santé détaillées sont requises.</li> <li>- Il peut ne pas être aussi efficace pour tous les types de données.</li> </ul>             |

## 4.6 Conclusion

Des points positifs et négatifs des articles, nous concluons que le troisième article offre le meilleur équilibre entre la précision de l'évaluation globale et la clarté des explications, grâce à l'utilisation du mécanisme d'attention, et malgré son besoin de ressources importantes. et des données complètes, il est considéré comme plus efficace pour évaluer les risques pour la vie du patient à long terme par rapport aux autres articles.

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue certains travaux qui ont appliqué l'apprentissage profond pour prédire l'insuffisance cardiaque à l'aide de divers modèles de cet apprentissage.

Les informations dont j'ai bénéficié grâce à cette modeste étude sont nombreuses, y compris la nécessité de choisir un large ensemble de données pour entraîner les modèles à garantir l'exactitude des prédictions.

# **Chapitre 5: Etude comparative**

## 5.1 Introduction

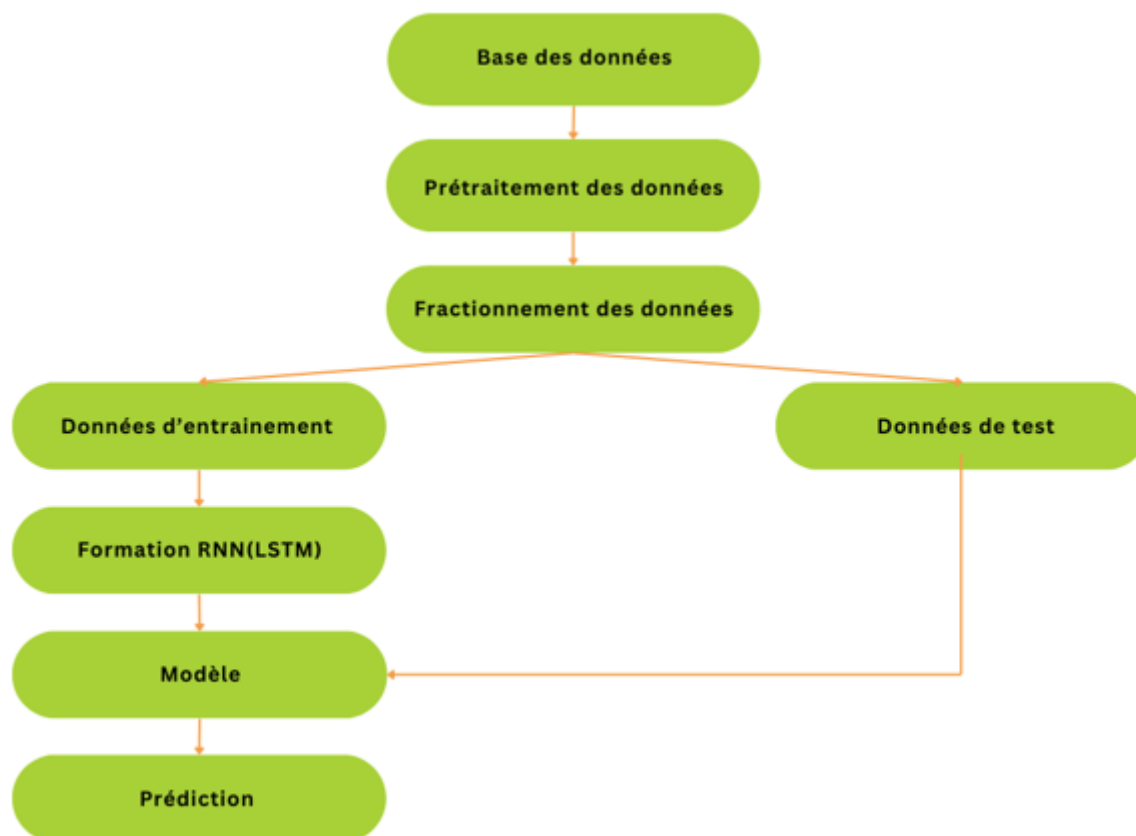
Dans ce chapitre, nous utilisons divers outils pour développer un modèle précis et efficace dédié à l'analyse des données et à la prédiction des maladies. Nous expliquons la méthodologie utilisée dans le processus de prédiction, analysons les résultats obtenus, et comparons spécifiquement le modèle RNN (LSTM) avec les modèles 1D CNN et MLP en termes de précision.

## 5.2 Problématique

Depuis l'Antiquité, l'insuffisance cardiaque a été et reste l'une des principales causes de décès dans le monde. Ces dernières années, l'incidence de cette maladie a augmenté et, en raison de cette augmentation, il a été nécessaire de rechercher des solutions plus avancées. , des méthodes et des moyens plus efficaces et précis afin de prédire l'insuffisance cardiaque et de contribuer à un diagnostic précoce pour éviter de la contracter ou au moins réduire le taux de mortalité. Parmi ces avancées, l'apprentissage profond, en particulier les Réseaux Neuronaux Récurrents (RNN) avec LSTM, offre un potentiel considérable dans l'analyse des données médicales temporelles et la prédiction des maladies. Le but de ce chapitre est de développer un modèle pour analyser précisément les données médicales et prédire la présence éventuelle de problèmes cardiaques chez les patients. Nous utiliserons spécifiquement le modèle RNN (LSTM) et le comparerons avec les modèles 1D CNN et MLP en termes de précision pour l'analyse et la prédiction.

## 5.3 Architecture du système

Le diagramme présenté dans la figure 27 présente l'architecture du système de prédiction des maladies cardiaques utilisant RNN(LSTM).



**Figure 27:** Architecture du système de prédiction des maladies cardiaques

## 5.4 Dataset utilisée

L'ensemble de données comprenait les dossiers médicaux de 5000 patients insuffisants cardiaques recueillis au cours de la période de suivi, et chaque profil de patient présente 13 caractéristiques [54]. La colonne 13 contient un champ «HeartDisease» qui indique la présence d'une maladie cardiaque chez le patient. Il est de valeur entière : la valeur 0 indique l'absence de maladie et la valeur 1 indique la présence de la maladie. Dans le tableau suivant description des attributs de base des données utilisée :

**Table 3:** Description des attributs de base des données utilisée

| N° | Attributs   | Signification   |
|----|---|---|
| 1  | Age   | Age du patient en années                                  |
| 2  | Anémie  | diminution des globules rouges ou de l'hémoglobine        |
| 3  | Créatinine(CPK) La Créatinine phosphokinase (CPK) | aux de l'enzyme CPK dans le sang (mcg/L)                  |
| 4  | Diabète   | si le patient est diabétique                              |
| 5  | Fraction d'éjection                               | pourcentage de sang quittant le cœur à chaque contraction |

|    |                         |   |
|----|-------------------------|---|
| 6  | Hypertension artérielle | si le patient est hypertendu                          |
| 7  | Plaquettes              | nombre de plaquettes dans le sang (kiloplaquettes/mL) |
| 8  | Sexe                    | sexe du patient                                       |
| 9  | Créatinine sérique      | aux de créatinine sérique dans le sang (mg/dL)        |
| 10 | Sodium sérique          | aux de sodium sérique dans le sang (mEq/L)            |
| 11 | Tabagisme               | i le patient fume ou non                              |
| 12 | Heure                   | période de suivi (jours)                              |
| 13 | HeartDisease            | Présence ou absence d'insuffisance cardiaque          |

## 5.5 Prétraitement des données

Le prétraitement des données est une étape importante de l'analyse et de la modélisation des données. Cela inclut la conversion des données brutes dans un format propre et structuré adapté à une analyse ultérieure.

Le prétraitement des données vise à améliorer la qualité, la fiabilité et la facilité d'utilisation des données en appliquant une variété de techniques et de méthodes telles que le nettoyage, la normalisation et la sélection des fonctionnalités [55].

### 5.5.1 Normalisation

La normalisation est une opération de prétraitement des données qui vise à mettre toutes les variables quantitatives sur la même échelle. Supposons que vous deviez comparer les variables hauteur et âge. Ces deux variables ne sont pas de la même taille, donc la comparaison n'aurait pas vraiment de sens.

La mise à l'échelle est nécessaire pour mettre les variables sur la même échelle, mais c'est ce qui facilite la comparaison et lui donne du sens parmi les méthodes de normalisation des données il y a la **normalisation Min-Max**. La méthode de normalisation minimum-maximum utilise les valeurs minimales et maximales des variables. L'idée est d'amener toutes les valeurs de la variable dans l'intervalle [0;1] tout en maintenant le rapport de la distance entre les valeurs. Pour y parvenir, la formule suivante est utilisée [56]:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}}$$

**Figure 28:** La formule de Normalisation des données [56]

## 5.6 Algorithmes de prediction

Nous avons utilisé le modèle RNN(LSTM) pour prédire l'insuffisance cardiaque, ainsi que les modèles 1D CNN et MLP pour comparer la précision et l'efficacité de la prédiction du modèle RNN(LSTM).

