

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -

Faculté de TECHNOLOGIE



THESE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT 3^{ème} Cycle**

En : Télécommunications

Spécialité : Systèmes et Réseaux de Télécommunications

Par : Lakhdari Kheira

Sujet

Conception et Développement d'un Assistant Mobile Intelligent pour le Suivi des Maladies Chroniques

Soutenue publiquement, le 17 / 12 / 2020 , devant le jury composé de :

BORSALI Riad	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
MERZOUGUI Rachid	Professeur	Univ. Tlemcen	Directeur
SLIMANI Hicham	MCB	Univ. Tlemcen	Co-directeur
SLIMANE Zohra	MCA	Centre Universitaire Ain Temouchent	Examinatrice
BENADDA Belgacem	Professeur	Univ. Tlemcen	Examineur
HADJILA Mourad	MCA	Univ. Tlemcen	Examineur

**Conception et Développement d'un Assistant Mobile
Intelligent pour le Suivi des Maladies Chroniques.**

Auteur : LAKHDARI Kheira
Prof. Responsable : MERZOUGUI Rachid
Co-directeur : SLIMANI Hicham
Sujet proposé au sein du labo *STIC*



الْحَمْدُ لِلَّهِ

الَّذِي بِنِعْمَتِهِ تَتِمُّ الصَّالِحَاتُ

A mon fils Ahmed Zakaria ;

A ma petite famille ;

A mes parents ;

A ma sœur, mes frères ;

Et toute ma famille et mes amies.

“Creativity is just connecting things.”

— *Steve Jobs*

Remerciements

J'exprime ma gratitude à M^r Rachid MERZOUGUI, Professeur et M^r Hicham SLIMANI, Maître de conférences, à l'Université Abou-bekr Belkaïd, Tlemcen, directeur et co-directeur de la présente Thèse. Cette œuvre a été accompli au sein du Laboratoire STIC, grâce à leurs expertises, leur orientation, et leur encadrement particulier.

Je tiens à exprimer mes remerciements à M^r Riad BORSALI, Professeur à l'université Abou-bekr Belkaïd Tlemcen, d'honorer la présidence de ce jury. Je tiens à remercier également, M^{me} Zohra SLIMANE, Maître de conférences au Centre Universitaire Belhadj Bouchaib Ain Temouchent, M^r Belgacem BENADDA, Professeur et M^r Mourad HADJILA, Maître de Conférences, à l'université de Tlemcen, d'avoir accepté d'examiner ce travail.

J'exprime aussi mes remerciements au Médecin Cardiologue M^r BENOSMANE, pour ses recommandations, ses suggestions et la transmission des données essentielles à l'étude du contexte de recherche et à la validation des solutions proposées.

Je remercie Mr. Adel BEN MNAOUER, Professeur à l'Université Canadienne de Dubai (CUD) pour son assistance et sa collaboration volontairement offertes, ayant un rôle radical à la réalisation des modèles analytiques de base de cette étude. Je remercie également M^{me} Daniela Tost Pardell, Professeur à l'Université Polytechnique de Catalogne (UPC), d'avoir accepté m'encadrer durant mon stage au sein du Centre de Recherche en Ingénierie Biomédicale (CREB) et également de m'introduire au domaine de Gamification des applications mobiles médicales.

A tous les membres de laboratoire STIC, de CREB et de CUD, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement de cette œuvre, un grand merci.

تلخيص

في ظل التزايد الملحوظ للأمراض المزمنة وما تسببه من مخاطر مهددة للصحة العامة، تتزايد في الضفة الأخرى الحلول المقترحة لمساعدة المرضى على مواجهة الصعوبات اليومية باستعمال أحدث التطورات التكنولوجية، لكنها غالباً ما تتجاهل تسليط الضوء على الاحتياجات الحقيقية للمرضى.

في هذا السياق تدرج منصتنا المقترحة "**SMILE** (بسملة)"، التي تدمج عدداً ملحوظاً من أحدث تقنيات الذكاء الاصطناعي (AI)، التطبيقات الجوالية و تقنيات الاتصال المتطورة.

متكونة من نموذج أولي لجهاز مطور لتخطيط القلب و تطبيقين موجهين للمرضى والأطباء، تشكل **SMILE** حلاً متكاملًا يدمج ما بين الإبداع في التصميم المتمحور حول حاجيات المرضى، الدقة في التحليل و تصنيف تخطيط القلب بنسبة تتراوح ما بين 97 و 99 بالمائة، تحديد الاضطرابات و استشارة الطبيب آتياً و مرونة الاستعمال مع احترام شروط حماية المعلومات المتداولة.

تمثل هذه الأطروحة نموذجاً للاستغلال الجيد للإمكانات المطروحة حالياً، بما فيه نفع للمرضى خاصة و للإنسان عامة، بعيداً عن ما يمكن أن تحمله هذه التطورات من جوانب سلبية.

يندرج عملنا ضمن نشاطات فريق النظم الذكية والمنزلية (SID) التابع لمخبر نظم وتكنولوجيات الإعلام والاتصال (STIC) بجامعة تلمسان.

كلمات مفتاحية - الجوال، المرضى بأمراض مزمنة، تخطيط القلب، اضطرابات قلبية، التصنيف، الذكاء الاصطناعي، المساعدة عن بعد، تطبيق آني، جودة الحياة.

Résumé

Au moment de la croissance remarquable des maladies chroniques et leurs risques engendrés à la santé publique, les solutions proposées s'accroissent dans l'autre côté pour aider les patients à battre leurs difficultés quotidiennes. Cependant, les lacunes de ces solutions restent toujours pertinentes et posent une variété de problématiques.

Dans ce contexte, notre plateforme proposée "*Self-controlled Mobile Intelligent Low-cost ECG (SMILE)*" introduit un nombre important des nouvelles avancées de "l'Intelligence Artificielle (AI)", des systèmes et des applications mobiles.

Composée d'un prototype d'un ECG ambulant, en plus de deux applications mobiles dédiées aux patients et aux médecins, **SMILE** représente une solution plus profitable, qui regroupe des caractéristiques très avantageuses. Ces performances sont symbolisées par une haute précision de 97% à 99% des modèles de classification proposés pour la détection et l'analyse des anomalies de l'ECG, en plus d'une architecture innovante centrée autour des besoins quotidiens des patients chroniques.

Les prototypes faciles, fiables, adaptés et accessibles de l'ECG et des applications mobiles proposées offrent une téléassistance médicale intelligente, en temps réel, adaptative, sécurisée et adoptable par les patients.

Cette Thèse représente une initiative pluridisciplinaire, basée sur les technologies les plus avancées dans le but d'améliorer la qualité de vie (QoL) des patients chroniques et des individus en général.

Cette œuvre appartient aux travaux scientifiques de l'équipe de recherche "Systèmes Intelligents et Domotique (SID)" du laboratoire de recherche "Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC)" de l'Université de Tlemcen.

Mots-clés — Mobile, Patients chroniques, ECG, Anomalies Cardiaques, Classification, AI, Téléassistance, Application en temps réel, QoL.

Abstract

Regarding the remarkable increasing numbers of chronic diseases and the risks that can be caused to the public health, several solutions are trying to help chronic patients during their everyday difficulties.

In the same context, our proposed platform "*Self-controlled Mobile Intelligent Low-cost ECG (SMILE)*" combines an interesting number of the latest technologies of "Artificial Intelligence (AI)", mobile applications and systems.

Composed of a mobile prototype of the ECG device and two mobile applications (for patients and healthcare professionals), **SMILE** represent an optimal solution. It combines the creativity of the patient-centred design approach, the high accuracy of the ECG data analysis (between 97% and 99%), and the real time medical interactions.

The easiness, the security, the adaptability, the accessibility and the adoption of **SMILE** represent a high level medical intelligent assistance for chronic patients.

The presented Thesis is an initiative using the latest advancements of technology to enhance the "Quality of Life (QoL)" of chronic patients and human beings in general.

This work belongs to the scientific researches led by " Intelligent Systems and House automation (ISH)" research group of "Systems and Technologies of Information and Communication (STIC)" laboratory of Tlemcen University.

Keywords — Mobile, Chronic Patients, ECG, Cardiac Abnormalities, Classification, AI, Remote Assistance, Real Time Application, QoL.

Table des matières

Remerciement	6
Résumé en arabe	7
Résumé	8
Abstract	9
Table des matières	11
Table des figures	16
Liste des tableaux	19
Glossaire	20

Introduction générale	23
------------------------------------	----

Première Partie : Problématique

Chapitre I : Etat de l'art des technologies de la M-health.

I.1 – E-health	27
I.2 – M-health	27
I.3 – Apports de la M-health	28
I.3.1 - Mobilité	28
I.3.2 - Accessibilité	42
I.3.4 - Faibles coûts	28
I.3.5 - Qualité de services (QoS)	28
I.4 – Enjeux de la mise en œuvre d'une approche M-health	29
I.5 – Etat de l'art de la M-health	29
I.5.1 - Technologies de la M-health	29
I.5.1.1 - Réseaux sans fil	29
I.5.1.2 - Protocoles et standards dédiés à la santé	30
I.5.1.3 - Géo-localisation	32
I.5.1.4 - IoT	33
I.5.1.5 - Science des données et intelligence artificielle	35

I.5.1.6 - Réalité virtuelle et augmentée	37
I.5.1.7 - Applications mobiles	38
I.5.1.8 - Technologies du Cloud	39
I.5.2 - Services de santé de nouvelle génération	40
I.5.3 - Exemples des solutions de M-health	41
I.5.3.1 - Lacunes des solutions proposées	47
I.6 – Nouvelles notions des technologies en santé	47
I.7 – Conclusion.....	48

Chapitre II : M-health au service des maladies chroniques.

II.1 - Maladies chroniques	50
II.1.1 - Maladies cardiovasculaires	50
II.1.1.1 - Facteurs de risque	50
II.1.1.2 - Signal ECG	50
II.1.1.3 - Détection des anomalies cardiaques à partir de l'ECG	51
II.1.1.4 - Lecture d'un ECG	52
II.1.1.5 - La technologie au service de la cardiologie.....	53
II.1.1.6 - M-health et cardiologie.....	53
II.1.2 - Maladies neurocognitives	54
II.1.2.1 - Radiologie et maladies neurocognitives	54
II.1.2.2 - Le rôle de la M-health dans le domaine des neurosciences cognitives	55
II.2 - Lacunes des technologies M-health face aux maladies chroniques.....	55
II.3 - Conclusion	55

Chapitre III : Problématiques, motivations et contributions.

III.1 - Contexte général.....	57
III.2 - Problématique globale et motivations	57
III.3 - Objectifs	57
III.4 - Méthodologie	58
III.4.1 - Etude approfondie de l'expérience des patients chroniques	58
III.4.2 - Exigences des experts médicaux.....	59
III.4.3 - Analyse des travaux connexes	59
III.4.4 - Design UX	60
III.4.5 - Design de l'architecture globale	61
III.5 - Contributions et solution à chaque problématique	62
III.6 - Conclusion.....	64
Références.....	65

Deuxième Partie : Solution Proposée

Chapitre I : Classification des données médicales, des signaux et des images

I. 1 - Classification, une approche multisectorielle	71
I. 1.1 - Classification d'un signal ECG.....	71
I. 1.1.1 - Perceptron	74
I. 1.1.2 - Multi-Layer Perceptron.....	75
I. 1.1.3 - Notions de ML et de DL.....	75
I. 1.1.4 - Principaux types de la technologie DL	76
I. 1.1.5 - Rôle des données	77
I. 1.1.6 - Création d'un modèle DL	77
I.2 - Approche algorithmique	79
I.2.1 - Langage de programmation	79
I.2.2 - Environnements de développement et auxiliaires	79
I.2.3 - Bases de données.....	80
I.2.4 - Concept général	81
I.2.5 - Méthodologie.....	81
I.3 - Résultats et performances	88
I.4 - Présentation de la base des données "PTB-DB"	91
I.4.1 - Etapes et résultats de classification	92
I.5 - Transformation du signal aux images	93
I.6 - Classification des images	94
I.6.1 - Augmentation et prétraitement des images	94
I.6.2 - Architecture du modèle proposé.....	95
I.6.3 - Résultats et performances	95
I.7 - Conclusion	96

Chapitre II : Collection des données médicales via un prototype mobile de l'ECG

I.1 - Holter ECG, notions et actualités	98
II.2 - Jargon technique	99
II.2.1 - Systèmes Embarqués	99
II.2.2 - Microcontrôleurs	99
II.2.3 - Cartes électroniques Arduino	100
II.2.4 - Arduino IDE	101
II.2.5 - Protocoles de communication	101

II.3 - Réalisation du prototype proposé	101
II.3.1 - Détection et affichage	102
II.3.2 - Envoi des données	102
II.3.3 - Enregistrement des données	102
II.3.4 - Prototypage et connexions	103
II.4 - Contributions	107
II.5 - Conclusion	107

Chapitre III : Implémentation des applications interactives

III.1 - Jargon Logiciel	109
III.1.1 - Architecture de la plateforme Android.....	109
III.1.2 - Environnement de développement	110
III.1.3 - Capteurs sur Android Studio	111
III.1.4 - Bluetooth HDP.....	112
III.1.5 - Service Cloud.....	112
III.1.6 - Options Intelligentes	113
III.1.6.1 - Exécution des modèles intelligents sous Android Studio.....	113
III.2 - Structure des applications mobiles proposées	114
III.2.1 - Application "Patient"	114
III.2.1.1 - Service d'identification	114
III.2.1.2 - Service de manipulation du prototype ECG proposé	116
III.2.1.3 - Service Bluetooth	116
III.2.1.4 - Service d'affichage	116
III.2.1.5 - Services de classification et de notification	116
III.2.1.6 - Service de stockage	116
III.2.1.7 - Service de localisation	117
III.2.2 - Application "Médecin"	117
III.2.2.1 - Visualisation des données médicales	117
III.2.2.2 - Décision de l'expert médical	117
III.3 - Implémentation	118
III.4 - Contributions	119
III.5 - Conclusion	119
Références	120

Troisième Partie : Validation

Chapitre I : Achèvements, synthèse et validation

I.1 - Résultats et discussions	127
I.1.1 - Résultats du prototype matériel.....	127

I.1.2 - Résultats des applications mobiles	128
I.2 - Validation	134
I.2.1 - Validation technique	134
I.2.1.1 - Validation du modèle de classification.....	134
I.2.1.2 - Validation des applications mobiles.....	135
I.2.2 - Validation clinique et certification	135
I.2.3 - Validation communautaire	138
I.3 - Conclusion	141

Chapitre II : Perfectionnement, amélioration et perspectives

II.1 - Améliorations	143
II.1.1 - Technique de "Gamification"	143
II.1.1.1 - Approche pour seniors	143
II.1.1.2 - Approche pour juniors.....	144
II.1.2 - Assistance vocale intelligente	145
II.1.2.1 - Notifications vocales	145
II.1.2.2 - Téléassistance par "Chatbot "	146
II.2 - Perspectives	146
II.3 - Conclusion	147
Références	148

Conclusion générale	149
----------------------------------	-----

Annexes

A – Généralités sur les réseaux de neurones	151
A.1 – Evolution des réseaux de neurones	152
A.2 – Architectures principales des réseaux de neurones	152
A.3 – Fonctions mathématiques	154
B – Caractéristiques des composants du prototype proposé	156
B.1 – Composants électroniques.....	157
B.2 – Protocoles de communication	159
C – Réglementation de la santé digitale	160
C.1 – Normes et réglementation.....	161
D – Production Scientifique	162
D.1 – Liste des publications et des communications	163
D.2 – Publication internationale	163
Références	164

Table des figures

Première Partie

<i>FIG. I.1 - Répartition des différentes catégories de la santé digitale</i>	27
<i>FIG. I.2 - Répartition des réseaux sans fils</i>	30
<i>FIG. I.3 - Normalisation d'un système de communication dédié aux applications en santé</i>	31
<i>FIG. I.4 - Architecture du protocole HDP</i>	32
<i>FIG. I.5 - Réseau IoT et données massives</i>	34
<i>FIG. I.6 - Mode de communication pour la technologie de Wifi-Direct</i>	35
<i>FIG. I.7 - Disciplines et subdivisions de l'intelligence artificielle</i>	36
<i>FIG. I.8 - Quelques domaines d'application des technologies AR et VR</i>	38
<i>FIG. I.9 - Evolution du domaine de la santé par rapport aux développements industriels</i>	40
<i>FIG. II.1 - Allure principale d'un signal ECG</i>	51
<i>FIG. II.2 - Lecture médicale de l'ECG</i>	53
<i>FIG. II.3 - Lésions au niveau des centres de langage et de mémoire du cerveau dans le cas de l'Alzheimer</i>	54
<i>FIG. III.1 - Méthodologie de recherche</i>	58
<i>FIG. III.2 - Exemple d'une expérience clinique d'un patient</i>	60
<i>FIG. III.3 - Architecture et scénarios de notre plateforme proposée</i>	61
<i>FIG. III.4 - Synthèse des contributions majeures de SMILE</i>	64

Deuxième Partie

<i>FIG. I.1 - Comparaison entre la forme d'un neurone naturel et celle d'un perceptron</i>	75
<i>FIG. I.2 - Comparaison entre l'architecture des réseaux ML et celle des réseaux DL</i>	76
<i>FIG. I.3 - Architecture des réseaux CNN</i>	77
<i>FIG. I.4 - Subdivision des données entre les trois étapes : entraînement, validation et test</i>	78
<i>FIG. I.5 - Etapes principales pour la production et le déploiement d'un modèle de classification</i>	79
<i>FIG. I.6 - Quantité et type des données des classes de MIT-BIH</i>	81
<i>FIG. I.7 - Type, taille et usage en mémoire des données MIT-BIH</i>	82
<i>FIG. I.8 - Subdivision et pourcentage des données de chacune des 5 classes</i>	82
<i>FIG. I.9 - Exemples des données de chaque classe (n, s, v, f et q)</i>	83
<i>FIG. I.10 - Partie de la liste des annotations générées</i>	83
<i>FIG. I.11 - Echantillons du signal ECG</i>	84
<i>FIG. I.12 - Annotation d'un seul enregistrement de la base MIT-BIH</i>	84
<i>FIG. I.13 - Exemples des représentations spectrales d'un échantillon de l'ECG</i>	85
<i>FIG. I.14 - Amplification des battements de chaque classe</i>	85
<i>FIG. I.15 - Détection des complexes QRS sur un seul échantillon</i>	86
<i>FIG. I.16 - Résultats de la détection des complexes QRS</i>	86