### — Réseaux neuronaux récurrents RNN avec (LSTM)

#### Résumé du modèle

Cette architecture utilise LSTM pour capturer les modèles temporels dans les données. La première couche comprend un nombre spécifié d'unités neuronales (128) pour effectuer une analyse approfondie de la série chronologique, et la séquence de sortie est passée à la couche suivante. Ensuite, il y a une couche de dropout pour la régularisation, suivie d'une deuxième couche LSTM avec un nombre réduit d'unités neuronales (64) pour traiter la sortie séquentielle de la première couche. Enfin, une couche dense avec une unité utilise une fonction d'activation sigmoïde pour générer des probabilités de prédiction d'événements.

#### Comment fonctionne le modèle

Première couche LSTM: Traite les données séquentielles brutes et génère une séquence de sortie (c'est-à-dire que chaque pas de temps est traité et produit un résultat spécifique).

Couche d'abandon: Aide à réduire la suradaptation en désactivant aléatoirement certaines unités neuronales pendant l'entraînement.

LSTM de couche 2: Récupère la séquence de sortie de la couche 1 et produit un résultat unique résumant les informations de temps accumulées.

Couche finale dense: Elle convertit ces informations en probabilités (à l'aide de sigmoïdes) et est utilisée pour déterminer la probabilité que l'événement cible se produise (dans ce cas, l'IC).

Cette architecture est particulièrement performante pour le traitement de données temporelles ou continues, telles que des données de séries chronologiques.

### — 1D CNN (Convolutional Neural Network)

Le modèle 1D CNN (réseau de neurones convolutifs unidimensionnel) est une architecture utilisée principalement pour les données séquentielles, telles que les séries temporelles ou les signaux. Contrairement aux CNN classiques en 2D, qui traitent des images, les 1D CNN appliquent des filtres convolutifs sur des données unidimensionnelles. Cela permet d'extraire des caractéristiques locales en capturant des motifs temporels ou séquentiels. Le modèle utilise des couches de convolution suivies de couches de pooling pour réduire la dimensionnalité tout en préservant les informations pertinentes. Il est particulièrement efficace pour détecter des motifs locaux et des dépendances à court terme dans les séquences de données.

-

## — MLP (Multilayer Perceptron)

Le MLP (perceptron multicouche) est un type de réseau de neurones artificiels où les neurones sont organisés en couches : une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie. Contrairement aux CNN, le MLP est un réseau entièrement connecté, où chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante. Ce modèle est plus adapté aux données tabulaires ou aux problèmes où les relations globales entre les variables sont importantes. Bien qu'il soit plus simple en termes d'architecture que le 1D CNN, le MLP peut avoir du mal à capturer des motifs locaux dans des séquences, car il ne prend pas en compte les dépendances spatiales ou temporelles dans les données.

### Structure

Le tableau présente la structure de trois modèles d'apprentissage profond : le modèle RNN (LSTM) qui comprend deux couches LSTM, Dropout et une couche Dense ; le modèle 1D CNN qui inclut des couches Convolutional, MaxPooling, Flatten et Dense ; tandis que le modèle MLP repose sur des couches Dense entièrement connectées avec activation ReLU et une couche de sortie Sigmoid.

**Table 4:** Structure

| Modèle    | Structure  |
|-----------|--|
| RNN(LSTM) | LSTM (128 unités avec activation relu et retour de séquences), Dropout (0.2), LSTM (64 unités avec activation relu), Dense (1 unité avec activation sigmoid) |
| 1D CNN    | Conv1D (64 filtres, taille du noyau 3, avec activation relu), MaxPooling1D (taille du pool 2), Flatten, Dense (1 unité avec activation sigmoid)              |
| MLP       | Couches Denses entièrement connectées avec activations relu et une couche de sortie Dense (1 unité avec activation sigmoid)                                  |

### Approche

Le tableau compare **RNN (LSTM)** pour capturer les informations temporelles, **1D CNN** pour extraire des caractéristiques locales, et **MLP** pour la classification basique. Utilisations : traduction, traitement de texte, classification.

**Table 5:** Approche

| Modèle    | Approche  | Utilisations Courantes  |
|-----------|---|---|
| RNN(LSTM) | Utilise des cellules récurrentes comme LSTM pour capturer les informations temporelles et séquentielles.  | Traduction automatique, reconnaissance vocale, analyse de séries temporelles, génération de texte.  |
| 1D CNN    | Un filtre (ou noyau) est appliqué à l'ensemble de la séquence pour extraire les fonctions locales.<br>Utilisé pour la classification ou la prédiction basée sur des caractéristiques extraites. | Il est utilisé pour traiter des données sous la forme d'une séquence ou d'une série, telle qu'un signal temporel, un texte ou une séquence génétique. |
| MLP       | Utilise des couches neuronales entièrement connectées sans structure récurrente ou convolutive.   | Classification de base, régression, traitement de données structurées simples   |

## Avantages et Inconvénients

Le tableau compare **RNN (LSTM)**, **1D CNN**, et **MLP**. **RNN** est lent mais gère bien les séquences. **1D CNN** est rapide mais demande beaucoup de données. **MLP** est simple mais limité.

**Table 6:** Avantages et Inconvénients

| Modèle    | Avantages  | Inconvénients   |
|-----------|--|---|
| RNN(LSTM) | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Capacité élevée à traiter les données séquentielles et temporelles.</li> <li>- Adapté aux tâches nécessitant une mémoire à long terme.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Problèmes d'entraînement comme l'explosion ou la disparition du gradient.</li> <li>- Temps d'entraînement relativement long.</li> </ul>  |
| 1D CNN    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Efficacité en calcul.</li> <li>- Capacité à gérer des séquences de longueur variable.</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Nécessite une quantité importante de données pour un entraînement efficace.</li> <li>- Peut avoir des performances inférieures pour les données séquentielles ou temporelles.</li> </ul> |
| MLP       | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Simple et facile à comprendre et à implémenter.</li> <li>- Performe bien dans des tâches de classification de base.</li> </ul>                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Peut avoir des performances limitées pour des données complexes.</li> <li>- Non idéal pour les données temporelles ou spatiales.</li> </ul>  |

Ces tableaux fournissent une comparaison détaillée des modèles RNN, CNN et MLP en termes de précision, de structure, d'approche, d'avantages et d'inconvénients. En fonction du type de données et des exigences spécifiques de la tâche, cela vous aidera à mieux comprendre quel modèle utiliser.

## 5.7 Métriques de performance

Nous mettons en œuvre le modèle et obtenons les résultats sous forme de probabilités ou de classes. Pour évaluer son efficacité, nous utilisons différentes mesures de performance, dont l'exactitude est l'une des principales. Passons maintenant à une explication des mesures d'évaluation couramment utilisées pour les algorithmes d'apprentissage : la matrice de confusion et l'exactitude.

### 5.7.1 Matrice de confusion

Une matrice de confusion est un type de matrice utilisé pour visualiser les valeurs prédites par rapport aux valeurs réelles. Les en-têtes de ligne de la matrice de confusion représentent les valeurs prédites et les en-têtes de colonne sont utilisés pour représenter les valeurs réelles. La matrice de confusion contient 4 cellules, comme le montre la figure suivante [57].

|                  |          | True Class |          |
|------------------|----------|------------|----------|
|                  |          | Positive   | Negative |
| Predicated Class | Positive | TP         | FP       |
|                  | Negative | FN         | TN       |

**Figure 29:** Matrice de confusion [58]

Avec [54]:

- **True Positive (TP):** Votre modèle a prédit la classe positive.
- **True Negative (TN):** Votre modèle a prédit correctement la classe négative.

- **False Positive (FP):** Votre modèle a prédit de manière incorrecte la classe positive.
- **False Negative (FN):** Votre modèle a prédit de manière incorrecte la classe négative.

### 5.7.2 Précision

Cela mesure le nombre total de classifications correctes divisé par le nombre total de cas [58].

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

**Figure 30:** La formule d'Accuracy [58]

## 5.8 Étapes de la formation du modèle RNN(LSTM)

### Chargement des données :

Les données des patients sont chargées à partir d'un fichier CSV appelé « heart.csv » à l'aide de la bibliothèque pandas (Figure 31).

```
data = pd.read_csv('/content/data/heart.csv')
```

**Figure 31:** Code de collecte de data

### Prétraitement des données :

Utilisation de StandardScaler pour normaliser les données avec une moyenne de zéro et un écart-type de un.

```
scaler = StandardScaler()
X = scaler.fit_transform(X)
```

**Figure 32:** Code de prétraitement des données

### Division des données :

Les données sont divisées en ensembles d'entraînement, de validation et de test à l'aide de train-test-split (Figure 33).

```
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X, Y, test_size=0.2, random_state=42)
```

**Figure 33:** Code de division des données

### Création du modèle RNN(LSTM) :

Un modèle séquentiel est construit avec une couche LSTM de 128 unités. Des couches Dropout et Dense sont ajoutées pour obtenir les résultats finaux, avec une activation sigmoid dans la dernière couche.

```
model = Sequential()  
model.add(LSTM(128, activation='relu', return_sequences=True, input_shape=(X_train.shape[1], X_train.shape[2])))  
model.add(Dropout(0.2))  
model.add(LSTM(64, activation='relu'))  
model.add(Dense(1, activation='sigmoid'))
```

**Figure 34:** Code de création du modèle LSTM

### Compilation du modèle :

Le modèle est compilé en spécifiant la fonction de perte ('binary\_crossentropy'), l'optimiseur ('adam'), et les métriques à suivre ('accuracy') (Figure 35).

```
optimizer = Adam(learning_rate=0.0005)  
model.compile(loss='binary_crossentropy', optimizer=optimizer, metrics=['accuracy'])
```

**Figure 35 :** Code de compilation du modèle

### Entraînement du modèle :

Le modèle est entraîné sur les données d'entraînement avec un nombre d'époques limité (200) et une taille de lot de 16 (Figure 36).

```
history = model.fit(X_train, y_train, epochs=200, batch_size=16, validation_data=(X_test, y_test), callbacks=[early_stopping])
```

**Figure 36:** Code de l'entraînement du modèle

### Évaluation du modèle :

Le modèle est évalué sur l'ensemble de test, et la perte de test et la précision de test qu'ils seront affichées (Figure 37).

```
loss, accuracy = model.evaluate(X_test, y_test)
print(f'Accuracy: {accuracy * 100:.2f}%')
```

**Figure 37:** Code de l'évaluation du modèle

## 5.9 Expériences et résultats obtenus

Nous avons mené des expériences sur un ensemble de données en utilisant plusieurs méthodes, dont RNN(LSTM), 1D CNN et MLP, afin de savoir si le modèle RNN(LSTM) donne ou non de meilleurs résultats par rapport aux autres modèles, et nous avons obtenu les résultats décrits dans les parties suivantes :

### 5.9.1 Réseaux neuronaux récurrents RNN avec (LSTM)

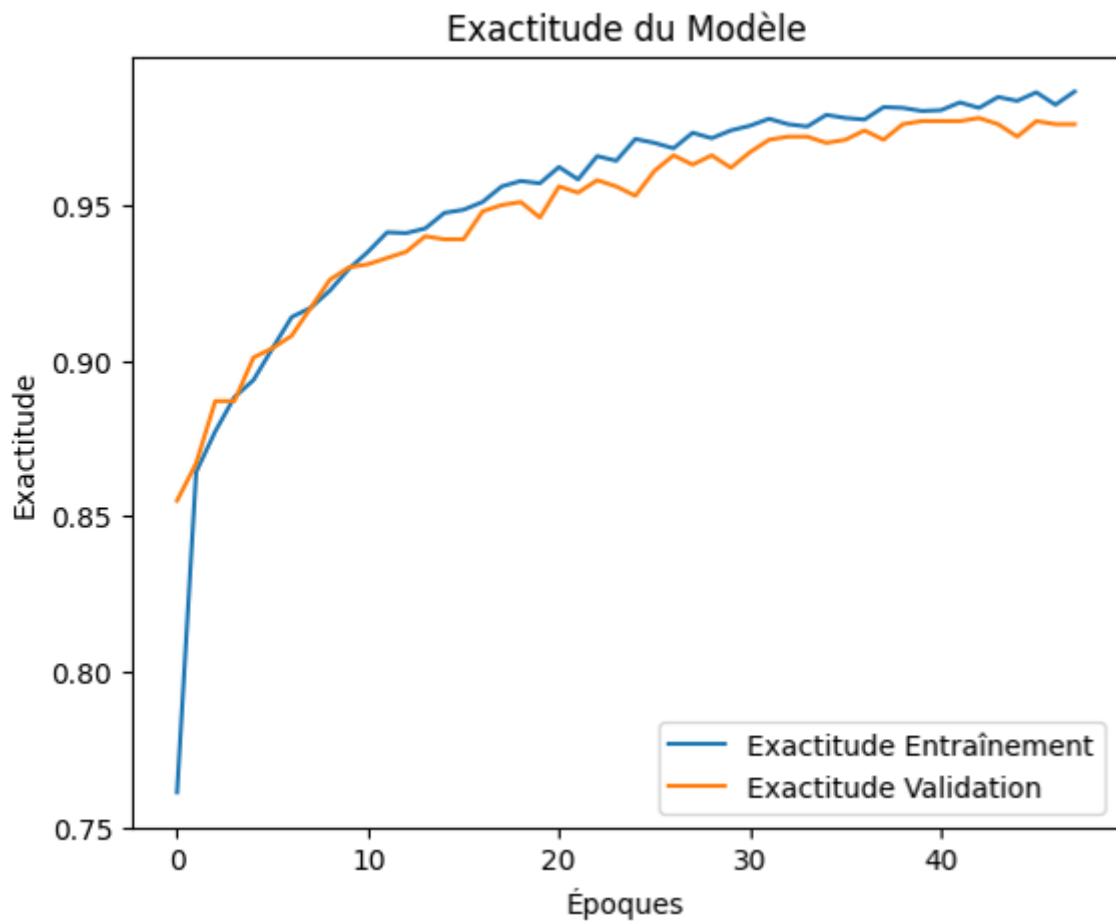
Nous avons testé notre base de données sur un RNN (LSTM) et avons obtenu d'excellents résultats avec 5000 dossiers médicaux. Les résultats sont les suivants :

```
32/32 [=====] - 0s 4ms/step - loss: 0.1064 - accuracy: 0.9780
Accuracy: 97.80%
```

**Figure 38:** Accuracy du RNN

Afin de suivre la progression des performances du deep learning RNN(LSTM) tout au long du processus de formation, nous avons créé deux représentations visuelles :

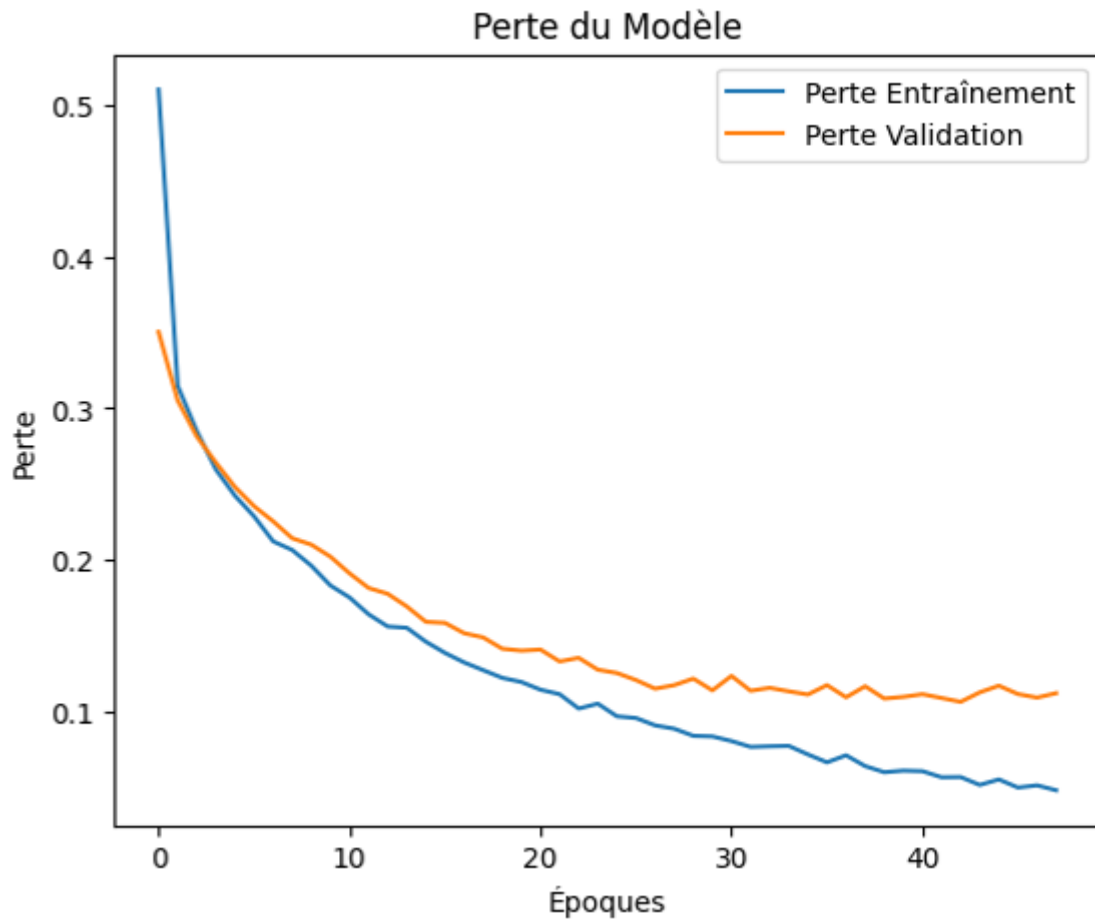
- Le premier est un graphique montrant la précision du modèle sur différentes époques de formation (Figure 39).
- Le deuxième graphique montre la « perte » du modèle au fil des époques (Figure 40).



**Figure 39:** La précision du modèle obtenue par RNN(LSTM)

Le graphique (**Figure 39**) nous montre que la précision du modèle continue de s'améliorer au fil des époques, montrant qu'il apprend des données.