FIG. I.17 - Représentation graphiques des résultats de la détection des complexes QRS.	87
FIG. I.18 - Paramètres des données de l'entraînement et du test.	87
FIG. I.19 - Architecture du modèle de classification proposé.	88
FIG. I.20 - Accuracy du modèle proposé sur les données de MIT-BIH.....	88
FIG. I.21 - Loss du modèle proposé sur les données de MIT-BIH.	89
FIG. I.22 - Résultats de la matrice de confusion du modèle de base (avec ReLU).	90
FIG. I.23 - Résultats de la matrice de confusion du modèle proposé (avec Leaky-ReLU).	90
FIG. I.24 - Comparaison entre les résultats de test.....	91
FIG. I.25 - Paramètres des données de la base PTB-DB.	91
FIG. I.26 - Exemples des signaux des deux classes de PTB-DB.....	91
FIG. I.27 - Résultats de précision du modèle proposé sur les données de PTB-DB.	92
FIG. I.28 - Résultats de taux de perte du modèle proposé sur les données de PTB-DB.	92
FIG. I.29 - Résultats de précision durant le test sur les nouvelles données.	92
FIG. I.30 - Résumé des résultats du modèle proposé durant le test sur les nouvelles données.....	93
FIG. I.31 - Partie des figures générées par le modèle de transformation proposé sur l'ECG normal.	93
FIG. I.32 - Partie des images IRM de la base de données utilisée.....	94
FIG. I.33 - Architecture du modèle proposé pour la classification des images IRM de cerveau.	95
FIG. I.34 - Résultats de précision du modèle proposé durant l'entraînement et la validation.	96
FIG. I.35 - Résultats du taux de pertes du modèle proposé durant l'entraînement et la validation	96
FIG. II.1 - Exemples des cartes Arduino les plus célèbres.	101
FIG. II.2 - Schéma de blocks des composants du prototype de l'ECG proposé.	102
FIG. II.3 - Placement des électrodes autour du cœur.	103
FIG. II.4 - Connexions entre le microprocesseur et le capteur de l'ECG.	103
FIG. II.5 - Connexions entre le microprocesseur et l'écran OLED.....	104
FIG. II.6 - Connexions entre le microprocesseur et le module HC-06.....	104
FIG. II.7 - Connexions entre le microprocesseur et la DS 3231.	105
FIG. II.8 - Connexions entre le microprocesseur et la carte SD.	105
FIG. II.9 - Connexions entre le microprocesseur et toutes les parties par Fritzing.	106
FIG. II.10 - Montage final du prototype primaire de l'ECG proposé.	106
FIG. III.1 - Architecture de la plateforme Android.	110
FIG. III.2 - Services et fonctionnalités de Firebase.	112
FIG. III.3 - Déploiement d'un modèle de TensorFlow dans une application mobile.....	113
FIG. III.4 - Communications entre le SDK et le NDK pour l'exécution du modèle de classification.	114
FIG. III.5 - Structure globale de l'application Patient.....	115
FIG. III.6 - Structure globale de l'application Médecin.	117
FIG. III.7 - Structure globale de SMILE lors de son implémentation.	118

Troisième Partie

FIG. I.1 - Affichage de l'ECG sur l'écran du prototype proposé.	127
FIG. I.2 - Ecrans d'accueil de souscription et d'identification.	128
FIG. I.3 - Gestion des informations sur la base des données SQLite.....	129
FIG. I.4 - Identification et authentification.	129
FIG. I.5 - Animations et guide pour un emplacement correct des électrodes.	130
FIG. I.6 - Activation du Bluetooth.	130
FIG. I.7 - Etablissement de la connexion entre l'application et le prototype (HC-06).	131

<i>FIG. I.8 - Affichage du signal ECG.</i>	131
<i>FIG. I.9 - Comparaison entre l'affichage de l'ECG par SMILE et celui par un Holter ECG.</i>	132
<i>FIG. I.10 - Exemples de détection des anomalies par le modèle proposé intégré à l'application mobil</i>	132
<i>FIG. I.11 - Résultats de géo-localisation.</i>	133
<i>FIG. I.12 - Diagramme d'identification des logiciels médicaux posé par la MHRA.</i>	136
<i>FIG. I.13 - Etat actuel de la législation des logiciels médicaux au monde.</i>	138
<i>FIG. I.14 - Fichier des informations liés au questionnaire délivré.</i>	139
<i>FIG. I.15 - Pourcentage d'adoption communautaire des technologies de M-health.</i>	139
<i>FIG. I.16 - Exemples des difficultés rencontrées par les participants.</i>	140
<i>FIG. I.17 - Pourcentage d'adoption d'une technologie basée sur le Cloud.</i>	140
<i>FIG. I.18 - Exemples des inquiétudes sur le partage des données via le Cloud</i>	141
<i>FIG. II.1 - Prototype initial de Gamification de l'emplacement des électrodes.</i>	144
<i>FIG. II.2 - Prototype initial de la scène du jeu proposé.</i>	144
<i>FIG. II.3 - Ecrans initiaux du jeu proposé.</i>	145

Annexe

<i>FIG. A.1 - Evolution historique des réseaux de DL.</i>	152
<i>FIG. A.2 - Résumé des architectures principales des réseaux de neurones.</i>	153
<i>FIG. A.3 - Fonctions d'activation utilisées dans les réseaux DL.</i>	154
<i>FIG. A.4 - Explications graphiques de Convolution, Pooling et Flattening</i>	154
<i>FIG. A.5 - Paramètres d'évaluation des performances.</i>	154
<i>FIG. B.1 - Diagrammes du capteur de l'activité cardiaque AD8232.</i>	157
<i>FIG. B.2 - Caractéristiques de la carte Arduino Nano.</i>	157
<i>FIG. B.3 - Branchement du Bluetooth HC-06.</i>	158
<i>FIG. B.4 - Branchement de l'horloge DS3231.</i>	158
<i>FIG. B.5 - Diagramme de blocks et écran OLED (SSD1306).</i>	159
<i>FIG. B.6 - Modes I2C et SPI</i>	159
<i>FIG. C.1 - Liste des projets de normalisation déjà commencés.</i>	161
<i>FIG. C.2 - Standards IEEE de AI.</i>	161

Liste des tableaux

Première Partie

TAB. I.1 – Comparaison entre les types des applications mobiles	39
TAB. I.2 – Exemples de travaux scientifiques dans le domaine de la M-health	41
TAB. I.3 – Exemples de solution M-health commercialisées	43
TAB. II.1 – Indications des différentes parties du signal ECG	51

Deuxième Partie

TAB. I.1 – Etat de l'art des méthodes de classification des données de l'ECG.....	71
TAB. II.1 – Exemples des appareils de mesure de l'ECG commercialisés.....	98
TAB. III.1 – Liste des capteurs disponibles sur Android Studio	111

Troisième Partie

TAB. I.1 – Comparaison entre les modèles de littérature et ceux proposés.....	134
TAB. I.2 – Validation des critères cliniques imposés par la CQC	136

Glossaire

A

AI : *Artificial Intelligence.*
ANN : *Artificial Neural Networks.*
API : *Application Programming Interface.*
AR : *Augmented Reality.*
AVD : *Android Virtual Device.*

B

BLE : *Bluetooth Low Energy.*
BSC : *Base Station Controller.*
BTS : *Base Transceiver Station.*

C

Cell-Id : *Cell Identity.*
CNN : *Convolutional Neural Networks.*
CNTK : *Cognitive Tool Kit.*
CQC : *Care Quality Commission.*
CSS : *Cascading Style Sheets.*

D

DBN : *Deep Belief Networks.*
DIP : *Device Identification Profile.*
DL : *Deep Learning.*

E

ECG : *Electrocardiogramme.*
EEG : *Electroencéphalogramme.*
EMG : *Electromyogramme.*
E-health : *Electronic health.*
E-OTD : *Enhanced Observed Time difference.*

F

FFNN : *Feed Forward Neural Network.*

G

GPRS : *General Packet Radio Service/Global System for Mobile communication.*
GPS : *Global Positioning System.*

H

HAL : *Hardware Abstraction Layer.*
HDP : *Health Device Profile.*
HTML5 : *HyperText Markup Language 5.*

I

I2C : *Inter Integrated Circuit.*
IEEE : *Institute of Electrical and Electronic Engineers.*
IMEI : *International Mobile Equipment Identify.*
IoMT : *Internet Of Medical Things.*
IoT : *Internet of Things.*
IP : *Internet Protocol.*
IRM : *Imagerie par Résonance Magnétique.*

ISO : *International Organization for Standardization.*

J

JNI : *Java Native Interface.*

L

L2CAP : *Link Control and Adaptation Protocol.*

LAN: *Local Area Network.*

N

NDK : *Native Development Kit.*

NFC : *Near Field Communication.*

NLP : *Natural Language Processing.*

NN : *Neural Networks.*

NTIC : *Nouvelles Technologies de l'Information et de Communications.*

M

MAN : *Mitropolitan Area Network.*

MCAP : *Multi-Channel Adaptation Protocol.*

MI : *Infarctus du Myocarde.*

ML : *Machine Learning.*

MLP : *Multi-Layer Perceptron.*

M-health : *Mobile health.*

O

OCR : *Optical Character Recognition.*

OHA : *Open Handset Alliance.*

OLED : *Organic Light-Emitting Diode.*

OS: *Operating System.*

OSI: *Open Systems Interconnection.*

P

PAN: *Personnel Area Network.*

PHD : *Personal Health Devices.*

Q

QoL : *Quality of Life.*

QoS : *Quality of Services.*

R

RBM : *Restricted Boltzmann Machine.*

ReLU : *Rectified Linear Unit.*

RFID : *Radio-Frequency Identification.*

RNN : *Recurrent Neural Networks.*

RTC : *Real-Time Clock.*

S

SDK: *Software Development Kit.*

SDP: *Service Discovery Protocol.*

SIM : *Subscriber Identity Module.*

SMILE : *Self-controlled Mobile Intelligent Low-cost Ecg.*

SMS: *Short Message Service.*

SPI : *Serial Peripheral Interface.*

SPP : *Serial Port Profile.*

V

VR : *Virtual Reality.*

U

UI : *User interface.*

UIT : *Union Internationale des Télécommunications .*

UX : *User eXperience.*

W

WAN: *Wide Area Network.*

Wi-Fi: *Wireless Fidelity.*

Wi-Max : *Worldwide Interoperability for Microwave Access.*

WPS : *Wi-Fi Protected Setup.*

Introduction Générale

Depuis l'arrivée de l'internet et sa toute première utilisation publique au début des années 1990, beaucoup de secteurs industriels et gouvernementaux ont connu des changements radicaux. Ces changements affectent le plan d'échange de l'information, la manière de gestion des tâches, la fourniture et la délivrance des services.

La santé à son tour a vécu des transformations immenses avec l'apparition du nouveau mode de la médecine: la **télémédecine**. Cette nouvelle notion a profité largement de l'ère digitale pour révolutionner le monde de la santé publique et la pratique de la médecine et toutes ses disciplines. Comme son nom l'indique, la télémédecine symbolise l'habilité de pratiquer la médecine à distance. Cette pratique est possible à l'aide des dispositifs électroniques capables de transmettre les informations médicales des patients (signaux, données, paramètres...etc.) aux professionnels de santé. L'enregistrement de ces données se fait à l'aide des bases de données dites "Electronic Health Records (EHR)". La manipulation de ces informations est réalisée au niveau des ordinateurs, des modems et d'autres dispositifs électroniques. Leur transmission s'établit via différents protocoles et réseaux de télécommunication comme : le Bluetooth, le Zigbee et le WiFi. C'est l'alliance d'une large gamme des "Technologies de l'Information et de Communication (TIC)" qui a donné naissance à cette nouvelle ère médicale.

Plus récemment, et avec l'arrivée du premier iPhone d'Apple en 2007, une nouvelle ère de téléphonie mobile intelligente a vu le jour, c'est l'ère des "Smartphones". A l'issue de cette invention incroyable, de nombreux constructeurs ont pu introduire des téléphones mobiles intelligents, qui font dépasser la simple tâche d'un mobile traditionnel (téléphoner) à un large éventail de services et d'applications plus complexes. Ces fonctionnalités diverses appartiennent au même concept des ordinateurs. Elles sont basées sur l'élaboration d'un système d'exploitation "Operating System (OS)" au cœur du téléphone portable. A cette même année et contrairement aux autres OS qui sont souvent conçus pour un seul type de Smartphones (comme iOS d'Apple, Symbian de Nokia, et Windows mobile de Microsoft, etc.), Android est le premier OS conçu pour être facilement installé et utilisé sur des Smartphones issus de différentes firmes. C'est à ce moment que la notion "Open Source" a été ajoutée à l'ère des Smartphones. Dans le domaine médical et grâce à cette succession des évolutions technologiques de téléphonie mobile, une nouvelle dérivée de la santé digitale a vu le jour sous le nom de "santé mobile" ou M-health.

C'est dans ce cadre que s'inscrit notre projet de thèse, ayant pour objectif principal la conception d'une plateforme mobile et intelligente pour le suivi et la télésurveillance des maladies chroniques. Notre travail représente une initiative d'incorporation de nombreuses avancées technologiques très récentes afin de créer une solution de télésurveillance des

personnes à risque d'aggravation des troubles de santé ou même d'une mort subite causée par des maladies qui sont d'autant très communes que dangereuses, et qui ne cessent de prendre de l'ampleur jour après jour, mettant la santé publique dans un état d'urgence.

Cet œuvre qui a pu joindre la pratique à la théorie, présente dans une première partie un état de l'art détaillé de ces nouvelles disciplines de médecine, allant de la santé digitale à la santé mobile et passant par les différentes améliorations successives des TIC au service de la santé publique. Le deuxième chapitre de cette même partie s'articule autour des maladies chroniques et plus précisément, les maladies cardiovasculaires, faisant rappel aux divers travaux scientifiques et commerciaux maintiennent jusqu'à l'heure actuelle dans le domaine de la santé mobile au service de la cardiologie. A son tour et après une étude approfondie et un large débat sur l'état de l'art et les travaux connexes, le troisième chapitre présente la méthodologie vers une nouvelle vision de l'architecture de l'expérience des patients, durant leur vie avec les maladies chroniques et en utilisant notre plateforme et services de télésurveillance proposés.

Après pouvoir imaginer le parcours des patients lors de l'utilisation de notre plateforme, concrétiser nos visions sous forme de services inédits de suivi et de prise en charge de ces patients chroniques au quotidien est l'objet de la deuxième partie de cet œuvre. Cette partie comporte trois chapitres dédiés respectivement aux solutions algorithmiques de classification des données médicales, au prototypage matériel de l'appareil en question et au développement des applications mobiles interactives.

La dernière partie est composée d'un premier chapitre qui mentionne et valide les résultats atteints par notre plateforme offerte. Le deuxième chapitre détaille les enrichissements en cours et envisagés, dans le but d'améliorer la qualité de vie de ces acteurs principaux, de satisfaire leurs proches et de crayonner leur sourire en faisant oublier leur douleur.

Première Partie : Problématique

Chapitre I

Etat de l'art des technologies de la M-health

SOMMAIRE

- I.1 – E-health
 - I.2 – M-health
 - I.3 – Apports de la M-health
 - I.4 – Enjeux de la mise en œuvre d'une approche M-health
 - I.5 – Etat de l'art de la M-health
 - I.6 – Nouvelles notions des technologies en santé
 - I.7 – Conclusion
-

Au cours de ces dernières années et comme étant des nouvelles tendances technologiques, la santé digitale et ses dérivées ont connue des évolutions remarquables. Durant ce premier chapitre, nous allons détailler l'état de l'art de ces transformations radicales dans le domaine de la santé publique, et qui sont entraine de révolutionner la pratique médicale traditionnelle. Nous allons également présenter une étude approfondie de ces technologies révolutionnaires et juger ces apports et ces capacités profitables.

I. 1 - E-health

La E-health (santé électronique) représente l'association entre le digital et la santé [1]. Elle symbolise l'ensemble des moyens et des technologies numériques munies pour atteindre une bonne santé et une meilleure qualité de vie. La E-health bénéficie des avancées technologiques pour donner aux patients la possibilité de surveiller leur santé à tout moment et n'importe où, en offrant des outils flexibles et pertinents [2]. Ces outils technologiques regroupent toutes sortes de moyens numériques (ordinateurs, téléphones, mobiles, consoles, modems, réseaux filaires, réseaux sans fils, internet, etc.). Ce domaine de la E-health est d'autant large qu'innovant. Parmi ces différentes dérivées, la M-health (mobile health) est de nos jours, un des secteurs les plus prometteurs en santé publique.

I.2 - M-health

La M-health (santé mobile) est une application médicale récente développée en profitant des immenses avancées dans le domaine de la téléphonie mobile [1]. Elle exploite les appareils mobiles, connectés et surtout les "Smartphones" pour proposer des services médicaux aux patients et aux professionnels de santé [3]. La M-health représente une des branches principales de la E-health (Voir Fig. I.1).

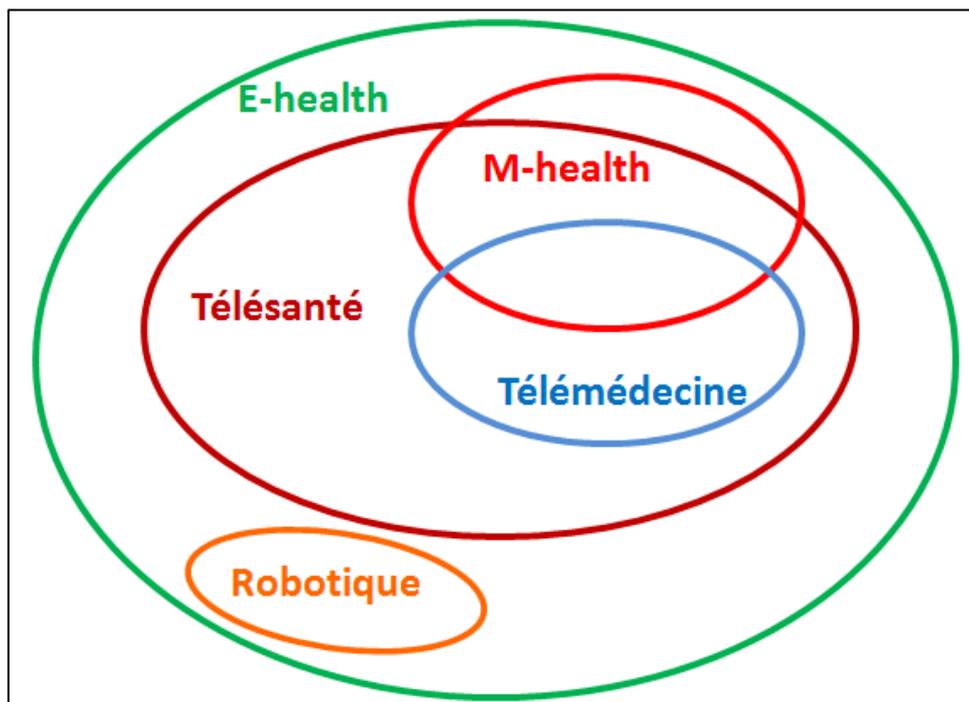


FIG. I.1 - Répartition des différentes catégories de la santé digitale.

I.3 - Apports de la M-health

I.3.1 - Mobilité

Comme son nom l'indique, la M-health est clairement "*mobile*". Elle adjoint l'aspect mobilité à la pratique de la médecine et de la santé en général [4]. Cette notion radicale de mobilité donne aux patients la possibilité de contacter leur médecin, le consulter et demander son avis n'importe où et n'importe quand. De même, les professionnels de santé de n'importe quelle région du monde peuvent échanger leur expertise à tout moment.

I.3.2 - Accessibilité

Les technologies mobiles constituent l'arme principal de la M-health. Ces technologies centrées autour de la téléphonie mobile sont largement utilisés et fortement acceptés par les différentes populations du monde entier. Selon le rapport de l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) ; plus de 7 milliards de souscriptions de téléphonie mobile est compté en 2015, dont plus de 70% est marqué dans des pays à revenu faible ou intermédiaire [5]. Cette utilisation massive des technologies mobiles augmente la possibilité d'adopter une stratégie de M-health "*accessible*" par les patients et les professionnels de santé, dont une large gamme de services médicaux sera de même plus accessible.

I.3.3 - Rapidité

L'intérêt majeur des technologies mobiles est qu'elles permet de gagner du temps en communiquant à distance. La vitesse des communications mobiles ou sans fils est donc très grande et profitable en cas d'interaction rapide et urgente. D'un point de vue médical, le temps est un facteur radical pour sauver des vies ; dont la plupart des cas d'urgences exigent d'être gérés le plus rapidement possible pour éviter toute sortes de complications [6]. La M-health répond bien à cette exigence en ajoutant l'aspect "*rapidité*" aux interactions et aux communications entre les patients, les professionnels de santé, les établissements hospitaliers et les urgences [2].

I.3.4 - Faibles coûts

Suivre le patient à son domicile et en ambulatoire permet d'éviter les déplacements inutiles aux établissements hospitaliers, et de reculer de l'espace à d'autres cas plus graves [2]. Solution qui peut aider les patients à diminuer leurs dépenses et gérer les infrastructures médicales d'une façon plus optimale [4].

I.3.5 - Qualité de services (QoS)

La délivrance des services médicaux et de santé au publique par l'intermédiaire des terminaux mobiles est devenue une réalité mondiale [1]. Ce secteur fondamental de la vie quotidienne des êtres humains a profité largement des avancées technologiques de la téléphonie mobile pour concevoir des services de santé plus adaptés aux besoins particuliers des patients. Ces services sont également plus rapides donc plus efficaces, mobiles donc ambulatoires et plus accessibles donc persistants [7]. C'est grâce à la M-health que les médecins commencent à pouvoir connaître plus de détails sur leurs patients, ce qui améliore la qualité de vie (QoL) de ces patients et des individus en général.

I.4 - Enjeux de la mise en œuvre d'une approche M-health

La M-health est une solution innovante qui permet de connecter ceux qui produisent les informations et les services médicaux (les professionnels de santé) avec ceux qui sont en besoin de ces données (les patients). Cette solution ne peut être efficace seulement si elle répond aux besoins particuliers des patients. Pour cela, la meilleure façon de concevoir une solution M-health est de se baser sur les besoins de cet acteur principal, l'E- patient [8]. A cette échelle, adapter la solution M-health aux différentes variations de la vie quotidienne des patients est essentiel, en préservant toujours la sécurité des utilisateurs et en gardant leurs particularités privées [3].

A une plus grande échelle, mettre en œuvre une solution M-health exige une approche multisectorielle entre professionnels de santé et développeurs des Nouvelles Technologies de l'Information et de Communications (NTIC) ; afin de produire une certaine compatibilité entre les recommandations en médecine et les idées innovantes en technologie. Des guides de bonnes pratiques et des lois de normalisation sont indispensables à ce niveau pour maintenir les solutions de M-health proposées dans un même cadre de réglementation [3], d'une façon à requérir un niveau supérieur de fonctionnalité et d'efficacité.

I.5 - Etat de l'art de la M-health

Après avoir donné une idée précise du domaine de la M-health, ses origines et ses dérivées, établir son état de l'art est indispensable à l'analyse complète de ce domaine de santé innovant. Cet état de l'art a passé par de nombreuses évolutions issues des recherches scientifiques multisectorielles. Dans la partie suivante, nous allons introduire les différentes technologies essentielles à cette évolution remarquable. Nous allons aussi analyser ces différentes étapes révolutionnaires par l'exposition des travaux scientifiques et commerciaux les plus pertinents. Vers la fin de cet état de l'art, une analyse critique est établie en jugeant les différents apports et lacunes de ces solutions proposées. Cette analyse est présentée sous forme de tableaux pour être plus concis.

I.5.1 - Technologies de la M-health

Les technologies de M-health et toutes ses dérivées reposent sur l'objectif principal de transférer l'information médicale à distance [1]. Cette notion de distance exige l'incorporation de différents moyens de connectivité entre les différents acteurs inclus.

I.5.1.1 - Réseaux sans fil

Une large gamme de réseaux sans fil est impliquée à cette révolution technologique. Cette gamme de réseaux sans fil peut être simplement subdivisée en utilisant le critère de la largeur de couverture du réseau (Voir Fig. I.2).

La norme IEEE 802.15 rassemble les réseaux sans fil à faible portée utilisés généralement pour des petites distances de quelques dizaines de mètres, comme le Bluetooth, le Zigbee, etc. [43]. Ces réseaux sont aussi caractérisés par leur faible consommation en énergie. Ce groupe est communément connu par le terme " Personal Area Network (PAN)" [43]. La norme IEEE 802.11 regroupe les réseaux sans fil à une plus large portée [9]. Nous comptons principalement le réseau le plus célèbre WiFi (Wireless Fidelity) qui appartient au groupe des réseaux connu par le terme " Local Area Network (LAN)" [63]. Plus largement, la norme IEEE 802.16 introduit des réseaux sans fil métropolitains "Metropolitain Area Network (MAN)" [9]. Ce groupe contient la technologie Wi-Max ; l'alternance du WiFi pour des zones plus éloignées [9].

Finalement, les réseaux sans fil à très large portée appartient à la norme IEEE 802.20, et connus sous le terme " Wide Area Network (WAN)". Ce groupe contient principalement le réseau cellulaire GSM (Global System for Mobile communications) [9].

Une autre catégorie de ces réseaux sans fil est celle regroupant des réseaux cellulaires, dédiés à la téléphonie mobile. Cette catégorie est marquée par l'évolution chronologique des réseaux cellulaires ; allant des réseaux GSM de second génération 2G, à des générations successives 3G, 4G et 5G [9], [61]. Cette évolution est marquée par l'augmentation des différentes performances du réseau (débit, couverture, etc.). Au niveau de chaque progression, de nouvelles infrastructures sont introduites et une variété de technologies est mélangée afin de donner les meilleures performances possibles.

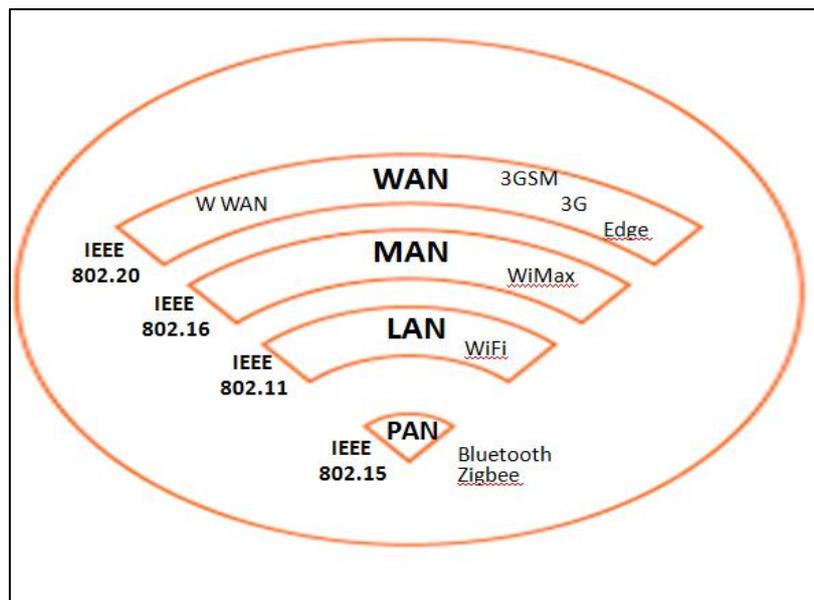


FIG. I.2 - Répartition des réseaux sans fils.

I.5.1.2 - Protocoles et standards dédiés à la santé

La firme IEEE avec la collaboration d'une large communauté des institutions et des industries a standardisé les protocoles de télécommunications dédiés spécialement aux appareils médicaux et au domaine de la santé publique [7]. Cette normalisation a donné naissance à des profiles, des protocoles et des standards réglementant les différents échanges des informations médicales entre les appareils médicaux au près du patient. Ils sont connus par "Personal Health Devices (PHD)" [7]. Tout comme le modèle de normalisation dédié aux systèmes de télécommunication et de l'informatique connu par "Open Systems Interconnection (OSI)", l'organisation mondiale de normalisation "International Organization for Standardization (ISO)" en collaboration avec l'IEEE a proposé un modèle de normalisation en 7 couches [7] (Voir Fig. I.3), dédié aux systèmes de télécommunications spécialisés en santé. Cette architecture déploie les protocoles de communications sur ses 4 couches basses, comme : les technologies du Bluetooth, du Zigbee, ou du "Near Field Communication (NFC)", etc. Elle utilise des protocoles IEEE d'échange de l'information et de spécification de l'appareil médical lors de la connexion sur les trois couches supérieures.

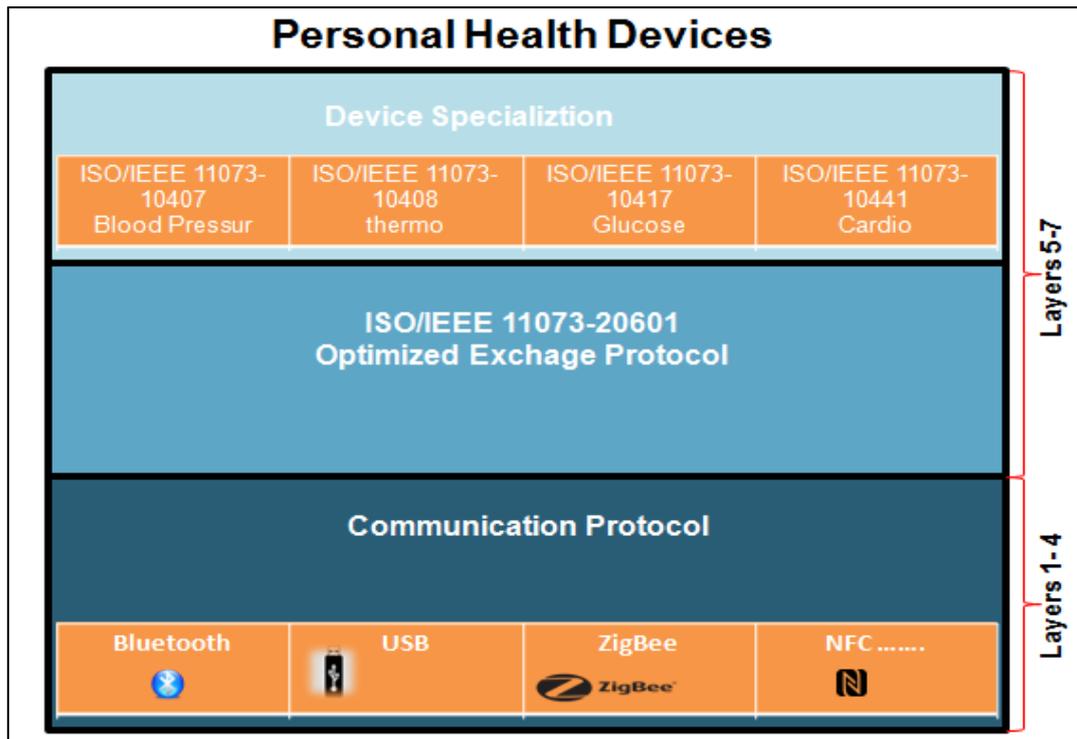


FIG. I.3 - Normalisation d'un système de communication dédié aux applications en santé.

Dans le même contexte la technologie Bluetooth est l'une des technologies les plus utilisées dans le domaine de la santé [43]. Pour cela, la partie suivante est consacrée à détailler l'application de la normalisation ISO/IEEE dans cette technologie adaptée aux réseaux sans fils.

- Technologie du Bluetooth en santé :

Le réseau du Bluetooth représente un outil favorable pour une connexion sécurisée entre deux appareils à distance (restreinte) [43]. Le profil traditionnel utilisé dans cette technologie est celui connu par le nom "Serial Port Profile (SPP)" [7]. Ce dernier regroupe des protocoles caractérisant la connexion Bluetooth entre ces deux terminaux.

Dans le domaine de la santé, la firme Bluetooth SIG (fondatrice du Bluetooth) a investigué de nouveaux protocoles pour une mise en relation spécialisée entre les terminaux médicaux. En 2008, elle a introduit le nouveau profil appelé "Health Device Profile (HDP)" [8], [63] (Voir Fig. I.4). Ce profil est conçu spécialement pour les systèmes de santé. Il est également compatible avec une large gamme de capteurs médicaux, y comptant l'ECG, l'oxymétrie, le glucomètre, etc. [8]. Ce profil peut relier un capteur médical (la "Source") à un autre appareil mobile comme le Smartphone (le "Sink"). Ce dernier peut retransmettre les données aux autres terminaux plus distants (PC, Smartphones, plateformes) et notamment au Cloud (via internet). Allant de bas en haut (Voir Fig. I.4), la première couche décrit le protocole appelé "Link Control and Adaptation Protocol (L2CAP)". A ce niveau, le téléchargement et la transmission des données s'effectuent. La couche suivante est nommée "Multi-Channel Adaptation Protocol (MCAP)". C'est à ce niveau que la gestion des connexions, déconnexions et reconnexions aura lieu. Au même niveau, Le protocole "Service Discovery Protocol (SDP)" est responsable de la découverte des appareils, des services et leurs attributs. Pour cela un autre protocole nommé "Device Identification Profile (DIP)" est indispensable pour définir les terminaux mobiles, et ceci pour faciliter leur découverte. Au niveau de la couche

supérieure, le HDP relie les deux terminaux selon des spécifications et des normes ISO/IEEE 11073-20601 pour l'échange des données (Data Exchange Protocol) et ISO/IEEE 11073-104xx pour la désignation du capteur médical ; où les deux derniers numéros varient selon le numéro du document et le type de l'appareil médical [8].

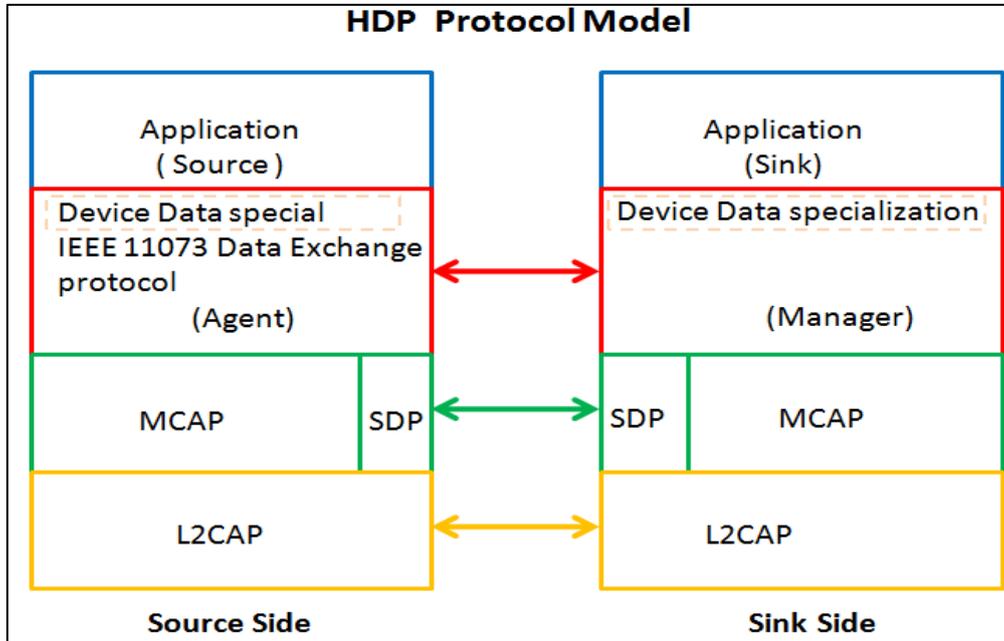


FIG. I.4 - Architecture du protocole HDP.

I.5.1.3 - Géo-localisation

Du terme global signifiant le positionnement des objets selon leurs coordonnées géographiques, la géo-localisation représente une des technologies les plus appliquées au domaine de la M-health [9]. Cette technologie est d'autant plus ancienne que son utilisation devient de plus en plus tendancielle. Elle peut être composée principalement en quatre catégories distinguées [10], [57].

- Techniques de géo-localisation :

Le positionnement géographique des objets et également des individus peut se faire en déployant des technologies variées. La plus célèbre méthode de géo-localisation est celle effectuée par le système satellitaire [9], [60]. Ce dernier se trouve en orbite, connecté aux stations de contrôle spécifiques et communiquant avec les récepteurs délivrés aux utilisateurs. La mesure s'effectue ensuite par le calcul de la distance entre les satellites et les utilisateurs ; pour cela quatre satellites sont utilisés pour le calcul de la longitude, l'altitude, la latitude et la synchronisation en temps. Il s'agit du système de positionnement le plus précis [10], connu communément par le terme GPS (Global Positioning System).

D'autres technologies de géo-localisation basées sur l'utilisation des données acquises des réseaux cellulaires comme le GSM peuvent être déployées [9], [10]. Ces technologies peuvent utiliser le numéro IMEI (International Mobile Equipment Identify) obtenu depuis la carte SIM (Subscriber Identity Module) de l'utilisateur [6]. La version la plus simple de ces technologies est connue par le nom "Cell-Id" [63]. Cette technologie profite des informations collectées par la BTS (Base Transceiver Station) sur le terminal mobile connecté à cette dernière. Connaître l'adresse du BTS revient donc à connaître l'adresse de ce mobile. Pour plus de précision, une méthode de triangulation est procédée

; en calculant la distance qui sépare trois BTS au terminal mobile visé. Ces informations peuvent être récupérées au près du BSC (Base Station Controller). Encore plus précise, la méthode dite " E-OTD (Enhanced Observed Time difference) nécessite l'intervention du terminal mobile ; en envoyant un signal de retour au BTS [6]. Cette dernière méthode exige un mobile bien équipé.