De plus, l'absence de différence significative entre la précision de la formation et celle des tests indique que le modèle fonctionne bien sur les données et qu'il apprend rapidement à partir des données.



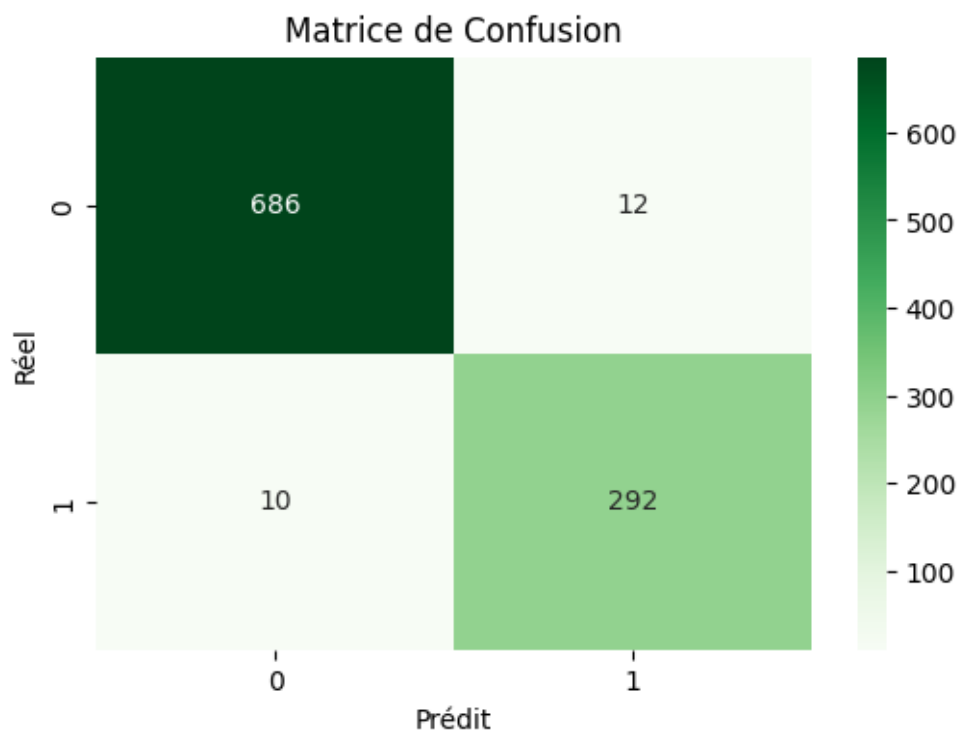
**Figure 40:** La perte du modèle obtenue par RNN(LSTM)

Le graphique (**Figure 40**) nous montre que l'erreur de formation diminue avec le nombre d'époques, ce qui indique que le modèle apprend à partir des données.

La petite différence entre la perte de formation et la perte de test indique que le modèle est équilibré et qu'il apprend rapidement à partir des données.

### - Evaluation du modèle sur les données de test

Cette évaluation vise à analyser les performances du modèle de classification, car la matrice de confusion fournit un aperçu détaillé des performances du modèle en comparant les résultats réels avec les résultats prédits par le modèle. Comme la montre la figure:



**Figure 41:** Matrice de confusion

#### Explication de la matrice:

(Etiquette 0 = «Pas IC» et Etiquette 1 = «IC»)

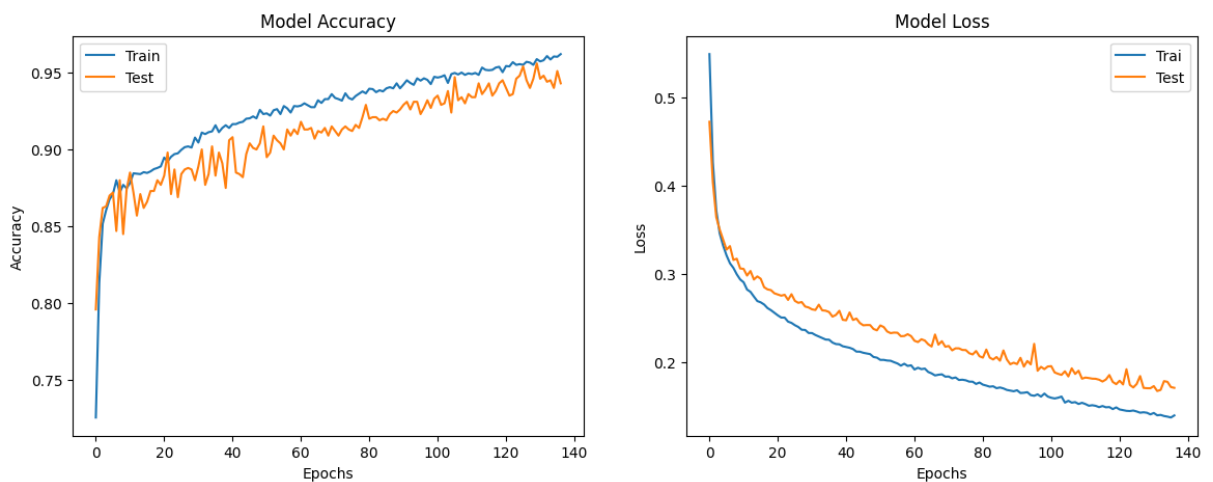
Le modèle a prédit que 686 échantillons ne sont pas infectés (0) et qu'ils ne le sont effectivement pas. Il a également prédit que 12 échantillons sont infectés (1) alors qu'ils ne le sont en réalité pas (0). De plus, le modèle a indiqué que 10 échantillons ne sont pas infectés (0) alors qu'ils le sont effectivement (1), et il a prédit correctement que 292 échantillons infectés (1) sont effectivement infectés. Le modèle semble bien classer les échantillons avec une haute exactitude (97,80%).

## 5.9.2 Réseau neuronal convolutif unidimensionnel (1D CNN)

Les résultats du modèle 1D CNN n'ont pas donné d'excellents résultats par rapport à RNN (LSTM).

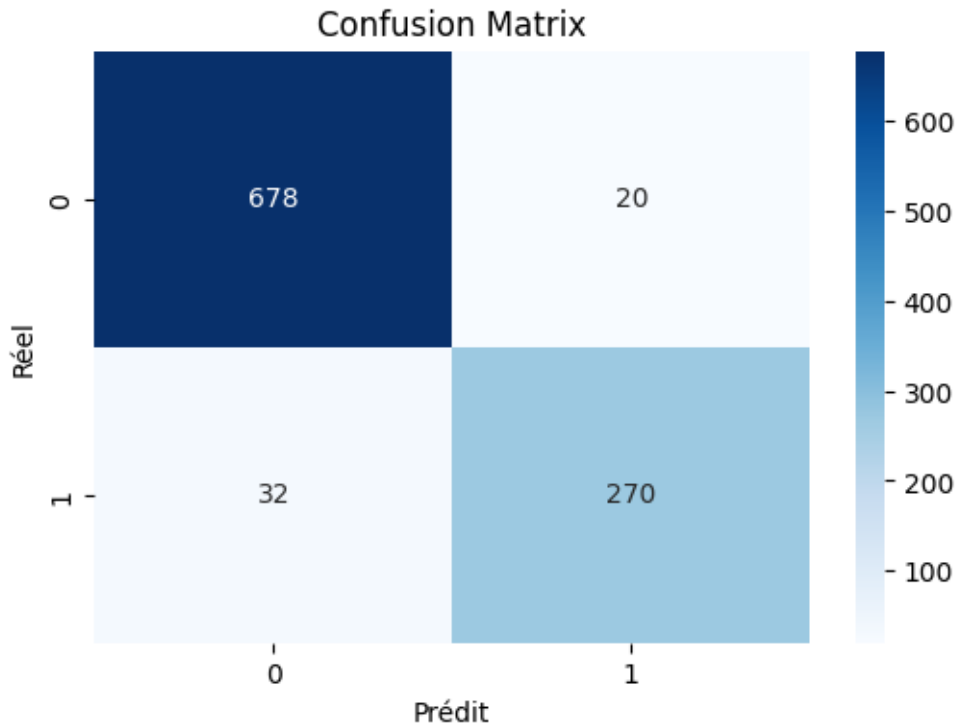
```
32/32 [=====] - 0s 2ms/step - loss: 0.1669 - accuracy: 0.9480  
Accuracy: 94.80%
```

: Accuracy du CNN



**Figure 42:** Accuracy et Loss

Le modèle présente de bonnes performances, avec une augmentation de la précision pour la formation et les tests avec le temps. Mais après environ 40 époques, la précision du test commence à fluctuer. La perte diminue constamment pour la formation et les tests, mais la perte de test reste légèrement plus élevée. Le modèle doit être amélioré pour améliorer les performances sur les données de test.