Une autre méthode de géo-localisation consiste à profiter des répartitions des adresses IP (Internet Protocol) sur le réseau d'internet, pour connaître l'adresse de l'utilisateur [60].

De même, il existe d'autres méthodes utilisant des technologies d'identification par des étiquettes émettant des ondes radio, attachées ou incorporées au terminal. Ces technologies sont nommées "RFID (Radio-Frequency Identification)" ; désignant la reconnaissance des objets en suivant leur trajet [60].

Ce domaine reste beaucoup plus large. Les méthodes de géo-localisation peuvent être aussi hybrides, en combinant celles détaillées auparavant [9] et notamment en introduisant de nouvelles approches.

- Applications de la géo-localisation en santé :

Le domaine de la santé a largement bénéficié de la variété des technologies de géo-localisation présentes actuellement [63]. Ces technologies sont de plus en plus incorporées dans les applications médicales ; allant des applications du sport, de repérage des cabinets, des établissements hospitaliers et des pharmacies les plus proches du patient, aux services des urgences, du suivi, et de gestion des épidémies à grande échelle géographique. Ces technologies puissantes aident au soutien des patients, à la fourniture des services médicaux et à la prévention des vulnérabilités.

Cependant, la mise en œuvre d'une approche de géo-localisation dans une application médicale est très exigeante. La vie privée des individus et la sécurité de leurs données doivent être largement respectés pour garantir une acceptabilité des produits proposés aux utilisateurs, ainsi qu'une conformité aux normes de santé publique [60].

I.5.1.4 - IoT

Au cours des années, le réseau internet a connu aussi une révolution remarquable, allant d'un réseau qui rassemble seulement des ordinateurs, à un plus large environnement regroupant les ordinateurs, les utilisateurs et les terminaux mobiles, et encore à beaucoup plus large en associant presque tout équipement de la vie quotidienne [11].

- IoT et données massives :

L'internet des objets ou "Internet of Things (IoT)" est tout simplement un grand réseau constitué d'un grand nombre d'objets connectés entre eux [11] (Voir Fig. I.5). Il peut contenir n'importe quel objet de notre vie quotidienne. Ces objets connectés échangent des données massives, homogènes et même hétérogènes. Cette multitude et variété des données partagées est connue par le nom "Big Data" [12]. En plus de ces données d'origine machine, le Big Data peut regrouper aussi des données d'origine humaine, comme les données résultants des réseaux sociaux [12].

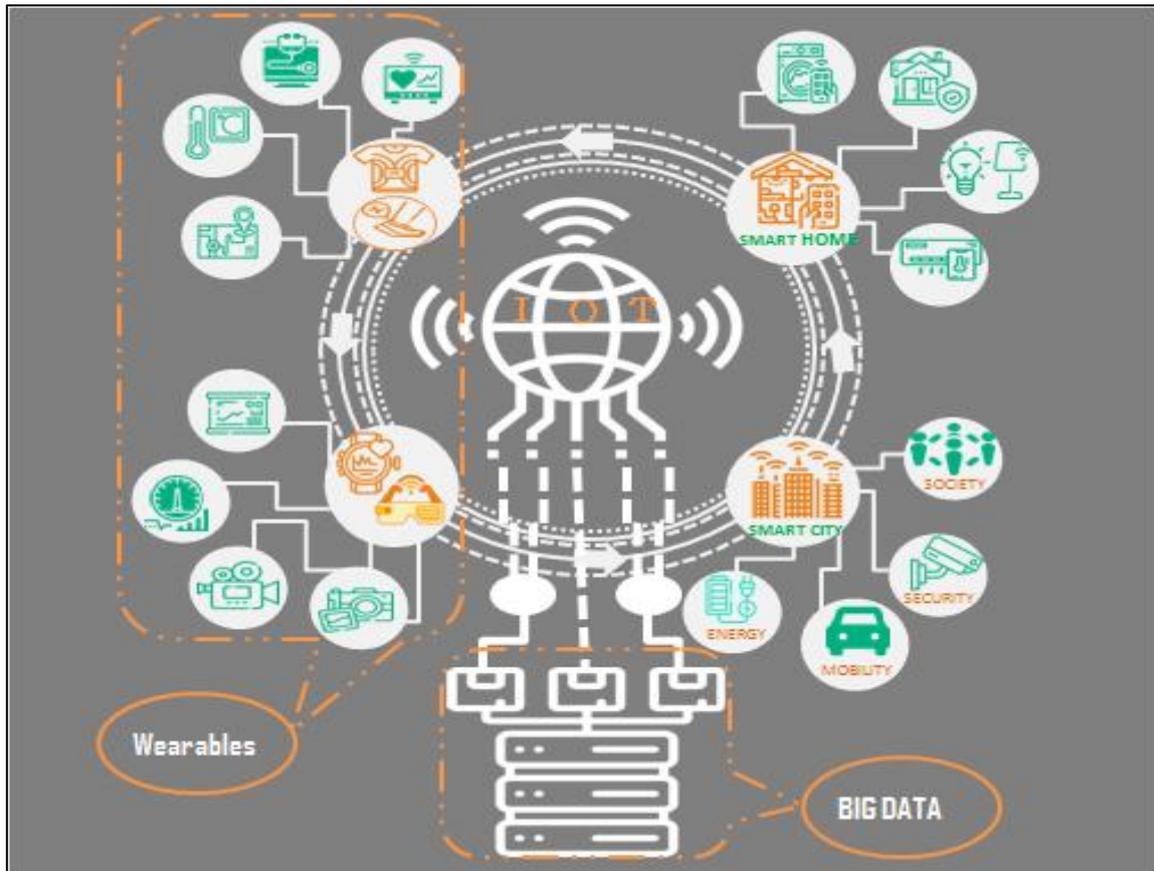


FIG. I.5 - Réseau IoT et données massives.

- IoT et WiFi-Direct :

Le Wifi-Direct permet de relier deux entités directement [66]. Ce mécanisme peut être établi sans avoir besoin d'un point d'accès. Ce dernier est remplacé par un propriétaire de groupe appelé "GO", sélectionné à partir d'une procédure de négociation précises [66] (Voir Fig. I.6) et responsable de la connexion de ces clients (CG) à un environnement extérieur. Ce protocole utilise la clé WPS pour l'authentification des appareils d'un même réseau [66]. C'est un protocole favorable en terme de vitesse, de portée et de facilité d'usage. Cependant, pour les réseaux IoT, cette formation du groupe n'est pas obligatoirement nécessaire, ce qui donnent aux appareils la possibilité de se connecter à un autre réseau simultanément. C'est un point de faiblesse majeure de l'application de ce mode de connexion dans les réseaux IoT en terme de sécurité informatique [11].

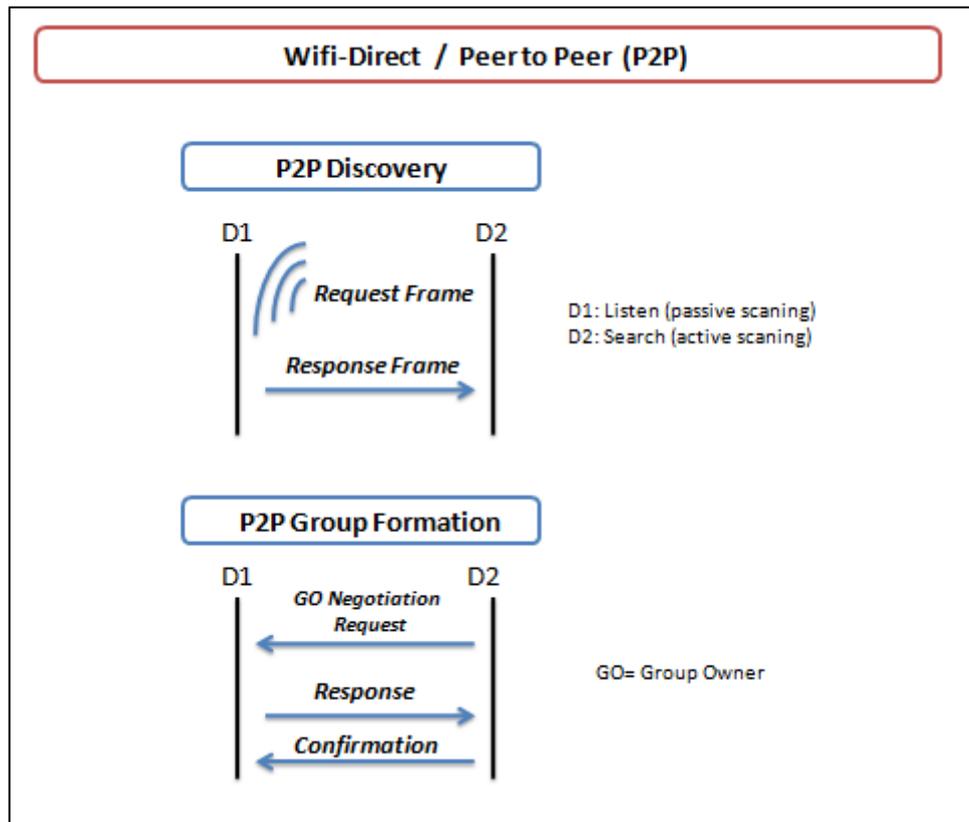


FIG. I.6 - Mode de communication pour la technologie de Wifi-Direct.

- IoT en santé :

Dans le domaine médical, le réseau IoT peut relier des capteurs (sensors) détectant et mesurant des paramètres vitaux et physiologiques du corps humain ; comme la température corporelle, la pression artérielle, l'électrocardiogramme (ECG), etc. [13]. Ces capteurs sont placés le plus souvent sur des petits objets portés par l'être humain, en donnant naissance au réseau appelé "IoMT" ; l'internet des objets médicaux [11]. Ces objets peuvent être un accessoire, une bague, une montre, des chaussures, des chaussettes, ou même des vêtements ou de la textile. Ils sont appelés "Wearables", parce qu'ils sont tout simplement portés par le patient [13]. L'apport majeur des Wearables est le fait qu'ils sont très confortables à utiliser le plus proche possible des patients, moyen qui augmente la possibilité de suivre les patients continuellement et en ambulatoire [64].

I.5.1.5 - Science des données et intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (AI) est une filière des sciences de l'informatique. Elle a pour but principal de créer des algorithmes et des systèmes qui simulent l'intelligence naturelle des êtres humains, et des animaux, pour rendre la machine plus intelligente et indépendante [12]. Prenant l'être humain comme exemple, reconnaître les paroles, écouter et parler sont des actions qui symbolise le domaine appelé "Speech Recognition" [14]. De la même façon, les capacités de lecture et d'écriture peuvent être projetés en AI par le mot " Natural Language Processing (NLP)" [14]. Reconnaître les scènes et les images vues par l'être humain est aussi simulé en AI par la discipline appelée "Image Processing" [15]. Faire extraire les données nécessaires à cette reconnaissance des images appartient au domaine nommé "Pattern Recognition" [16]. Ce sont ces domaines regroupés qui donnent naissance à une discipline dite "Machine Learning (ML)" [55].

- ML et ses dérivées :

La technologie ML résume le fait de donner la machine une large gamme d'informations ; voire des milliers de données pour quelle devient plus intelligente [55] (Voir FIG. I.7). La machine peut utiliser des algorithmes plus complexes et qui simulent le mécanisme du cerveau humain ; en utilisant les réseaux de neurones "Neural Networks (NN)" pour un apprentissage plus profond dit "Deep Learning (DL)" [12]. Ce dernier peut utiliser des algorithmes basés sur des fonctions mathématiques complexes comme la convolution, ce qui est représenté par le terme "Convolutional Neural Networks (CNN)" et qui est très utilisé pour reconnaître les objets à partir des images "Object Recognition" [15]. Il est aussi possible de faire en sorte que les NN se souviennent du passé, d'une façon récursive, ce qui est connu par les réseaux récurrents "Recurrent Neural Networks (RNN)" [15].

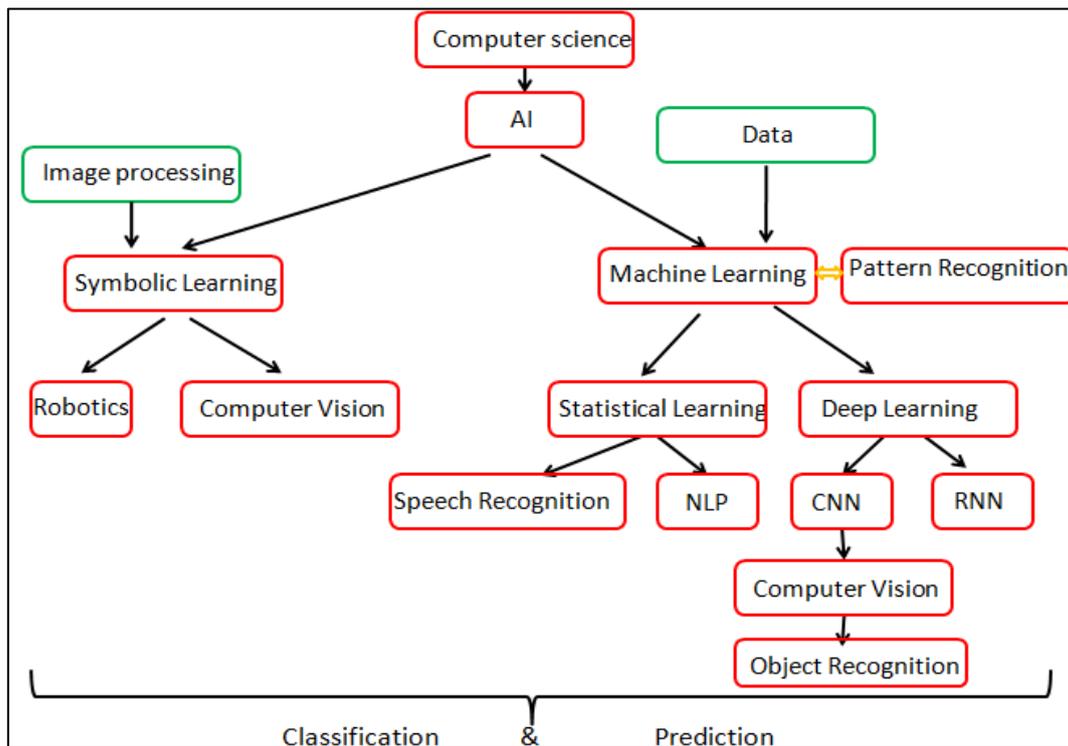


FIG. I.7 - Disciplines et subdivisions de l'intelligence artificielle.

Le ML ne représente pas le seul élément de l'AI. Il existe d'autres éléments d'apprentissage regroupés par le terme "Symbolic Learning" [12]. Ce dernier rassemble une multitude d'applications allant de la vision informatique (Computer Vision) au domaine des robotiques.

- Technologies AI en santé :

Dans le domaine médical, l'AI permet de classer les données, les signaux physiologiques, les pathologies, les utilisateurs ou n'importe quel paramètre selon leurs caractéristiques, critères, contextes ou genres [16]. Cette classification est très profitable en matière du diagnostic des maladies et de la décision médicale [15], [50]. L'AI permet aussi de prédire les évolutions des pathologies, des comportements des patients, des variations de leurs paramètres vitaux, etc. [55]. Cette capacité de prédiction est plus avantageuse dans le domaine de la prévention médicale [55].

- Technologie des "Chatbots" :

Parmi les technologies de l'AI les plus célèbres, les "Chatbots" représentent une des voies les plus prometteuses en sciences modernes [15]. Ces logiciels peuvent formuler des réponses aux questions posée par l'utilisateur et de même établir une conversation souple et ordinaire avec lui []. Ce mécanisme peut ajouter de l'intelligence aux interactions homme/machine par le biais des applications de messagerie, de mobile, et de sites web. Ces programmes sont basés sur les algorithmes de NLP en plus des mécanismes de transformation des textes en paroles et vis versa ("Text to Speech" et "Speech to Text") [15]. Pour leur bon fonctionnement, ils extraient les données essentielles à l'établissement de la bonne réponse à partir des entrées filtrées de la question posée par l'utilisateur. La formulation de cette réponse est complétée par la suite à l'aide des textes prédéfinis, stockés sur des bases de données ou sur des applications en arrière plan.

Dans le domaine médical, ces systèmes peuvent être utilisés pour accompagner les patients, proposer des solutions à suivre, appeler les urgences, faciliter l'accessibilité aux produits pharmaceutiques et aux services médicaux, consulter un médecin ou de même générer des diagnostics préliminaires [14].

I.5.1.6 - Réalité virtuelle et augmentée

Conçus au début pour les jeux interactives, les technologies de réalité virtuelle "Virtual Reality (VR)" et de réalité augmentée "Augmented Reality (AR)" sont devenues les tendances les plus prometteuses dans l'avenir proche de tous les secteurs. En utilisant des visiocasques de tous les modèles, allant des casques avec des écrans embarqués comme le casque "Oculus" jusqu'aux des casques qui utilisent l'écran du Smartphone comme "Cardboard" de Google, la RV donne à son utilisateur la possibilité de voyager dans un monde totalement virtuel, avec des scènes et des décorations imaginaires ; en se servant des technologies de "Head Tracking" et des processus cognitifs fournissant aux utilisateurs l'opportunité d'apercevoir ce monde et même le sentir [67].

A l'autre côté, la technologie AR repose sur le principe de récolter des images digitales, et les retoucher d'une façon à les faire circuler dans le monde réel [67]. elle utilise parfois des casques particuliers comme "HoloLens" de Microsoft ou même des applications sur le Smartphone. Cette technologie est très avantageuse dans le domaine de l'éducation et de l'apprentissage, car elle permet en médecine par exemple de voir un organe réel avec ses éléments internes et qu'ils ne sont pas apercevables par l'œil [67].

- VR, AR en santé :

Dans le domaine médical, ces tendances technologiques peuvent révolutionner les pratiques de santé publique [67] (Voir **Fig. 1.8**). Elles sont très rentables dans le domaine d'apprentissage, d'expertise et de formation, car elles offrent un large éventail d'applications éducatives [67], informatives, et de documentation aux professionnels de santé (médecins, chirurgiens, paramédicaux, et urgentistes, etc.). Pour les patients, les applications de VR et de AR représentent des résultats salutaires dans le domaine des traitements des problèmes psychologiques que les patients confrontent [67]. Elle peuvent être également utiliser pour faire alléger la douleur et diminuer la souffrance des patients.



FIG. I.8 - Quelques domaines d'application des technologies AR et VR.

I.5.1.7 - Applications mobiles

La M-health repose principalement sur le développement des applications logiciels mobiles exécutables sur Smartphones. Ces applications mobiles sont variées. Elles se décomposent en trois grandes parties : Applications "Natives", "de Web" et "Hybrides" [17]. Chacun de ces types est caractérisé par ses langages de programmation, ses environnements de développement, et ses contextes d'utilisation.

- Applications natives :

Ce premier type regroupe les applications développées sous un langage de programmation natif et dédiées à un système d'exploitation (OS) précis [17]. Les applications natives Android par exemple sont développées en Java ou Kotlin, sous les particularités d'Android OS. Elles sont publiées vers la fin sur "Play Store" et ne sont exécutables que sur des Smartphones Android. Les applications Apple d'une autre part, sont développées en Objective-C ou Swift, sous les caractéristiques d' iOS. Elles sont publiées sur "Apple Store" et ne sont accessibles que sur des Smartphones Apple. Ces applications dites natives sont reconnues par leur haute performance et leur meilleure exécution [68]. Elles peuvent accéder facilement aux options embarquées sur le Smartphone, comme le GPS, la camera, la liste des contacts, etc. [68]. Ainsi, elles offrent une continuité de services hors ligne (sans besoin de connexion). Le grand problème de ce type d'applications est qu'elles sont plus coûteuses [68]. D'une part, il faut développer plusieurs versions pour chaque OS, et d'autre part, les coûts de conception, de développement, et de maintenance sont plus au moins élevés.

- Applications de Web :

Les applications web ou sites mobiles sont tout simplement des applications développées sous forme de sites web en HTML5 et CSS [17]. Elles sont accessibles par l'intermédiaire d'un navigateur web. Contrairement aux applications natives, ces applications sont très faciles à utiliser sur n'importe quel OS [68]. De ce fait, elles sont moins coûteuses. Cependant, leur limite majeure réside sur le fait qu'elles exigent une connexion internet pour leur fonctionnement [68]. De même leurs performances sont plus au moins minoritaires.

- Applications hybrides :

Nées de l'association entre les applications natives et web, les applications hybrides symbolisent les applications mobiles développées sous HTML5 (comme les applications web) et incorporées par la suite dans une application native [17]. Ce genre d'applications est caractérisé par sa rentabilité et sa disponibilité sur toutes les plateformes [68]. Les coûts de maintenance sont de plus en plus optimisés. Cependant, ces applications restent toujours moins performantes que les applications natives, avec une interface utilisateur (UI) moins réactive [68].

Le tableau TAB. I.1 illustre une comparaison entre les types des applications mobiles selon les quatre critères : coût, performances, l'expérience des utilisateurs (UX) et l'exploitation des fonctionnalités du terminal mobile [68]. Le classement 1 représente la meilleure application selon le critère en question.

Type	Performances	L'expérience des utilisateurs (UX)	Accès aux options du Smartphone	Coût
Native	1	1	1	3
Web	3	3	3	1
Hybride	2	2	1	2

TAB. I.1 – Comparaison entre les types des applications mobiles.

I.5.1.8 - Technologies du Cloud

Les applications de M-health nécessitent dans la majorité des cas une gestion des données massives, résultantes des gros nombres des réseaux de communications et des échanges de l'information formant le célèbre terme du Big Data [12]. Cette gestion regroupe des phases de manipulation, d'analyse et même de stockage des données. Ce stockage peut se faire par le biais des bases de données sous forme des infrastructures physiques ou de même sur le Cloud [18]. Ce dernier représente le réseau énorme regroupant des infrastructures, des matériels, des logiciels et des serveurs distants, communicants via internet.

- Bases de données sur le Cloud :

Comme toutes autres bases de données, ce type représente une collection des données structurées ou non structurées. La différence majeure est que ce type des bases de données réside sur le Cloud, contrairement aux bases de données ordinaires résidentes sur des infrastructures physiques [18].

- Types des bases de données sur le Cloud :

Ces bases de données peuvent être regroupées selon le critère de morphologie des données stockées. Elles peuvent être relationnelles ; écrites en SQL (Structured Query Language) et composées des tableaux bien organisés ou non relationnelles (NoSQL) ; n'utilisent pas des tableaux, ni des formats structurés [18]. Les bases de données relationnelles sont souvent utilisées pour

stocker des données exigeantes en terme de format ; comme des données des transactions bancaires, de téléphonie, etc. Nous citant comme exemples : MySQL, Oracle, Microsoft SQL Server. Les bases de données non relationnelles sont généralement préférées pour des contenus multiples, non structurés, comme les données des réseaux sociaux.

- Avantages et inconvénients du Cloud :

Profiter de la puissance de l'internet pour stocker les données massives sur le Cloud engendre des avantages remarquables, en ajoutant plus de flexibilité au données partagées, en libérant les espaces de stockages matériels, et en diminuant le nombre et de même le coût des infrastructures impliquées [19]. Ces capacités énormes peuvent être le support d'une architecture de gestion des données des patients, des professionnels de santé et des établissements hospitaliers plus souple et répondante aux exigences de la M-health [59].

Cependant, cette dépendance notable du Cloud peut engendrer des problèmes de sécurité à une échelle plus grave que celle connue pour des espaces de stockages traditionnels [18], [3]. Les garanties d'utilisation des données personnelles d'une façon convenable et confidentielle restent à affirmer par le fournisseur du service Cloud. Ce dernier doit pratiquer des solutions de cryptage des données efficaces et à grandes échelles.

I.5.2 - Services de santé de nouvelle génération

Les services de santé 4.0 ou "Healthcare 4.0" symbolise la génération des services de santé nés de toutes ces technologies innovantes fusionnées [4]. Dérivée de l'industrie 4.0 (Voir Fig. I.9), cette nouvelle génération des services de santé représente une assistance totale du monde réel des patients, professionnels de santé et établissements hospitaliers par des fonctionnalités du monde virtuel ; où ces services devient plus intelligents et imaginaires que jamais [4], [5], [13].

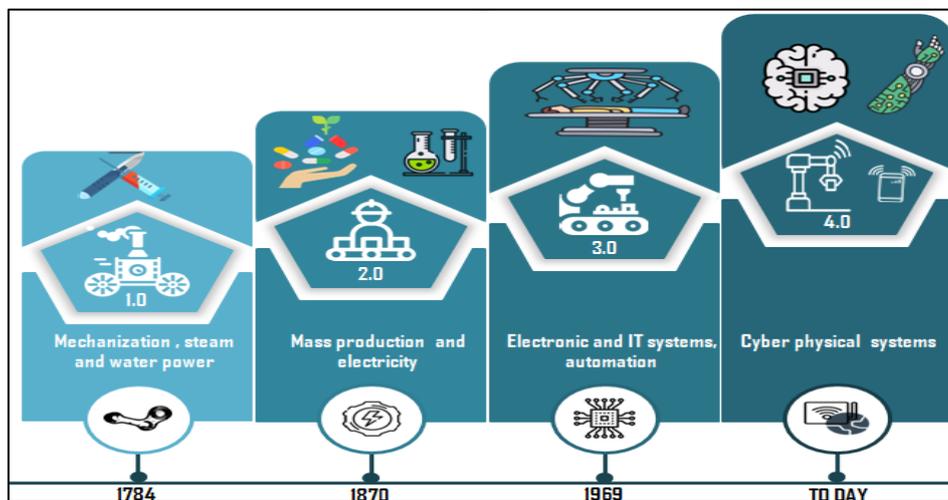


FIG. I.9 - Evolution du domaine de la santé par rapport aux développements industriels

C'est là où la notion de la médecine des 4P (quatre P) s'accroît ; en privilégiant la Prédiction des évolutions des différentes apparences, la Prévention comme une première réaction à cette prédiction, la Participation de tous les acteurs principaux en partageant les données essentielles à cette structure et la Personnalisation des services selon les besoins particuliers des patients, acteur principal de cette scène moderne [4].

I.5.3 - Exemples des solutions de M-health

Mélangée avec toutes ces ingrédients cités précédemment, la M-health a connue des changements et des évolutions remarquables au cours du temps. Plusieurs travaux scientifiques, des recherches techniques et des propositions commerciales ont vu le jour. Le tableau **TAB. I.2** expose d'une façon très pointue des exemples multiples des solutions développées dans la littérature scientifique. Ce tableau détaille les principaux points discutés dans ces travaux et de même il détermine leurs visions, leurs conceptions, leurs forces et leurs points faibles.

Auteurs	Date de publication	Description	Evaluation
A. Tahat <i>et al.</i> [20]	2011	Cet œuvre produit un appareil de mesure de la tension artérielle. Cet appareil envoie les mesures via Bluetooth au Smartphone du patient.	Ce travail détaille la partie de conception du capteur médical utilisé. Cependant, la partie concernant la transmission des données médicales et leur analyse reste à améliorer; vu sa structure simple et réduite.
P. W. U. Chan <i>et al.</i> [21]	2012	Ce travail est sous forme d'un rapport détaillant les étapes de design et de conception d'un appareil de mesure de la pression artérielle et des battements du cœur . Cet appareil communique avec une application mobile via Bluetooth.	Le système d'analyse des données est très simple (conditionnel), ce qui peut affecter la certitude des résultats. La qualité des mesures détectées est parfois faible. Or que, le système d'alerte intégré est purement automatique; en déclenchant l'envoi des messages d'alertes en cas d'anomalie aperçue.
S. Gradl <i>et al.</i> [22]	2012	Cet article introduit les étapes de conception d'une application mobile dédiée au suivi de l'ECG en temps réel. Les données reçues vie Bluetooth sont ensuite classifiées par la célèbre méthode de "Pan-Tompkins".	Les complexes QRS et les anomalies à partir de ces complexes sont très bien détectés avec un taux de 99%, et 89% de sensibilité, respectivement. Cependant, ce travail n'ajoute pas beaucoup d'originalité à la méthode de classification utilisée. Dans un autre coté, les données sont bien exposées et détaillées sur l'écran. Or, cette présentation détaillée peut être plus intéressante pour les professionnels de santé, que pour les patients.
A. Szczepanski et K. Saeed [23]	2014	Cet œuvre est une initiation de la mise en œuvre d'un système de télésurveillance des patients chroniques, par le suivi de leur signal ECG. L'application mobile est indisponible pour les tablettes Windows 8. La détection et le suivi des anomalies du rythme cardiaque et la génération des	Ce travail offre une bonne adaptation du fonctionnement de son application aux différentes variations et cas critiques possibles. Cette adaptation est assurée en proposant des solutions aux limites de mémoire

		alertes aux urgences sont assurés par cette application fournie.	de stockage, consommation de l'énergie...etc. Cependant, l'algorithme de classification est plus au moins limité, basé sur des calculs statistiques de quelques caractéristiques du signal ECG. De plus, la version disponible de l'application est écrite en C#. Ce qui limite son accessibilité, privilégiée aux terminaux de l'industrie "Microsoft".
R. Fekr <i>et al.</i> [24]	2015	Ce travail introduit une méthode de classification des désordres respiratoires en utilisant des capteurs de mouvement de la cage thoracique. Le stockage et le partage des données médicales se font via le Cloud.	L'efficacité de cette méthode est supérieure. Les capteurs utilisés dans cette étude sont très favorables. Par contre, la sécurité des données partagées n'est pas traitée.
S. H. Chang <i>et al.</i> [25]	2016	Il s'agit d'une conception d'un système de M-health basé sur la technologie IoT. Ce système est composé de trois parties: - La partie du capteur: un moniteur de mesure de la glycémie. cette dernière est envoyée au Cloud via le réseau mobile GPRS (General Packet Radio Service). - Une application mobile (sur Android et iOS) pour les proches du patient. Cette application génère des alertes en temps réel en cas d'urgence. - Le Serveur Cloud qui reçoit les données des patients, et constitue une plateforme commune entre les patients, leurs proches et les professionnels de santé.	Ce système présente une plateforme basée sur des protocoles spécifiques; ce qui affirme l'engagement de tous les acteurs principaux à la surveillance des diabétiques. Cependant, l'algorithme de classification des mesures de glycémie utilisé est basé seulement sur des lois simples (le système conditionnel "if/than"). Cette classification basique engendre un taux d'erreur plus au moins élevé à la décision finale, et par la suite à la génération des alertes.
A. La Cruz <i>et al.</i> [26]	2016	Cette étude scientifique vise à présenter une plateforme de télé-radiologie avancée. Cette plateforme est une amélioration de l'initiative de traitement des images médicales "WebMed SA". Elle ajout l'accès mobile à la base de donnée via internet, en plus d'une amélioration de la forme de présentation des images médicales. Ces dernières sont classifiées selon leur contexte et infrastructure.	Cette plateforme mobile représente un outil fiable de classification et de transmission des images médicales. Néanmoins, elle reste un outil à insérer dans une architecture d'une solution M-health plus complète.
N. Zarka <i>et al.</i> [27]	2016	Cet article introduit un system constitué d'une application mobile sous Android dédiée aux utilisateurs (patients et médecins) et une application web manipulant les données acquises.	Cette plateforme affermit la relation entre le patient et son médecin. Elle ajout l'aspect mobilité et continuité à cette relation.

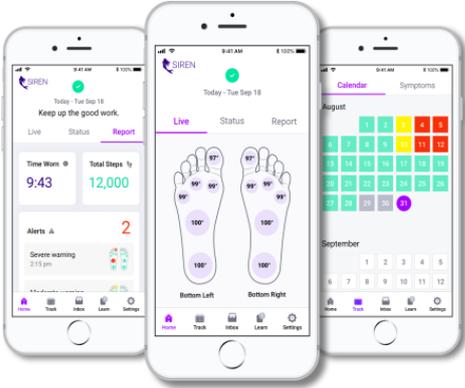
		Ce system a pour but d'organiser les rendez-vous, la poursuite des traitements et la connexion entre les patients et leurs medecins.	Tandis que, la manipulation des applications reste complexe à effectuer par le patient. De même, la sécurité des données partagées n'est pas clairement traité dans cet article.
T. P. Utomo <i>et al.</i> [28]	2017	Cet article introduit un système de détection du signal ECG par l'utilisation du module (AD8232) en plus de la carte électronique Arduino Uno. Après l'envoi des données de l'ECG par Bluetooth, une détection du complexe QRS est établie en poursuivant deux méthodes différentes. La première méthode s'appuie sur l'utilisation des filtres spécifiques, tandis que la deuxième repose sur la comparaison des données acquises avec un seuil défini.	Le système introduit une bonne initiation de l'utilisation des cartes Arduino pour faciliter la conception des capteurs médicaux. La partie de l'analyse des données est très simple et les méthodes de détection sont très basiques. De même, le travail traite la phase de détection du complexe QRS seulement et n'introduit pas des méthodes pour le classifier.
L. J. Mena <i>et al.</i> [29]	2018	Cette étude propose un appareil appartenant à la catégorie des Wearables, pour la mesure de l'ECG. Cet appareil communique avec une application sur Smartphone. Cette application est basée due des algorithmes de "Machine Learning", pour classifier les données de l'ECG.	Ce system est dirigé spécialement aux personnes âgés. Ses performances de détection, calcul et classification sont très favorables. Cependant, ce travail est encore en début, et nécessite plus d'amélioration au niveau du design de l'appareil et de l'application mobile pour être plus supportables par les personnes âgés.

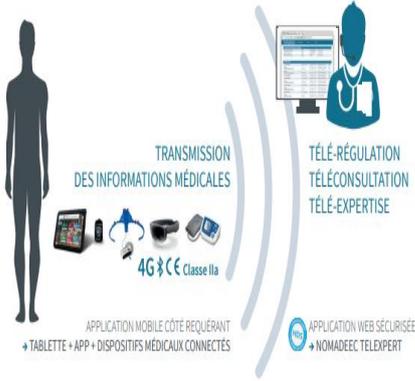
TAB. I.2 – Exemples de travaux scientifiques dans le domaine de la M-health.

Un autre tableau TAB. I.3 résume les solutions de M-health les plus pertinentes sur le marché d'aujourd'hui. Cette sélection est résultante d'une large étude du marché des solutions M-health les plus innovantes.

Produit	Description	Avantages	Faiblesses
OneTouch [30] (de LifeScan) 	Application mobile pour la mesure de la glycémie en plus des dispositifs de glycémie communicants avec cette application.	Des appareils médicaux de haute qualité (bénéficient de l'expertise médicale).	Les interfaces des applications adaptent plus aux professionnels de santé qu'aux patients, généralement âgés.