**Figure 43:** Résultat du Modèle 1D CNN

**Explication de la matrice:**

(Etiquette 0 = «Pas IC» et Etiquette 1 = «IC»)

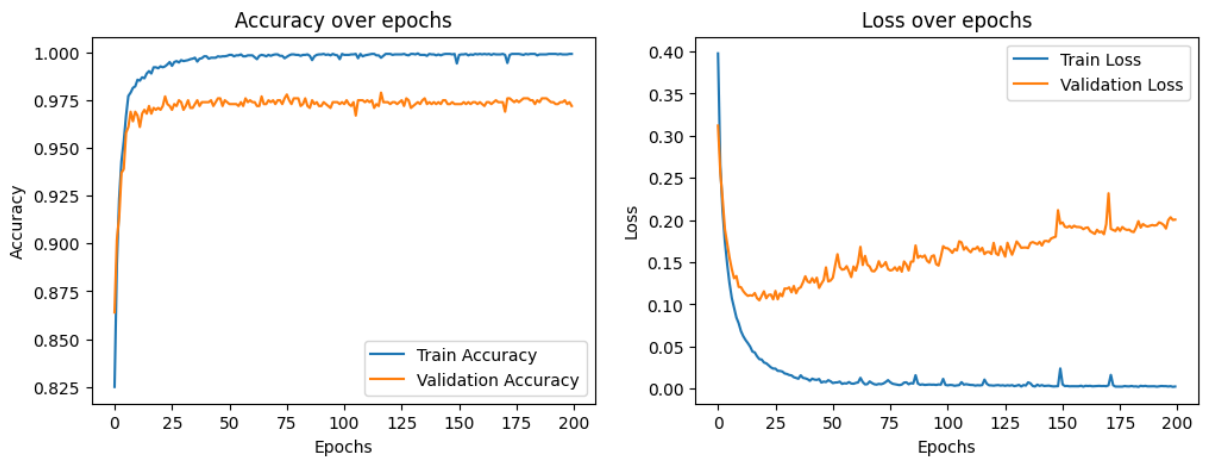
Cette matrice de confusion montre la performance du modèle de classification. Il y a 678 classifications correctes pour la classe zéro (0) et 270 pour la classe un (1). Par contre, le modèle s'est trompé dans 20 cas en classant la classe zéro comme un, et dans 32 cas en classant la classe un comme zéro. Globalement, le modèle montre une bonne performance avec peu d'erreurs.

**5.9.3 Réseau Perceptron multicouche (MLP)**

Les résultats du modèle MLP n'ont pas donné d'excellents résultats par rapport à RNN (LSTM).

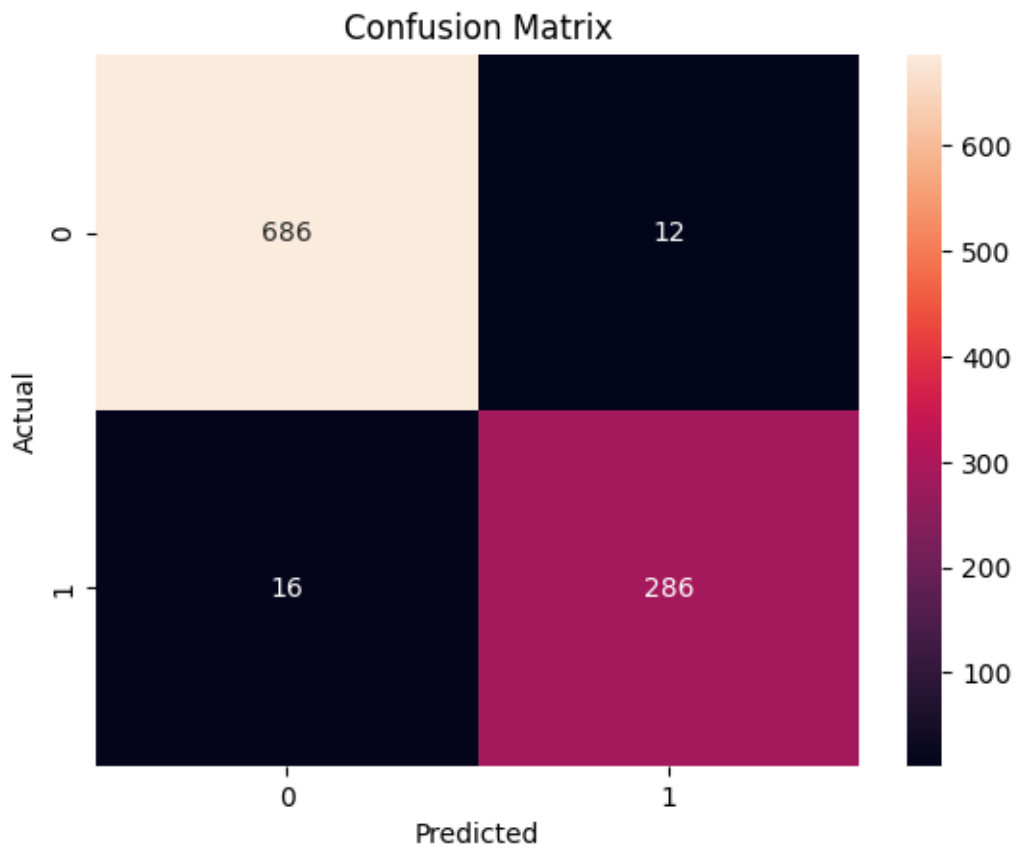
```
32/32 [=====] - 0s 1ms/step
Accuracy: 0.972
```

**Figure 44:** Accuracy du MLP



**Figure 45:** Accuracy et Loss

Le modèle montre de bonnes performances sur les données d'entraînement (avec une haute précision et une faible perte), mais il souffre d'une augmentation de la perte sur les données de validation après plusieurs étapes d'entraînement. Il est possible d'améliorer les performances sur les données de validation.



**Figure 46:** Résultat du Modèle MLP

### Explication de la matrice:

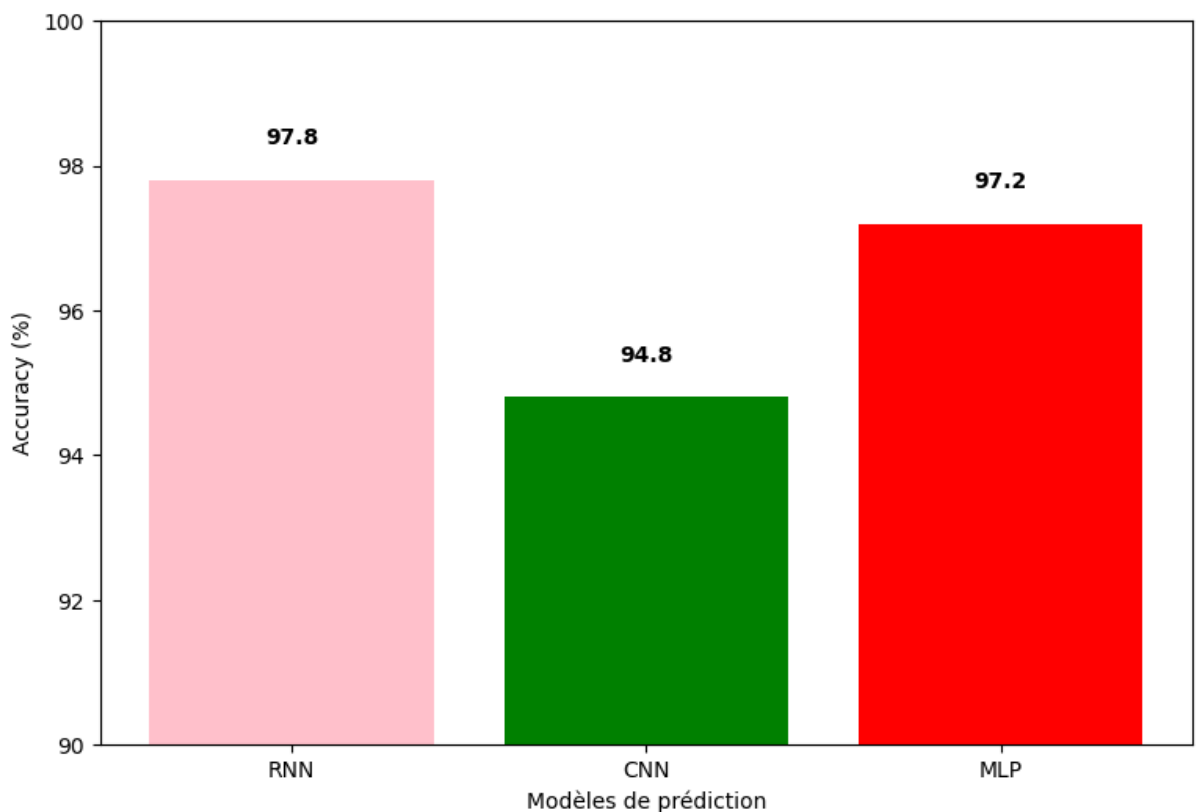
(Étiquette 0 = «Pas IC» et Étiquette 1 = «IC»)

Cette matrice de confusion montre la performance du modèle de classification. Il y a 686 classifications correctes pour la classe (0) et 286 classifications correctes pour la classe (1). D'autre part, le modèle a fait 12 erreurs en classant la classe zéro comme un, et 16 erreurs en classant la classe un comme zéro. En général, le modèle montre une bonne performance avec un nombre réduit d'erreurs.