<p>iHealth MyVitals [31] (de iHealthLabs Europe)</p> 	<p>Application mobile sur iOS7. Elle utilise le tensiomètre, l'oxymétrie de pouls, le glucomètre, et des capteurs de mouvements durant le sommeil.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Surveillance en continu. -multitude des paramètres vitaux détectés. -historique des enregistrements. -Partage des données. -Bonne interface. 	<p>Le partage des données et la configuration doivent se faire manuellement par le patient.</p>
<p>MetaVision [32] (de iMDSOFT)</p> 	<p>Une plateforme dédiée aux professionnels de santé (surtout infirmiers) pour la collection des dossiers des patients, des alertes intelligentes pour faciliter le travail du cadre médical dans l'hôpital.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Taux d'erreur inférieur. -Bonne qualité des services médicaux. 	<p>Cette plateforme est restreinte aux hôpitaux et n'assure pas la collaboration des patients en dehors de cette zone.</p>
<p>Meiko [33]</p> 	<p>Un petit jeu pour accompagner les enfants asthmatiques, pour le maintien de leur routine médicamenteuse. Ce jeu est muni des capteurs garant sa communication avec l'application mobile dédiée aux parents.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -très bonne expérience de enfants en utilisant ce jeu. -l'application mobile assure l'engagements des parents durant cette expérience. 	<p>-Il s'occupe seulement à établir la routine médicamenteuse, et n'engendre pas les cas critiques de l'enfant asthmatique.</p>
<p>Tactio [34] (de TactioHealth Group)</p> 	<p>Des applications mobiles et des plateformes de télésurveillance des patients chroniques souffrant de l'obésité, le diabète, l'hypertension...etc.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -multitude des systèmes intégrés et des pathologies suivies. Technologies du Cloud, de l'IoT, et de l'AI. -cryptage des données et sécurité. 	<p>-La manipulation des applications est plus au moins complexe pour les personnes âgées.</p>

<p>Embrace [35] (de Empatica)</p>  <p>The image shows a black wristband with a circular sensor on the back, connected to a smartphone. The smartphone screen displays a green checkmark and the text 'EVERYTHING IS OK! Your Embrace is working fine'. Below this, there are settings for 'Embrace Battery', 'Light & Vibration', 'Rest Mode', and 'Alert Location'. At the bottom, there are icons for 'Activated Campaigns' with names like 'Mom', 'Dr. Lee', and 'Dad'.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Un bracelet pour prévenir les crises épileptiques, en utilisant des capteurs de mouvements, de température et de conductance électrique de la peau. -Une application mobile communicante avec le bracelet, pour la génération des alertes en temps réel. -Une autre application mobile d'interconnexion entre les patients souffrant de l'épilepsie. 	<ul style="list-style-type: none"> -Un système de Wearables intelligent basé sur les technologies de l'AI et du Machine Learning. -Un système d'alertes automatique et en temps réel, en assurant la collaboration des proches dans la survie des patients. 	<ul style="list-style-type: none"> -La décision est purement machine (Standalone application), ce qui peut parfois générer des fausses alertes. -Le prix est plus au moins élevé.
<p>Siren Socks [36] (de SirenCare)</p>  <p>The image shows three smartphones displaying the Siren Socks app interface. The left phone shows a 'Live' status with 'Time Worn' at 9:43 and 'Total Steps' at 12,000. The middle phone shows a 'Live' status with a foot diagram and temperature readings for 'Bottom Left' and 'Bottom Right' feet. The right phone shows a 'Calendar' with 'Symptoms' and a monthly view for August and September.</p>	<p>Une startup pour la télésurveillance des diabétiques; en utilisant des socquettes intelligentes. Ces dernières sont dotées des capteurs qui mesurent la température des pieds et détectent les inflammations, et envoi les résultats aux applications web et mobiles de Siren.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Détection précoce des inflammations. -Prévention des complications. 	<ul style="list-style-type: none"> -Prix cher. -Détecte seulement un des symptômes du diabète. -Ne couvre pas la totalité des besoins des diabétiques. -Manipulations complexe de l'application mobile.
<p>Samsung Health [37]</p>  <p>The image shows the Samsung Health app interface on a smartphone. It features a 'ME' section with 'Goals' for steps (156), distance (1956), and sleep (Good). Below this is a graph showing '13524 steps' and a '7 hrs 30 mins' sleep duration. At the bottom, there are icons for 'Activity', 'Sleep', and 'Heart Rate'.</p>	<p>Des applications mobiles conçues par la firme Samsung. ces applications dédiées aux Smartphones Android détectent une large gamme des paramètres vitaux.</p>	<ul style="list-style-type: none"> -Multitudes des paramètres détectés pour le maintien de la bonne santé des utilisateurs. -Des programmes de bien-être proposés. 	<ul style="list-style-type: none"> -Compatible seulement avec des versions d'Android ultérieures (égales ou supérieures à 6.0). -Manipulation plus au moins complexe.

<p>Nomadeec [38] (de Exelus)</p> 	<p>Une plateforme de télémédecine basé sur la technologie de la réalité augmentée (AR) pour aider les agents paramédicaux et les médecins d'urgences à effectuer les premiers soins en toute aisance.</p>	<p>-Compatible avec une multitude d'appareils médicaux. -Des applications mobiles Valides sur Android, iOS et Windows. -améliore les services des urgences d'une façon optimale.</p>	<p>-Besoins des casques HOLOLENS de Microsoft, ce qui amplifie le coût de son implémentation et son déploiement. -Nécessite une formation du cadre médical, pour sa mise en œuvre.</p>
<p>Butterfly iQ [39]</p> 	<p>-Une sonde d'imagerie médicale mobile et liante aux Smartphones, tablettes et PCs. -Une application mobile disponible sur iOS est associée à cette sonde pour la visualisation des images et le partage des données via Cloud.</p>	<p>-Bonne qualité d'imagerie médicale, en gardant l'aspect mobile. -Très supportable dans les zones lointaines, et limitées en ressources médicales.</p>	<p>-Coût élevé. -Pas compatible avec les Smartphones Android (qui dominent le marché actuel)</p>
<p>Qardio [40]</p> 	<p>Cette firme propose des dispositifs médicaux communicants avec des applications mobiles spécialisées (sous Android et iOS).</p>	<p>La grande précision des mesures de cette marque a donné l'occasion qu'elle sera agréée par des organisations de santé publique. Le design des appareils utilisé est bien supportable par les patients durant leur vie quotidienne.</p>	<p>Contrairement au design des appareils, celui des applications mobiles ne s'adapte pas vraiment aux besoins particuliers des patients au quotidien. De même, ces interfaces apportent beaucoup de détails sur la santé; ce qui peut inquiéter le patient.</p>

TAB. I.3 – Exemples de solution M-health commercialisées.

I.5.3.1 - Lacunes des solutions proposées

A partir de l'étude approfondie des solutions de M-health proposées sur le marché, nous pouvons signaler que la multitude et la variété des innovations et des idées sont très concurrentes. Cependant, ces solutions et innovations sont affaiblis par quelques points de déficience, ce qui donne lieu aux autres idées et imaginations plus fiables et efficaces. Ces points de faiblesse peuvent être résumés comme suit :

- Complexité :

Le premier problème majeur de ces solutions est qu'elles proposent des services très complexes à utiliser [62]. Surtout pour les personnes âgées et qui ne savent pas vraiment manipuler le Smartphone. Une activation du Bluetooth, l'accès à la liste des adresses MAC ou accéder à son email avec des étapes de sécurité manuelles sont des actions d'autant complexes à exécuter par une personne âgée ou par un patient qui est souvent très fatigué et qui ne veut plus faire de l'effort.

- Sécurité :

La deuxième défaillance de ces systèmes est qu'ils ne procèdent pas, dans la plupart des cas d'une stratégie de sécurité fiable [3]. Or, les données des patients sont des données personnelles et qui exigent d'être protégées. De même, les technologies de sécurité disponibles sur le marché sont souvent très difficiles à mettre en œuvre, ce qui augmente de même la complexité du produit.

- Adaptation :

Le domaine M-health repose principalement sur l'exploitation des technologies de téléphonie mobile, ce qui borne les solutions M-health aux limites des Smartphones. Les problèmes de couverture et de disponibilité du réseau utilisé, les déconnexions, les limites des mémoires de stockage, et la durée de vie des batteries sont tous des effets qui freinent le fonctionnement de l'application mobile sur Smartphone [58]. Le manque d'adaptation de l'application à la variation des contextes et des situations critiques marque souvent les solutions de M-health proposées sur le marché.

- Satisfaction :

Les utilisateurs des applications M-health (patients et professionnels de santé) ont besoin des solutions simples et efficaces, qui couvrent leurs exigences particuliers le long de leur utilisation du produit proposé [57]. Ce dilemme de "Simplicité vs. Efficacité" est en général présent lors de la conception d'une solution de M-health fiable et adéquate [52]. L'interface utilisateur "User Interface (UI)" n'atteint pas dans la plupart des cas le degré de performance sollicité par les clients, ce qui diminue d'une façon remarquable leur satisfaction durant leur interaction quotidienne avec les services proposées. Leur expérience d'utilisation du produit " User Experience (UX)" est donc rarement plaisante [53].

I.6 - Nouvelles notions des technologies en santé

Les technologies de l'E-health et de la M-health ont bouleversé le monde de la santé publique. Ces notions regroupées ont donné naissance à des systèmes de santé, des services de médecine, des qualités de soins, et des fonctionnalités de surveillance très proches du patient [2], [4]. A ce niveau, cette multitude de services amalgamés a construit un monde de qualité et de délivrance des services

médicaux incomparable. Ce monde est devenu de plus en plus l'entourage quotidien des patients chroniques [44]. Tous comme de l'eau ou de l'électricité, cet entourage est devenu "omniprésent" dans la vie de tous les jours de tout individu. Cette nouvelle notion de délivrance continue des services médicaux d'une façon à accompagner les patients le long de leur périple face aux maladies chroniques est la notion connue par le terme "Ubiquitous-healthcare Systems" ou U-health ; regroupant les systèmes de santé omniprésents [43].

I.7 - Conclusion

Comme tout autre secteur, en médecine, plus vous possédez d'informations sur vos patients, plus votre service sera optimal. Ceci est maintenant possible, avec l'arrivée de la M-health. La technologie qui ne cesse de prendre de l'ampleur, jour après jour et qui profite des avancées technologiques en téléphonie mobile, en télécommunication, et même en informatique. Couplée à d'autres ingrédients, la M-health peut être le traitement de tous les difficultés que confrontent les patients et les professionnels de santé. Cependant, les solutions présentées sur le marché n'exploitent pas la totalité des capacités imaginaires de la M-health.

Le chapitre suivant va donner plus de détails sur cette application innovante de la M-health dans le domaine des maladies chroniques, et plus précisément les maladies cardiovasculaires.

Chapitre II

M-health au service des maladies chroniques

SOMMAIRE

I.1 – Maladies chroniques

I.2 – Lacunes des technologies de M-health face aux maladies chroniques

I.3 – Conclusion

Etant donné que la cardiologie est une discipline importante de la médecine, la possibilité d'intégrer des retouches technologiques est grande. Ce domaine de santé sensible a connu des améliorations importantes; en bénéficiant des nouvelles tendances de la santé digitale et mobile. Nous allons exposer durant ce deuxième chapitre l'état de l'art des solutions M-health au service des maladies chroniques, de la cardiologie et des maladies neurocognitives, allant des concepts médicaux aux réalisations technologiques majeures.

II.1 - Maladies chroniques

Répétitives, fréquentatives, ou permanentes se sont des termes qui désignent les maladies persistantes au cours du temps, qui se développent lentement et se manifestent dans une longue durée de plus de quelques mois ; en accompagnant le patient durant sa vie quotidienne. Ce sont des maladies connues communément par le terme : maladies chroniques [44], [45], [46], [47]. Cette catégorie regroupe une large gamme de maladies non-transmissibles comme : les cardiopathies, les maladies neurocognitives (Alzheimer, Parkinson, etc.), le diabète, les insuffisances respiratoires (l'asthme, la pneumopathie, etc.) et le cancer [48]. Contrairement aux maladies infectieuses qui peuvent causer une mort subite et malgré leur vitesse de progression relativement lente, les maladies chroniques sont la principale origine de mortalité dans le monde [69].

II.1.1 - Maladies cardiovasculaires

Parmi les maladies chroniques les plus connues, les affections cardiovasculaires représentent la toute première cause de décès au monde entier, notamment dans les pays à revenu faible ou intermédiaire [69]. Ces maladies dites cardiovasculaires affectent principalement le cœur, l'organe vivant qui alimente la totalité du corps humain par du sang, en plus des vaisseaux ; transporteurs de cet aliment [69]. Cette source de vie corporelle peut avoir des malformations visibles dès la naissance, connues par le terme : malformations congénitales [69]. En outre, ces pathologies peuvent être aussi développées au cours de la vie de l'individu à cause de la présence d'un ou de plusieurs facteurs de risque encourageant l'apparition de ces anomalies cardiaques [69]. Selon l'organe atteint des problèmes ou des troubles de circulation sanguine, les maladies cardiovasculaires se diffèrent ; allant des maladies coronariennes qui affectent les vaisseaux alimentant le cœur, passant par les affections cérébraux-vasculaires influant les vaisseaux nourrissant le cerveau, aux artériopathies périphériques touchant les vaisseaux qui alimentent les articulations (jambes et bras) [46], [69].

II.1.1.1 - Facteurs de risque

Les facteurs favorisant l'apparition des anomalies cardiaques peuvent être d'origine comportementale liée au style de vie de l'individu ; comme l'utilisation néfaste du tabagisme, de l'alcool, la mauvaise alimentation, ou le manque d'activité physique [69]. D'autres facteurs encourageant l'évolution de ces pathologies sont liés à la santé de l'être humain, qui peut souffrir d'une autre maladie chronique déjà installée comme : l'obésité, le diabète, l'hypertension, le cholestérol, etc. [69].

II.1.1.2 - Signal ECG

Parmi les signaux physiologiques, le signal ECG est celui qui représente l'activité cardiaque de l'individu [46]. Vient de l'acronyme ECG signifiant l'Electrocardiogramme, ce dernier indique le diagramme électrique du cœur, ou d'une autre façon le diagramme résultant de la mesure de l'activité électrique du cœur par le biais des appareils médicaux spécialisés [46].

Comme il figure le rythme cardiaque, l'ECG mesure la variation de la fréquence cardiaque en battement par minute. Cette mesure peut être spontanée, par le moyen d'un simple ECG, ou permanente par le biais d'un ECG spécialisé dit "Holter" ; ce qui ajoute la notion ambulatoire à la mesure du rythme cardiaque [46]. Ce dispositif mobile caractérisé par sa taille réduite, peut mesurer et enregistrer le signal ECG durant plus de 24 heures.

II.1.1.3 - Détection des anomalies cardiaques à partir de l'ECG

Puisqu'il mentionne la variation du rythme cardiaque, le signal ECG est un indicateur très important pour la détection des anomalies cardiaques, et par conséquent le dépistage, le diagnostic et la surveillance des maladies cardiovasculaires [56]. Cet indicateur primordial est caractérisé par une courbe périodique, et des ondes essentielles, répétitives et déterminées par : P, Q, R, S, et T [46]. Chaque onde apporte une information spécifique sur l'état de santé du cœur. Les intervalles regroupant quelques ondes peuvent aussi caractériser des symptômes ou des pathologies cardiaques [56] ; comme les intervalles PR, ST, et QT, ou le complexe QRS (Voir Fig. II.1).

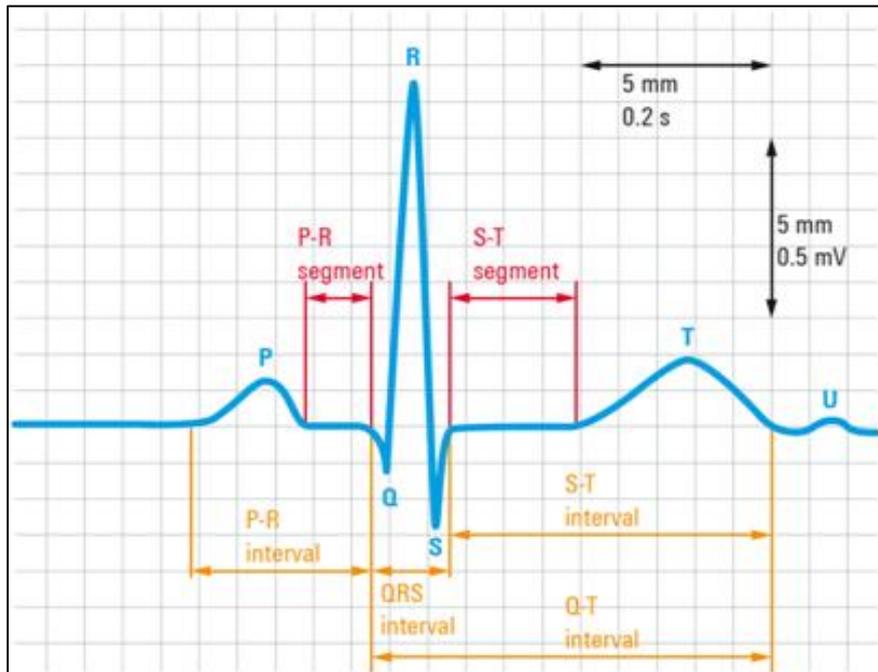


FIG. II.1 - Allure principale d'un signal ECG.

Le tableau TAB. II.1 explique l'indication de chaque caractéristique du signal ECG [56].

Élément du signal ECG	Indications
P	Donne des informations sur la propagation des impulsions dans les deux artères.
T	Peut signaler des hypertrophies cardiaques, des crises cardiaques ou des ischémies.
PR	Donne des informations sur la propagation de l'impulsion électrique des artères vers les ventricules.
ST	Représente la période de la contraction des ventricules; la dernière phase du cycle. Ce segment Peut mentionner la présence d'une ischémie.
QRS	La partie la plus indicative du signal ECG. Elle symbolise la propagation de l'impulsion dans les ventricules, donnant naissance à la période Systolique. Elle donne de nombreuses informations sur les fibrillations et les arythmies cardiaques. Elle est très utile pour analyser et diagnostiquer les troubles de rythme cardiaque.
U	La toute dernière onde de la période caractéristique du signal ECG. Elle se trouve sous forme d'un petit pic.

TAB. II.1 – Indications des différentes parties du signal ECG.

II.1.1.4 - Lecture d'un ECG

Les professionnels de santé résument la lecture de l'ECG en quelques étapes principales [70] (Voir Fig. II.2):

- Tout d'abord, l'identité de la personne et la date de l'examen ECG sont des informations très importantes. Il faut noter de même que le signal ECG normal d'une personne peut ne se ressembler pas à celui d'une autre personne; du fait que plusieurs facteurs influencent son allure, surtout l'âge et le sexe de cette personne.
- Le calibrage conseillé est de 25 mm/s (temps) et 10mm/mV (amplitude).
- Le filtre recommandé est de 0,05-150 Hz. Ce filtre ne doit pas être moins de cette valeur, sinon en risque de faire disparaître les petites déflexions électriques.
- La fréquence cardiaque peut être calculée en comptant le nombre des carrés. la fréquence cardiaque (fc) sera alors égale à 300 divisé par ce nombre.
- Nous pouvons aussi utiliser le nombre des intervalles [R-R] pour calculer la fréquence cardiaque. Dans ce cas, ce nombre est multiplié par 12.
- La fréquence cardiaque peut être un paramètre de détection des anomalies pathologiques. c'est à dire, pour un ECG normal la fréquence cardiaque doit être comprise entre 60 et 100 (Si $fc < 60$ (possibilité d'une Bradycardie) et Si $fc \geq 100$ (possibilité d'une Tachycardie)).
- La régularité du rythme cardiaque est aussi radicale. Ceci est analysé en mesurant les intervalles [R-R]. Si ces intervalles sont égaux, alors le rythme cardiaque est régulier. Ce rythme est irrégulier dans le cas d'une inégalité aperçue.
- Dans un ECG normal à 12 dérivations, nous pouvons distinguer trois points principaux:
 1. L'onde P et le complexe QRS sont positifs dans la dérivation D1, et doivent se ressembler à ceux de V6.
 2. Le pique R de V1 à V4 ou parfois à V5 (V1, V2, V3, V4, V5) doit être croissant, puis il décroît jusqu'à V9 (V6, V7, V8, V9).
 3. Croissance de S de V1 à V2, ensuite une décroissance jusqu'à V6 (V3, V4, V5, V6).
- L'intervalle QT représente le systole électrique. Ce paramètre est proportionnel à fc et peut être calculé en utilisant une réglette médicale spécialisée. Dans un ECG normal, l'intervalle QT doit être compris entre 295ms et 360ms.
- Un autre paramètre lié à l'intervalle QT est appelé "QT cBazett". Ce dernier symbolise une indexation de QT sur 60/mn. Donc, QT cBazett est égale à QT divisé par la racine carré de 60 sur la fréquence cardiaque.
- Le décalage dans l'intervalle ST est aussi important pour la détection des anomalies cardiaques. Ce décalage est mesuré en un point nommé "J", qui représente la fin du complexe QRS et le début du segment ST.

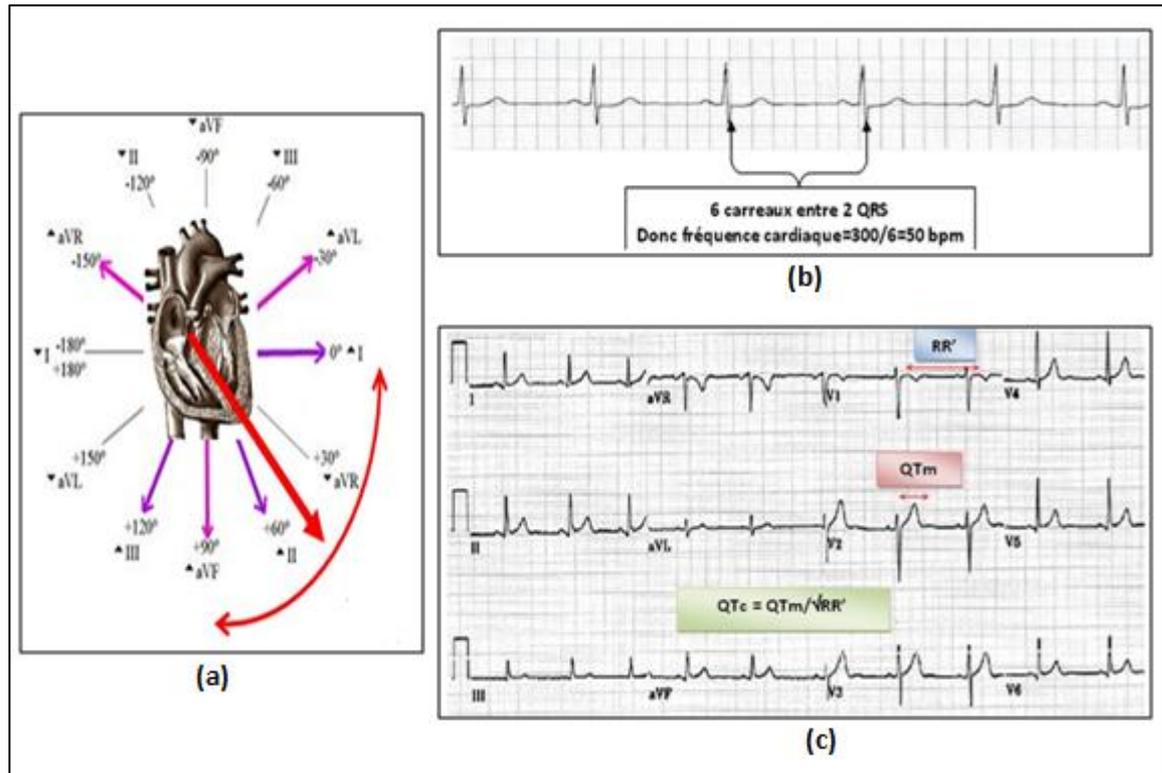


FIG. II.2 - Lecture médicale de l'ECG. (a) Les 12 dérivations possibles. (b) Lecture de la fréquence cardiaque. (c) Calcul de l'intervalle QT.

II.1.1.5 - La technologie au service de la cardiologie

Comme toute autre variante de la télémédecine, la télé-cardiologie représente l'application des NTIC dans le domaine de la cardiologie [63]. Ce secteur fondamental de la santé publique a bénéficié de ces innovations technologiques pour offrir aux cardiologues et aux professionnels médicaux de meilleurs dispositifs de mesure et d'analyse des signaux physiologiques. Il les rapprochant de plus en plus aux patients et facilite leurs tâches essentielles à la survie des individus [65]. De même, ces applications de télé-cardiologie constituent un accueil et un soutien plus optimal des patients, en favorisant leur intérêt comme étant le centre de tous les actes médicaux. C'est grâce à ces avancées technologiques que la télésurveillance des patients souffrant des troubles cardiaques est devenue possible par le biais des capteurs de mesure des paramètres vitaux et des moyens de transmissions et de stockage de ces derniers. La décision médicale peut être alors plus convenable avec une meilleure prise en charge des patients en ambulatoire, à tous moments et surtout quand ils auront besoin de l'aide.

II.1.1.6 - M-health et cardiologie

Les applications mobiles dédiées au domaine de la cardiologie sont à leur tour très nombreuses et variées [44]. Allant des applications d'apprentissage et de formation des professionnels de santé, passant par des applications de "Social Media" favorisant d'une part l'interconnexion des organes de santé pour l'échange de l'expertise et de l'autre part la formation des communautés entre patients chroniques pour la solidarité et le support social, finissant par des applications de bien-être, de routine médicamenteuse, de télésurveillance, d'analyse et d'urgences [46], [47]. Cette variété illimitée des applications de M-health dédiées à la cardiologie ne cesse de se croître jour après jour,

en encourageant les chercheurs et les développeurs de trouver et d'inventer d'autres solutions plus pointues et avantageuses.

II.1.2 - Maladies neurocognitives

Les maladies dites neurocognitives représentent l'ensemble des maladies affectant les capacités cognitives des patients [48]. Dans leur cas normal, ces capacités cognitives permettent aux personnes d'effectuer leur tâches quotidiennes : comme la parole, la mémoire, le raisonnement et toutes sortes d'interactions manipulées par le cerveau [49], [50]. Cependant, l'affection du cerveau diminue ces performances cognitives, de façon à donner naissance à plusieurs maladies : comme l'Alzheimer (Voir Fig. II.3), le Parkinson ou les maladies frontaux-temporales [51]. Ces lésions peuvent se développer durant jusqu'à 25 ans avant que les premiers symptômes se manifestent [49]. Une fois apparaitront, ces symptômes provoquent une perte d'indépendance croissante chez le patient et même une possibilité de désordres de comportement variée d'un patient à un autre [51].

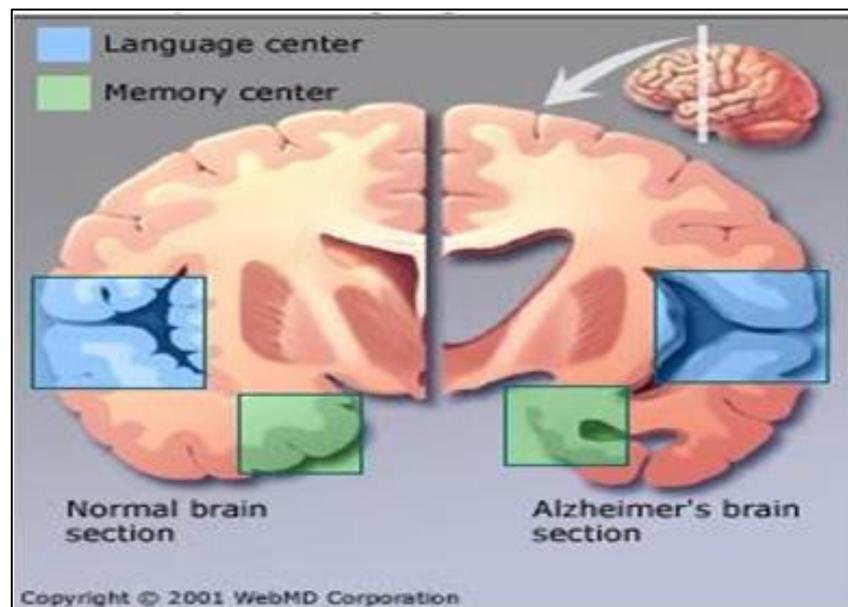


FIG. II.3 - Lésions au niveau des centres de langage et de mémoire du cerveau dans le cas de l'Alzheimer [71].

II.1.2.1 - Radiologie et maladies neurocognitives

Le diagnostic des maladies neurocognitives se base principalement sur l'étude clinique des images radiologiques du cerveau [50]. Ce domaine de radiologie est vaste, proposant une variété de techniques et de formats des images médicales [50]. Parmi ces techniques, l'Imagerie par Résonance Magnétique (IRM) est le moyen le plus utilisé dans le cadre de dépistage avancé de ce genre de maladies [50]. Ce type d'imagerie médicale repose sur la mise en œuvre des champs magnétiques spéciales et capables d'observer la composition chimique et biologique de l'organe en question [50]. Cependant, ce type de diagnostic reste une seconde étape à suivre dans des stades plus avancés, après avoir confirmé la présence d'une anomalie mesurée par des tests cognitifs et psychologiques spécialisés [48], [49].

II.1.2.2 - Le rôle de la M-health dans le domaine des neurosciences cognitives

A son tour le domaine des neurosciences et de même celui de la radiologie dédiée aux maladies neurocognitives ont connu une révolution technologique pertinente [50]. Les algorithmes de traitements des signaux et des images biologiques, aidant au diagnostique, au suivi des patients souffrant de ce type de maladies et à une décision médicale plus adaptative ne cessent de s'accroître jour après jour. De même, la manipulation des conditions cognitives des patients, leur surveillance et leur prise en charge représentent des cibles attractives pour les développeurs de la M-health et de la technologie en général.

II.2 - Lacunes des technologies M-health face aux maladies chroniques

Malgré cette multitude et variété remarquables des solutions de M-health visant les maladies chroniques, les lacunes de la mise en œuvre pratique de ces technologies s'accroissent encore plus dans ce domaine, mettant en avant des problèmes de gestion de l'expérience des patients chroniques lors de leur interaction quotidienne avec les produits proposés [52]. Pour la majorité des cas, cette interaction est jugée complexe et difficile à admettre par les patients chroniques et surtout les personnes âgées [53]. La mise en œuvre d'une solution de M-health de haute performance et de grande fiabilité mesurées théoriquement ne satisfont pas forcément les besoins réels des patients chroniques [54], [55], [56], [57]. Elles ne s'adaptent pas toujours avec leurs habitudes particulières et de même leur aptitudes technologiques [58].

La sensibilité de ce secteur radical a un impact majeur sur la vie de toute personne, ce qui augmente d'une façon notable l'exigence du respect absolu des recommandations, de standardisation et de normalisation globale de santé publique [3]. Cette responsabilité inédite est un challenge pour tous les développeurs et les chercheurs désirant intégrer ce domaine sensible. Le bon choix des techniques et des solutions innovantes doit être toujours accompagné par une vision approfondie des risques et des effets indésirables probables sur la santé des patients, et de même la particularité des données médicales échangées [4], [11], [12], [13], [18]. Ces données qui sont à la fois sensibles et privées, exigent aussi des précautions strictes de sécurité lors des échanges possibles des informations des patients avec les autres acteurs et établissements de santé impliqués [18].

Le facteur de l'âge, des connaissances, des habitudes, de comportements et de possibilité de présence de plusieurs maladies chroniques chez le même patient rendent encore plus difficile la mise en œuvre d'une solution basée sur des technologies avancées pour gérer ses paramètres physiologiques, surveiller sa santé, répondre à ses besoins et préserver son autonomie [57].

II.3 - Conclusion

En effet et d'après ce chapitre, Les patients chroniques et notamment atteints des maladies cardiovasculaires représentent une cible difficile à convaincre. Cependant, cette catégorie représente une large communauté de notre société qui exprime des besoins réels et urgents. Nos recherches scientifiques et nos contributions auront donc des challenges polyvalents. Ces motivations et autres sont discutées dans le chapitre suivant, donnant naissance à notre solution proposée.

Chapitre III

Problématiques, motivations et contributions

SOMMAIRE

- I.1 – Contexte général**
 - I.2 – Problématique globale et motivations**
 - I.3 – Objectifs**
 - I.4 – Méthodologie**
 - I.5 – Contributions et solution à chaque problématique**
 - I.6 – Conclusion**
-

Ce troisième chapitre est consacré à la description du chemin suivi pour aboutir à notre solution finale, allant de la problématique principale, passant par les méthodologies suivies pour maintenir le design global de notre plateforme fournie, et présentant les différents moyens responsables à l'exécution de nos visions et à la concrétisation de nos idées en objets finals. Vers sa fin, ce chapitre décerne les contributions majeures de notre solution au domaine de télésurveillance des maladies chroniques en général et celui des maladies cardiovasculaires plus précisément.

III.1 - Contexte général

Au cours de ces dernières années, la santé publique a dramatiquement évolué [59]. Le nombre des maladies chroniques ou non transmissibles (comme les cardiopathies, le cancer, le diabète, ou encore les affections respiratoires) est en croissance remarquable [69]. Cette situation critique de santé mondiale exige des solutions innovantes, rapides, efficaces et adéquates.

Dans ce contexte, la M-health représente une voie très prometteuse, vu ces opportunités avantageuses et ces capacités révolutionnaires [1], [2]. Cette force universelle qui peut bouleverser le domaine des services médicaux et de même offrir aux patients chroniques des solutions de télé-suivi et d'accompagnement incomparables est un outil puissant pour améliorer la vie quotidienne des patients, leur proches, et des êtres humains en général [3], [4], [5].

III.2 - Problématique globale et motivations

Malgré sa force inhabituelle, l'utilisation des services M-health dans notre société reste limitée [41], vu la qualité des solutions proposées sur le marché. Ces solutions sont en général très complexes à utiliser par les patients chroniques, et surtout les personnes âgées [53]. L'efficacité de ces solutions est variée et ne s'adaptent pas aux besoins particuliers des utilisateurs. La fiabilité de ces applications est dans la majorité des cas incertaine car elle se base sur des algorithmes purement informatiques, ce qui peut engendrer des erreurs de diagnostic et de décisions médicales générées [42]. Ces applications dites "Standalone" nécessitent la vérification par un professionnel de santé. C'est le spécialiste qui peut ajouter de la certitude aux décisions fournies [70].

Ces lacunes apercevables des solutions de M-health offertes aux patients chroniques, souffrant des maladies cardiovasculaires représentent les motivations majeures de notre recherche scientifique. Le but principal de cette thèse s'articule autour de l'exploitation des puissances immenses de ces technologies pour aider cette catégorie importante de notre société, dans une façon plus convaincante et plus optimale. La capacité de concrétiser ces approches théoriques sur le plan réel et de proposer une solution plus fiable et admirable par les patients chroniques, les professionnels de santé et notre communauté en général, est le défi majeur de cet œuvre. La fusion des options intelligentes, efficaces et avancées avec une interface simple et facile à déployer représente la clé radicale qui ajoute de la particularité à notre plateforme proposée.

III.3 - Objectifs

Notre but principal est d'améliorer la qualité de vie (QoL) des patients chroniques, en bénéficiant des avancées de la M-health pour concevoir une plateforme de télésurveillance plus efficace et avantageuse. Notre projet s'inscrit dans le cadre du développement d'une plateforme de M-health, qui peut unir les patients avec leurs médecins, renforcer ces relations, accompagner les patients qui représentent le centre de tout acte médical et aider les professionnels de santé à accomplir leurs missions dans les meilleures conditions possibles. Nous allons viser par le biais de cette thèse l'objectif de donner de l'efficacité, de la fiabilité, de la confidentialité et de la rentabilité à aux produits de M-health. Notre plateforme proposée sera d'autant influente que tendancielle.

III.4 - Méthodologie

Avant de concevoir notre solution de télésurveillance envisagée, l'étude approfondie des maladies chroniques, en se basant sur les besoins particuliers de ces patients est la toute première étape essentielle. Cette étude a pour but de décerner le public visé par notre solution et également de définir le plus clairement possible les problématiques à lesquelles notre produit doit répondre.

Le cadre professionnel est un élément important pour la validation des produits visant le secteur de la santé publique. Pour cela, les recommandations des experts médicaux sont radicales pour déterminer nos objectifs principaux en terme de performances et de précision.

Après ces étapes constitutives, une synthèse des solutions disponibles sur le marché est indispensable pour apprendre de leurs expertises techniques, analyser leurs démarches scientifiques et s'inspirer de leurs faiblesses.

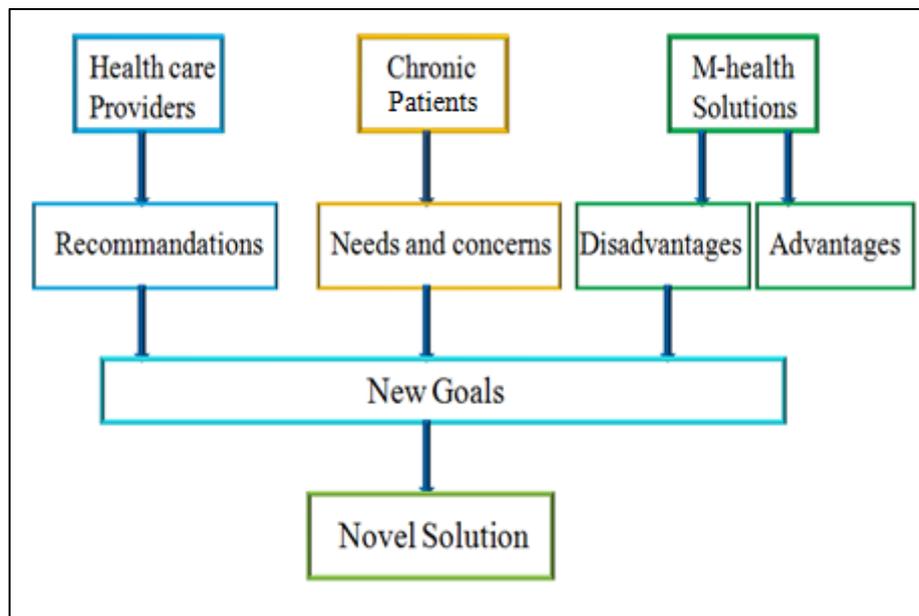


FIG. III.1 - Méthodologie de recherche [72].

III.4.1 - Etude approfondie de l'expérience des patients chroniques

Comme les maladies chroniques se prolongent, les patients sont obligés de se familiariser avec leur souffrance quotidienne [57]. Durant cette périple douloureuse, les patients se confrontent à plusieurs difficultés et par conséquent, ils expriment une variété des besoins et d'exigences [53]. Pour nous, ces besoins exprimés sont le premier point de départ de la conception d'une solution M-health plus efficace. Cette première étape est indispensable à la collection des exigences des patients et des difficultés rencontrées par ces acteurs principaux face aux maladies non transmissibles. Chose qui peut définir d'une façon claire nos buts à achever par cette nouvelle plateforme de télésuivi et d'assistance quotidienne.

Communément défini, le patient symbolise le centre de toute scène médicale [2], [4]. Cet acteur principal, comme étant un être humain et lors de sa vie avec la maladie, manifeste des sentiments, des réactions, des comportements et des émotions. La durée de la maladie ou tout simplement le facteur du temps, l'évolution de cette maladie au cours du temps et la variation des émotions du patient le long de sa périple, représentent les trois axes principaux qui forment l'expérience du patient vivant avec sa maladie chronique. Ce sont ces trois axes qui déterminent notre plan principal

sur lequel se repose notre vision de l'expérience patient. Ce plan regroupe les besoins des patients chroniques, premières pierres de notre design de la solution M-health proposée.