## 5.9.4 Comparaison entre le modèle RNN(LSTM) et les modèles 1D CNN et MLP

### Accuracy

Cet histogramme représente les résultats obtenus selon au critère d'accuracy:



**Figure 47:** Résultat obtenu selon l'accuracy

## 5.10 Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, nous avons présenté une nouvelle architecture appelée RNN(LSTM), grâce à laquelle nous avons pu analyser des données médicales afin de prédire l'insuffisance cardiaque. Nous avons utilisé un dataset contenant 5000 enregistrements de données et avons également effectué une comparaison entre les performances des modèles RNN(LSTM), 1D CNN et MLP dans l'analyse et la prévision de l'IC. Les performances du RNN(LSTM) étaient excellentes par rapport à celles du 1D CNN et du MLP, ce qui s'explique par la capacité du RNN(LSTM) à analyser et prédire efficacement les séries temporelles.

# **Chapitre 6: Développement d'une application de prédiction de l'insuffisance cardiaque**

## **6.1 Introduction**

Ce chapitre présentera le fonctionnement complet de l'application de prédiction de l'insuffisance cardiaque. Tout d'abord, nous allons visualiser le diagramme de séquence pour comprendre le fonctionnement de l'application. Ensuite, nous illustrerons notre travail avec des captures d'écran des interfaces les plus importantes de notre application.

## **6.2 Objectif de l'Application**

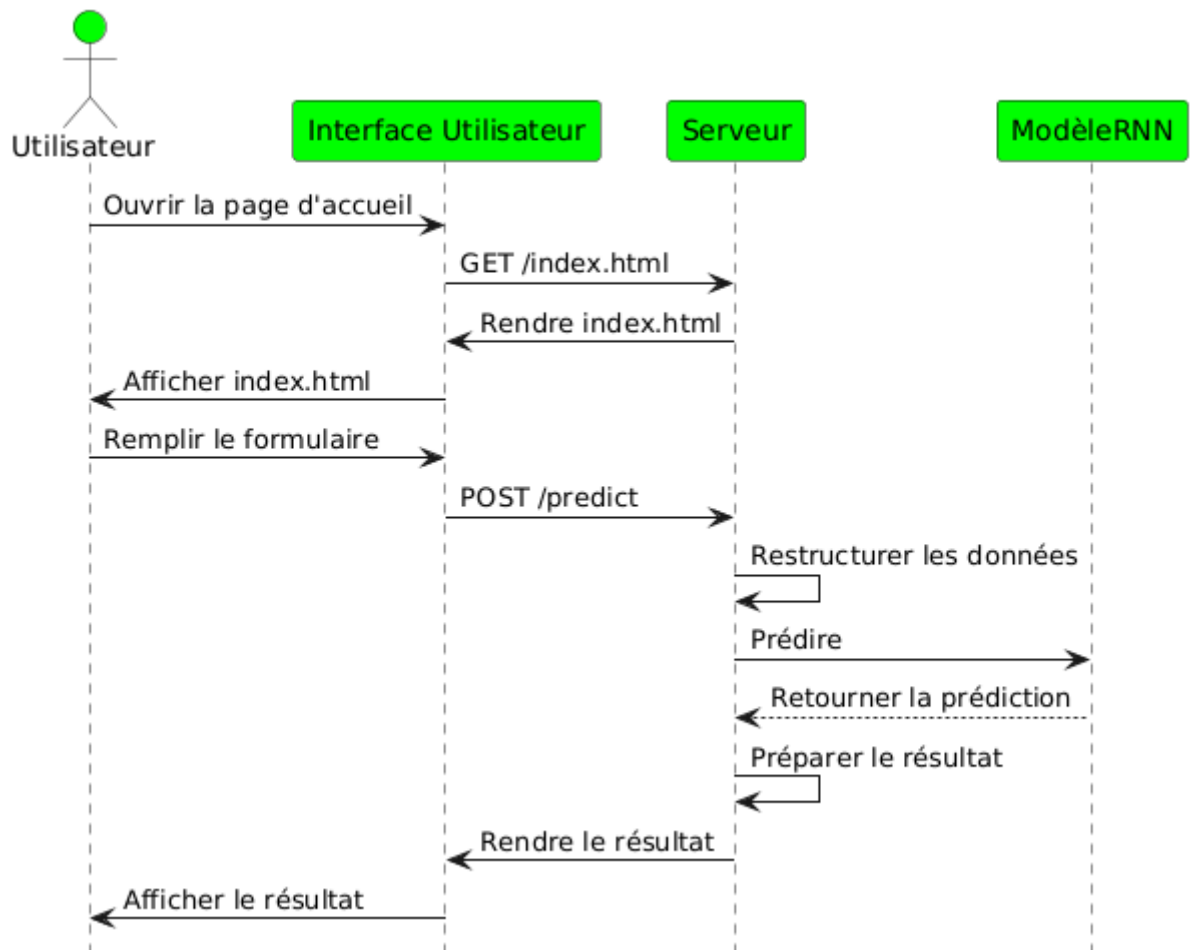
L'objectif de cette application est de fournir un outil interactif permettant aux utilisateurs de saisir leurs données de santé via un formulaire simplifié. L'application analyse ces données à l'aide d'un modèle RNN pour prédire la probabilité de l'insuffisance cardiaque, et affiche les résultats de manière compréhensible pour aider les utilisateurs à prendre des décisions de santé éclairées.

## **6.3 Diagramme de séquence**

Un diagramme de séquence est une forme de diagramme d'interaction, car il expose la manière dont plusieurs objets interagissent et dans quel ordre. Ces schémas sont employés à la fois par les programmeurs et les responsables d'entreprise afin d'évaluer les exigences d'un nouveau système ou de documenter un processus déjà en place. On appelle parfois les diagrammes de séquence diagrammes d'événements ou scénarios d'événements [59].

### **6.3.1 Processus de Prédiction avec le Modèle RNN**

L'utilisateur ouvre la page, remplit le formulaire et envoie les données. Le serveur traite les données, les envoie au modèle RNN pour la prédiction, puis renvoie le résultat à afficher à l'utilisateur (Figure 48).



**Figure 48:** Diagramme de séquence du système

## 6.4 Outils utilisés

**Google Colab** est un produit de Google Research similaire aux carnets Jupyter, permettant aux développeurs d'écrire et d'exécuter des programmes Python directement depuis un navigateur web [37].

**Le langage Python** est un langage de programmation open source, multiplateforme et orienté objet. Grâce à ses bibliothèques spécialisées, Python est polyvalent et peut être utilisé dans divers domaines tels que le développement logiciel, l'analyse de données et la gestion des infrastructures [35].

### Bibliothèques Python

Les bibliothèques utilisées [36] :

- **Pandas** est la bibliothèque la plus complète en ce qui concerne la manipulation de données.
- **Numpy** contient des modules de gestion de données et de calcul. Elle permet de gérer facilement des bases de données.
- **Scikit learn**, est le module de machine learning. Cette bibliothèque permet d'effectuer d supervisé ou non-supervisé.
- **TensorFlow** donne accès à des fonctionnalités et des techniques de Deep Learning , mais on reproche souvent à ce framework d'être un peu compliqué à prendre en main.
- **Matplotlib** est un module de visualisation de données très pratique, car il permet de créer des graphiques représentant les données sur lesquelles tu travailles en seulement une ligne de code.
- **Seaborn** est une extension de Matplotlib. C'est un outil plus avancé qui permet de créer des graphiques relationnels entre deux variables ainsi que des graphiques de distribution.

Le **HTML**, créé en 1991, est l'acronyme de "HyperText Markup Language", traduit en français par "langage de balisage hypertexte". C'est un langage de balisage qui permet de structurer et de définir les différents contenus d'une page web [38].

Le **CSS**, créé en 1996, soit cinq ans après le HTML, est l'acronyme de "Cascading StyleSheets", traduit en français par "feuilles de styles en cascade". Contrairement au HTML qui définit et structure les éléments d'une page, le CSS est utilisé pour mettre en forme ces éléments en leur appliquant des styles [38].

**Flask** est un framework web léger en Python, offrant des outils et des fonctionnalités pratiques pour simplifier la création d'applications web. Il apporte aux développeurs une grande flexibilité [39].


## 6.5 Présentation de l'application

Cette application permet aux utilisateurs de saisir leurs informations médicales afin de prédire la probabilité de développer une maladie cardiaque. Grâce à l'intelligence artificielle et à un modèle RNN avancé, l'application fournit une analyse rapide et précise pour aider à la prise de décisions.

- **Page de prédiction**

Cette page est une interface de prédiction de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un modèle d'apprentissage automatique. Elle contient un formulaire permettant à l'utilisateur de saisir ses données médicales, lesquelles sont ensuite utilisées pour prédire la probabilité de développer une insuffisance cardiaque (Figure 49).

### Prédiction de l'Insuffisance Cardiaque



Âge :

Anémie (1=Oui, 0=Non) :

Créatine Phosphokinase :

Diabète (1=Oui, 0=Non) :

Fraction d'Éjection :

Hypertension (1=Oui, 0=Non) :

Plaquettes :

Créatinine Sérique :

Sodium Sérique :

Sexe (1=Homme, 0=Femme) :

Tabagisme (1=Oui, 0=Non) :

Temps depuis le diagnostic (jours) :

**Figure 49:** Page de prédiction de L'IC

- **Cas où la prédiction est "Il ne souffrira pas d'insuffisance cardiaque"**

Cette page affiche un modèle pour prédire l'insuffisance cardiaque sur la base des données médicales saisies par l'utilisateur. Le modèle prédit que le patient ne présente aucun risque d'insuffisance cardiaque sur la base des données d'entrée (Figure 50).

### Prédiction de l'Insuffisance Cardiaque



Âge :

Anémie (1=Oui, 0=Non) :

Créatine Phosphokinase :

Diabète (1=Oui, 0=Non) :

Fraction d'Éjection :

Hypertension (1=Oui, 0=Non) :

Plaquettes :

Créatinine Sérique :

Sodium Sérique :

Sexe (1=Homme, 0=Femme) :

Tabagisme (1=Oui, 0=Non) :

Temps depuis le diagnostic (jours) :

**Résultat de la prédiction: Il ne souffrira pas d'insuffisance cardiaque.**

**Figure 50:** Page de prédiction cas "Il ne souffrira pas d'insuffisance cardiaque"

- **Cas où la prédiction est "Il souffrira d'insuffisance cardiaque"**

Cette page affiche un modèle pour prédire l'insuffisance cardiaque sur la base des données médicales saisies par l'utilisateur. Le modèle prédit que le patient souffrira d'insuffisance cardiaque sur la base des données d'entrée (Figure 51).

**Prédiction de l'Insuffisance Cardiaque**



Âge :

Anémie (1=Oui, 0=Non) :

Créatine Phosphokinase :

Diabète (1=Oui, 0=Non) :

Fraction d'Éjection :

Hypertension (1=Oui, 0=Non) :

Plaquettes :

Créatinine Sérique :

Sodium Sérique :

Sexe (1=Homme, 0=Femme) :

Tabagisme (1=Oui, 0=Non) :

Temps depuis le diagnostic (jours) :

**Résultat de la prédiction: Il souffrira d'insuffisance cardiaque.**

**Figure 51:** Page de prédiction cas" Il souffrira d'insuffisance cardiaque"

## 6.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté un diagramme de séquence détaillé pour illustrer le fonctionnement de notre application. De plus, nous avons exploré en détail le processus de prédiction de l'insuffisance cardiaque, grâce à des exemples visuels de l'interface de l'application. Ces éléments ont permis une compréhension approfondie de la manière dont notre système utilise les données pour fournir des prédictions précises et des fonctionnalités d'interface utiles et intuitives aux utilisateurs.

# Conclusion générale

L'insuffisance cardiaque demeure l'une des maladies les plus graves, causant chaque année des pertes tragiques à l'échelle mondiale. Dans le cadre de ce travail, nous avons développé un modèle intelligent basé sur l'apprentissage profond pour prédire cette maladie. En utilisant des réseaux neuronaux récurrents (RNN) avec des unités LSTM, notre modèle a démontré une remarquable précision prédictive. Cette approche permet non seulement un diagnostic précoce mais aussi une intervention thérapeutique opportune, essentielle pour améliorer les résultats cliniques. Le modèle RNN(LSTM) a montré son efficacité par rapport aux modèles 1D CNN et MLP, car nous avons appliqué la technique d'apprentissage profond RNN(LSTM) à un ensemble de données énormes liées à l'insuffisance cardiaque. Le RNN(LSTM) est l'un des meilleurs algorithmes d'analyse et de prévision, car il fournit des résultats très précis, ce qui nous pousse à l'utiliser dans les prédictions.

En complément, l'application que nous avons développée est conviviale et adaptable, offrant une interface intuitive pour les utilisateurs. Nos tests ont confirmé son excellence dans la prédiction de l'insuffisance cardiaque, renforçant sa valeur potentielle pour une utilisation clinique et quotidienne.

De plus, ce travail ouvre la voie à de futures recherches visant à améliorer encore la précision et l'interprétabilité des modèles prédictifs. L'intégration d'autres types de réseaux neuronaux ou l'exploration de combinaisons hybrides avec des techniques de machine learning classiques pourraient offrir des résultats encore plus prometteurs. De même, l'adaptation de notre modèle à des environnements cliniques réels, avec des données en temps réel, représente un axe d'exploration important pour une utilisation plus large et une prise de décision plus rapide et précise par les professionnels de santé.

## Bibliographie

- [1] Introduction aux maladies cardiaques [en ligne]. Disponible sur : <https://www.centrecardiolaval.com/2024/02/22/comprendre-et-combattre-les-maladies-cardiaques/> (consulté le 20/03/2024).
- [2] Le cœur [en ligne]. Disponible sur : <https://cardio-caen.fr/votre-sante-cardio-vasculaire/comprendre-son-coeur/> (consulté le 20/03/2024).
- [3] Cœur [en ligne]. Disponible sur : <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-anatomie-et-examens/2526844-coeur-anatomie-role-operation-maladies-cardiovasculaires/> (consulté le 21/03/2024).
- [4] Rôle du cœur [en ligne]. Disponible sur : <https://www.passeportsante.net/fr/parties-corps/Fiche.aspx?doc=coeur> (consulté le 25/03/2024).
- [5] Fonctionnement du cœur [en ligne]. Disponible sur : <https://www.la-vie-naturelle.com/blog/post/comment-fonctionne-le-coeur> (consulté le 05/04/2024).
- [6] Rythme cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sante-sur-le-net.com/maladies/cardiologie/generalites-coeur/> (consulté le 05/04/2024).
- [7] Circulation du sang dans le cœur [en ligne]. Disponible sur : <https://www.chuv.ch/fr/transplantation/cto-home/patients-et-familles/coeur/anatomie-et-physiologie#:~:text=Le%20c%C5%93ur%20est%20un%20organe,deux%20parties%2C%20gauche%20et%20droite> (consulté le 06/04/2024).
- [8] Réseau coronaire artériel [en ligne]. Disponible sur : <https://www.sante-sur-le-net.com/maladies/cardiologie/generalites-coeur/> (consulté le 07/04/2024).
- [9] Insuffisance cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://swissheart.ch/fr/maladies-et-urgences/maladies-de-c%C5%93ur-et-attaque-c%C3%A9brale/insuffisance-cardiaque> (consulté le 08/04/2024).
- [10] Insuffisance cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://recap-ide.blogspot.com/2013/11/linsuffisance-cardiaque.html> (consulté le 08/04/2024).
- [11] Arythmies cardiaques [en ligne]. Disponible sur : <https://www.icm-mhi.org/fr/soins-et-services/maladies-cardiovasculaires/arythmies-cardiaque> (consulté le 12/04/2024).
- [12] Arythmie cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://acteurdemasante.lu/fr/maladies-du-coeur/les-maladies-cardiaques/arythmies-cardiaques/> (consulté le 12/04/2024).
- [13] L'arrêt cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://www.santemagazine.fr/sante/maladies/maladies-cardiovasculaires/arret-cardiaque-comprendre-pourquoi-le-coeur-sarrete-1023254> (consulté le 13/04/2024).
- [14] L'arrêt cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://www.cardioseccours.fr/content/13-arret-cardiaque> (consulté le 12/04/2024).

- [15] L'infarctus du myocarde [en ligne]. Disponible sur : <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-anatomie-et-examens/2526844-coeur-anatomie-role-operation-maladies-cardiovasculaires/> (consulté le 14/04/2024).
- [16] L'infarctus du myocarde [en ligne]. Disponible sur : <https://cnfs.ca/pathologies/infarctus-du-myocarde> (consulté le 20/04/2024).
- [17] Maladies vasculaires [en ligne]. Disponible sur : <https://www.fondation-recherche-cardio-vasculaire.org/votre-sante-cardio-vasculaire/les-maladies-cardio-vasculaires/quelles-sont-ces-maladies/#:~:text=Une%20maladie%20cardio%2Dvasculaire%20est,%C3%A0%20l'int%C3%A9rieur%20du%20cerveau> (consulté le 20/04/2024).
- [18] Les causes de L'IC [en ligne]. Disponible sur : <https://www.medtronic.com/fr-fr/patients/pathologies/insuffisance-cardiaque.html> (consulté le 21/04/2024).
- [19] NOLL, G. (2003). *Prévention de l'insuffisance cardiaque*. BMS, 84, p. 48.
- [20] Mesure des NT-proBNP [en ligne]. Disponible sur : <https://microbiologie-clinique.com/tests-de-peptides-natriuretiques-bnp-nt-probnp.html> (consulté le 22/04/2024).
- [21] Electrocardiogramme (ECG) [en ligne]. Disponible sur : <https://cancer.ca/fr/treatments/tests-and-procedures/electrocardiogram-ecg> (consulté le 22/04/2024).
- [22] Electrocardiogramme (ECG) [en ligne]. Disponible sur : <https://bertrand-rostoker.docvitae.fr/activite-electrique-du-coeur---electrocardiogramme/electrocardiogramme-ecg> (consulté le 22/04/2024).
- [23] Echocardiogramme [en ligne]. Disponible sur : <https://www.medicaim.com/fr/procedure/echocardiogramme> (consulté le 05/05/2024).
- [24] Echocardiogramme [en ligne]. Disponible sur : <https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89chocardiographie> (consulté le 05/05/2024).
- [25] Epreuve d'effort [en ligne]. Disponible sur : <https://www.avf-biomedical.com/blog/conseils/quest-ce-qu-une-epreuve-d-effort-et-comment-se-deroule-t-elle/> (consulté le 05/05/2024).
- [26] Epreuve d'effort [en ligne]. Disponible sur : <https://www.icpc.fr/imageries-examens/epreuve-deffort/> (consulté le 05/05/2024).
- [27] Imagerie par résonance magnétique (IRM) cardiaque [en ligne]. Disponible sur : <https://www.msmanuals.com/fr/accueil/troubles-cardiaques-et-vasculaires/diagnostic-des-maladies-cardiovasculaires/imagerie-par-r%C3%A9sonance-magn%C3%A9tique-irm-du-c%C5%93ur> (consulté le 06/05/2024).
- [28] IRM [en ligne]. Disponible sur : [https://www.maxisciences.com/sante/irm-cardiaque-definition-comment-se-passe-un-examen-et-y-a-t-il-des-risques\\_art39506.html](https://www.maxisciences.com/sante/irm-cardiaque-definition-comment-se-passe-un-examen-et-y-a-t-il-des-risques_art39506.html) (consulté le 06/05/2024).

[29] Qu'est-ce qu'un support vector machine (SVM) ? [en ligne]. Disponible sur : <https://www.intelligence-artificielle-school.com/ecole/technologies/support-vector-machine-definition/> (consulté le 06/05/2024).

[30] Arbre de décision [en ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre\\_de\\_d%C3%A9cision](https://fr.wikipedia.org/wiki/Arbre_de_d%C3%A9cision) (consulté le 07/05/2024).

[31] Réseaux neuronaux profonds [en ligne]. Disponible sur: <https://www.lemagit.fr/definition/Reseau-de-neurones-artificiels-RNA> (consulté le 07/05/2024).

[32] BOTROS, J., MOURAD-CHEHADE, F., & LAPLANCHE, D. (n.d.). *Détection de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un réseau neuronal convolutif via les signaux ECG*. Laboratoire Informatique et Société Numérique (LIST3N), Université de Technologie de Troyes (UTT), 12 rue Marie Curie, CS 42060, 10004 Troyes CEDEX, France; Pôle Santé publique, Hôpitaux Champagne Sud (HCS), Troyes, France

[33] BOTROS, J., MOURAD-CHEHADE, F., & LAPLANCHE, D. (2023). *Stratification automatique de l'insuffisance cardiaque à l'aide d'un réseau neuronal convolutif*. Colloque en TéléSANTé et dispositifs biomédicaux, Université Paris 8, CNRS, Jun 2023, Paris Saint Denis, France. HAL Id: hal-04220664. Soumis le 28 septembre 2023

[34] MOROZ, H. (2023). *An Attention-based Deep Learning Approach for Lifespan Assessment of Heart Failure Risk Among Patients with Congenital Heart Disease*. Division of Experimental Medicine, Faculty of Medicine, McGill University, Montreal, August 2023

[35] Python [en ligne]. Disponible sur: <https://www.futura-sciences.com/tech/definitions/informatique-python-19349/> (consulté le 07/05/2024).

[36] Bibliothèques Python [en ligne]. Disponible sur : <https://www.data-bird.co/blog/bibliotheque-python> (consulté le 08/05/2024).

[37] Qu'est-ce que Google Colab [en ligne]. Disponible sur : <https://geekflare.com/fr/google-colab/> (consulté le 08/05/2024).

[38] Définitions et usages du HTML et du CS [en ligne]. Disponible sur : [https://www.pierre-giraud.com/html-css-apprendre-coder-cours/definition-utilisation/#google\\_vignette](https://www.pierre-giraud.com/html-css-apprendre-coder-cours/definition-utilisation/#google_vignette) (consulté le 08/05/2024).

[39] Flask [en ligne]. Disponible sur: <https://python.developpez.com/tutoriel/intro-flask-python3/> (consulté le 09/05/2024).

[40] Intelligence artificielle et médecine [en ligne]. Disponible sur : <https://www.netapp.com/fr/artificial-intelligence/ai-in-medicine/> (consulté le 09/05/2024).

[41] ZAHARCHUK, G., et al. (2018). *Deep learning in neuroradiology*. American Journal of Neuroradiology, 39(10), pp. 1776-1784.

[42] Qu'est-ce que l'apprentissage automatique?, Qu'est-ce que l'apprentissage profond ? [en ligne].

Disponible sur : <https://blog.pangeanic.com/fr/quelle-est-la-diff%C3%A9rence-entre-l'apprentissage-automatique-et-l'apprentissage-profond> (consulté le 10/05/2024).

[43] Quels sont les différents types de machine learning ? [en ligne]. Disponible sur : <https://www.syloe.com/glossaire/machine-learning/> (consulté le 10/05/2024).

[44] Algorithmes d'apprentissage automatique [en ligne].

Disponible sur : [https://www.trendmicro.com/fr\\_fr/what-is/machine-learning.html](https://www.trendmicro.com/fr_fr/what-is/machine-learning.html) (consulté le 11/05/2024).

[45] Champs d'application [en ligne]. Disponible sur : <https://www.netapp.com/fr/artificial-intelligence/what-is-machine-learning/> (consulté le 11/05/2024).

[46] Comment fonctionne le deep learning ? [en ligne]. Disponible sur : <https://blog.hubspot.fr/marketing/deep-learning> (consulté le 12/05/2024).

[47] Les différents algorithmes de Deep Learning [en ligne]. Disponible sur : <https://www.jedha.co/formation-ia/algorithmes-deep-learning> (consulté le 12/05/2024).

[48] Domaines d'application [en ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage\\_profond#:~:text=Une%20application%20du%20deep%20learning,image%20capt%C3%A9e%20par%20une%20cam%C3%A9ra](https://fr.wikipedia.org/wiki/Apprentissage_profond#:~:text=Une%20application%20du%20deep%20learning,image%20capt%C3%A9e%20par%20une%20cam%C3%A9ra) (consulté le 13/05/2024).

[49] Le futur de l'apprentissage profond [en ligne]. Disponible sur : [Disponible sur : https://www.iso.org/fr/intelligence-artificielle/apprentissage-profond-deep-learning](https://www.iso.org/fr/intelligence-artificielle/apprentissage-profond-deep-learning) (consulté le 13/05/2024).

[50] Santé et intelligence artificielle [en ligne]. Disponible sur : [:https://www.futura-sciences.com/sante/questions-reponses/corps-humain-sante-intelligence-artificielle-revolution-nous-attend-14432/](https://www.futura-sciences.com/sante/questions-reponses/corps-humain-sante-intelligence-artificielle-revolution-nous-attend-14432/) (consulté le 13/05/2024).

[51] Comparaisons clés entre l'apprentissage automatique et l'apprentissage profond [en ligne]. Disponible sur : <https://blog.pangeanic.com/fr/quelle-est-la-diff%C3%A9rence-entre-l'apprentissage-automatique-et-l'apprentissage-profond> (consulté le 13/05/2024).

[52] Qu'est-ce qu'un auto-encodeur ?, Architecture d'un auto-encodeur [en ligne]. Disponible sur : <https://blent.ai/blog/a/auto-encodeurs-deep-learning> (consulté le 15/04/2024).

[53] Apprentissage profond [en ligne]. <https://www.iso.org/fr/intelligence-artificielle/apprentissage-profond-deep-learning#toc4> (consulté le 22/04/2024).

[54] Dataset [en ligne]. Disponible sur : <https://www.kaggle.com/datasets/aadarshvelu/heart-failure-prediction-clinical-records> (consulté le 25/04/2024).

[55] Prétraitement des données [en ligne]. Disponible sur : <https://businessyield.com/fr/technology/data-preprocessing/> (consulté le 01/05/2024).

[56] Normalisation [en ligne]. Disponible sur : <https://www.alliage-ad.com/tutoriels-python/les-methodes-de-normalisation/> (consulté le 01/05/2024).

[57] Matrice de confusion [en ligne]. Disponible sur : <https://www.geeksforgeeks.org/visualize-confusion-matrix-using-caret-package-in-r/> (consulté le 01/05/2024).

[58] La formule d'Accuracy [en ligne]. Disponible sur : <https://www.datacamp.com/tutorial/what-is-a-confusion-matrix-in-machine-learning> (consulté le 03/05/2024).

[59] Diagramme de sequence [en ligne]. Disponible sur : <https://www.lucidchart.com/pages/fr/diagramme-de-sequence-uml> (consulté le 10/05/2024).

[60] MLP [en ligne]. Disponible sur : <https://www.shiksha.com/onlinecourses/articles/understanding-multilayer-perceptron-mlp-neural-networks/> (consulté le 14/05/2024).