Selon les patients, une excellente solution M-health doit être alors très simple et facile à utiliser [53], [57]. Ses outils nécessitent d'offrir de l'aide aux patients, en les encourageant, les incitant, et en gardant toujours leur autonomie durant leurs activités quotidiennes. Ces solutions M-health doivent s'adapter aux besoins particuliers des patients et ceci en donnant de l'accès immédiat aux services médicaux, en cas de nécessité ou d'urgence [61]. Sur un même degré d'importance, les données des patients (dossier médical, localisation, paramètres vitaux, etc.) sont des données personnelles, qui demandent d'être protégées et sécurisées [18]. Pour les patients, ce sont ces critères qui donnent de la qualité, de l'efficacité et de l'efficacité aux applications M-health avec le moindre coût possible [53].

III.4.2 - Exigences des experts médicaux

La deuxième étape est la collection des recommandations des professionnels de santé ; deuxième acteur principal qui fournit de l'information utile aux patients. Comme étant expert, le professionnel de santé peut interagir correctement et convenablement aux cas d'urgences que les patients confrontent [42]. Il peut de même, représenter le repère optimal pour suivre l'évolution de la maladie et ses impacts sur la santé et la vie quotidienne du patient. La toute première exigence des professionnels de santé est qu'ils revendiquent une très grande précision lors de la détection des paramètres vitaux des patients [52]. Une telle précision est essentielle pour pouvoir évaluer le cas du patient, générer la décision la plus adéquate et compléter l'acte médical d'une façon plus efficace [52]. Le facteur du temps est encore très important lors de l'exécution de cet acte médical. Pour cela, les experts médicaux exigent une très haute rapidité lors de l'envoi des mesures ou des informations, chose qui peut accélérer la procédure de décision médicale, donner de l'efficacité aux actes médicaux et ajouter une notion du temps réel accentuée aux services de santé [18], [62].

D'un point de vue médical, la solution M-health doit alors produire un support professionnel aux experts de santé ; d'une manière à garder la précision, la rapidité, l'organisation, l'efficacité et l'utilité de l'acte médical [18], [54], [62]. Moyen qui peut augmenter la qualité des services médicaux d'une façon remarquable.

III.4.3 - Analyse des travaux connexes

La recherche scientifique dans le domaine de la M-health représente l'une des tendances technologiques les plus récentes. Cette tendance a donné naissance à un nombre illimité de travaux, d'ouvrages et d'articles scientifiques [3], [11], [12], [13]. Ce sont ces travaux qui ont constitué la base sur laquelle notre solution de M-health s'appuie. La majorité de ces travaux scientifiques est conçue pour développer un seul volet de l'industrie vaste de la M-health. Allant des capacités des capteurs et des Wearables pour la détection des données [20], les caractéristiques de l' IoT pour l'interconnexion des réseaux [21], les opportunités du Cloud pour le stockage de ces données [59] et la force des algorithmes de l'AI et du Deep Learning pour la classification et la génération des décisions médicales cohérentes [50], [65].

D'autres ouvrages scientifiques ont décidé d'offrir un repère de jugement de la qualité des solutions M-health offertes sur le marché [3], [11], [12], [13], [62], [64]. Ils détaillent d'une part son état de l'art et son évolution au cours du temps. De l'autre part, ils définissent son cadre réglementaire et de nombreuses versions des guides de bonnes pratiques pour sa mise en œuvre et sa normalisation [18].

III.4.4 - Design UX

Les dilemmes "Simplicité vs. Efficacité" et "Originalité vs. Fiabilité" sont des challenges à relever par toute solution destinée au domaine médical. Pour cela, nous essayons d'apporter des retouches d'originalité, depuis les premières étapes de design de notre solution proposée. Cette originalité repose sur le fait d'imaginer le produit à concevoir d'un point de vu différent ; c'est à dire d'imaginer l'expérience des patients en utilisant nos services offerts [52] (Voir Fig. III.1). Cette méthode est capable de produire des solutions plus supportables par les patients ; sachant que même les plus fortes techniques innovées par un technicien peuvent être pas amplement abordables par les utilisateurs, pour la simple raison qu'elles n'offrant pas les meilleures expériences possibles [52], [53]. Pour commencer à décrire le parcours du patient chronique, il faut tout d'abord prendre en considération ce patient (identité, sexe et âge), son contexte (pathologie, stade de la maladie, degré de difficulté) et son environnement (famille, proches, collègues) [70]. Cette démarche peut être résumé en quatre étapes essentielles [52] :

- Définir les différents acteurs contribuant à cette scène médicale, et leurs différentes interactions possibles (médecin, infirmier, parents, proches, etc.).
- Développer l'axe du temps, en définissant les différentes phases temporelles du chemin clinique (consultation, découverte de la maladie, diagnostic, surveillance, traitement, soins, opération, réhabilitation, etc.).
- Décrire les émotions des patients durant ces phases, au moments des interactions avec les différents acteurs, leurs besoins et leurs attentes possibles.
- Regrouper ces interactions, ces émotions, et ces expériences pour désigner les différentes motivations, problématiques et buts à achever par la solution finale.

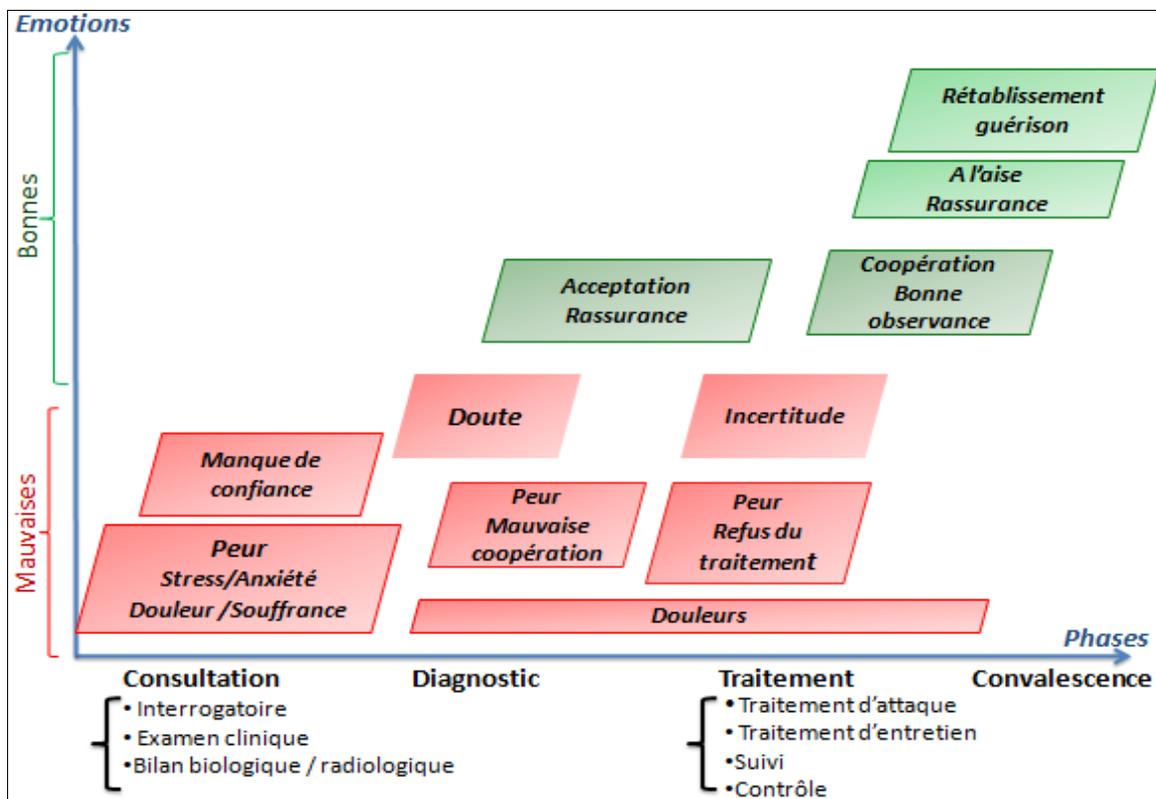


FIG. III.2 - Exemple d'une expérience clinique d'un patient.

III.4.5 - Design de l'architecture globale

Le design global de notre solution proposée combine le prototype d'un capteur médical de mesure de l'activité cardiaque, en plus de deux applications mobiles dédiées aux patients et aux professionnels de santé [72]. Ces trois composantes principales constituent une plateforme de télésurveillance et de téléassistance des patients chroniques atteints des anomalies cardiovasculaires (Voir FIG. III.2).

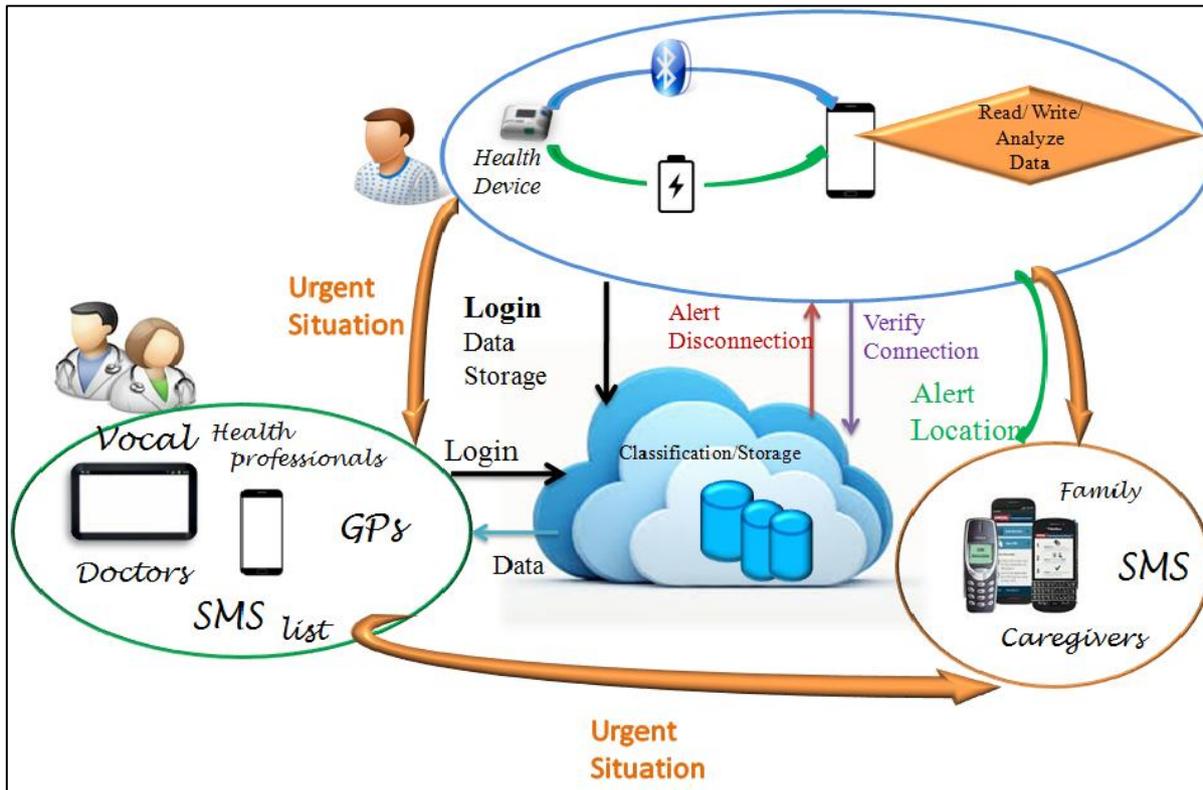


FIG. III.3 - Architecture et scénarios de notre plateforme proposée [72].

Cette architecture globale de notre plateforme proposée peut être résumée en quelques points essentiels :

- Acteurs principaux:

Le premier acteur principal de cette architecture (le patient) apporte sur son corps les capteurs médicaux qui détectent son activité cardiaque. Ces capteurs envoient ses données par Bluetooth à son Smartphone. Ce dernier est responsable de la lecture, de l'analyse des données basée sur des algorithmes intelligents et de l'envoi des alertes automatiques aux professionnels de santé et aux proches du patient en cas d'une anomalie détectée. Ces alertes sont envoyées sous formes des SMS préétablis et envoyés automatiquement pour gagner du temps et procurer de l'urgence immédiate au patient.

A son tour, le spécialiste de santé représente le support professionnel de la décision primaire produite par notre système de classification intelligente. Il peut juger, vue son expertise, le degré d'exactitude de l'information générée ainsi que le niveau de danger de l'anomalie détectée. Il peut par la suite reproduire une décision finale, plus optimale, sous forme d'alerte aux proches du patient et aux urgences, et d'indications au patient lui même.

- Technologies intégrées:

En plus de la détection des données médicales à l'aide du prototype proposé, leur envoie via Bluetooth et leur analyse au niveau du terminal mobile grâce aux logiciels de classification intelligents, le centre de cette architecture est représenté par le Cloud ; l'endroit du stockage de l'information utile au déroulement de ce scénario. Les deux acteurs principaux (patient et médecin) peuvent accéder en toute sécurité à cette plateforme, en utilisant des mécanismes d'authentification.

Une autre option d'une alerte contenant la géo-localisation est ajoutée à notre plateforme, pour répondre aux besoins particuliers des patients chroniques en cas d'une urgence. Cette alerte est envoyée via SMS au proche du patient pour fournir de l'aide immédiat au patient en danger.

D'autres mécanismes de vérification de l'état de connexion Bluetooth, de connexion internet, et de niveau de l'énergie de la batterie sont incorporés à cette architecture, pour la rendre plus adaptative aux différents cas critiques.

Chaque partie de ces technologies intégrées à la réalisation de notre plateforme de télésurveillance proposée est bien détaillée dans les sections suivantes de cet œuvre. Pour résumer toutes ces technologies, notre plateforme est nommée "**SMILE**" (pour : **S**elf-controlled **M**obile **I**ntelligent **L**ow-cost **E**cg), faisant rappel aux notions d'automatisation, de mobilité, d'intelligence et d'accessibilité de notre solution ECG destinée aux patients chroniques souffrant des maladies cardiovasculaires. A son tour, l'acronyme **SMILE** résume le but essentiel de notre solution : aider ces patients chroniques, augmenter leur qualité de vie et crayonner leur sourire.

III.5 - Contributions et solution à chaque problématique

Répondant à la majorité des problématiques rencontrées, la contribution majeure de notre solution **SMILE** réside sur le fait qu'elle donne une couverture totale de la vie quotidienne du patient face aux maladies chroniques et de son expérience comme étant l'utilisateur principal de la solution proposée. Elle lui accompagne durant toutes les étapes, face aux toutes les difficultés, ce qui peut couvrir la majorité de ses besoins. Les notifications, les indications structurées spécialement pour prendre en considération ses émotions, les fonctionnalités opérantes en arrière plan et automatiquement sans une interaction directe du patient, et les interventions directes, rapides et en temps réels des acteurs les plus importants pour la survie des patients, ce sont toutes ces caractéristiques qui donnent de l'originalité à notre plateforme proposée.

Sur le plan technique (Voir **FIG. III.3**), l'intégration des technologies les plus récentes et innovantes, l'incorporation des algorithmes de classification et de décision intelligents et performants basés sur les technologies de l'intelligence artificielle, les options d'interopérabilité et d'adaptation, l'automatisation des fonctionnalités et l'harmonisation entre les structures hardware et software donnent naissance à des services d'autant opérationnels qu'organisationnels, ce qui augmente d'une façon remarquable la fiabilité de nos solutions fournies.

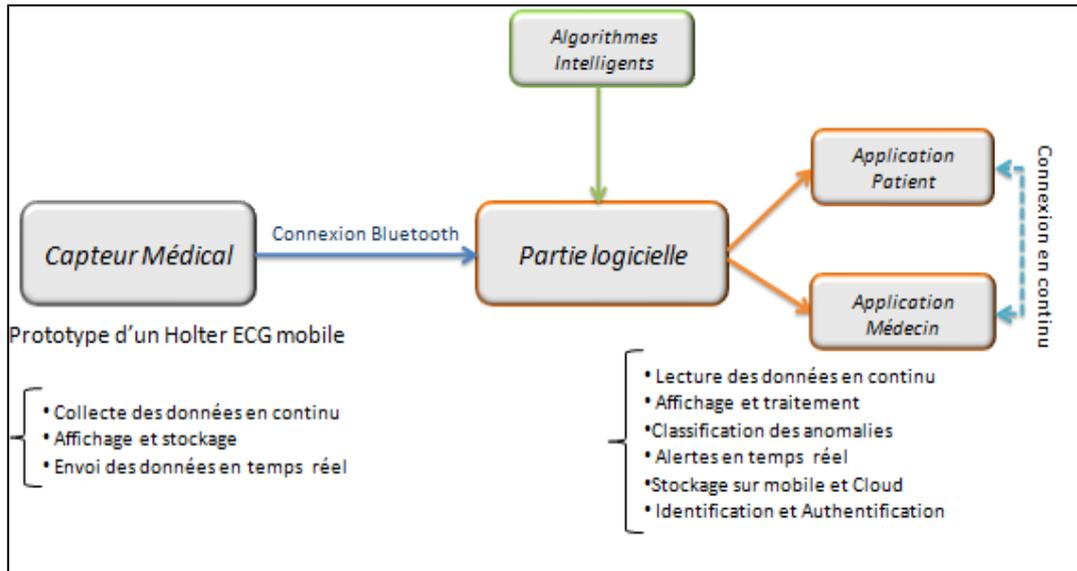


FIG. III.4 - Synthèse des contributions majeures de **SMILE**.

Une autre contribution très importante réside sur l'option de géo-localisation automatique intégrée au système proposé. Cette option est radicale pour sauver la vie des patients en danger. Toutes ces étapes sont établies parfaitement au même temps, ce qui apporte la notion 'temps réel' à notre solution proposée.

III.6 - Conclusion

Ce troisième chapitre a donné une image claire de notre solution **SMILE**, allant de la problématique, passant par les différentes étapes de design et de planification, jusqu'aux illustrations et architectures finales de notre système.

L'intelligence des décisions générées, la souplesse des interactions fournies, la préservation de la vie privée et la gestion des données personnelles en toute aisance ; par le biais d'une interface simple et facile à utiliser sont tous des caractéristiques majeures donnant naissance à **SMILE**. Cette solution qui a pour but principal la télésurveillance des patients chroniques souffrants des maladies cardiovasculaires intelligemment et en temps réel.

La partie suivante est consacré à l'interprétation des étapes indispensables à la réalisation pratique de notre solution, son implémentation et les démarches essentielles pour sa mise en œuvre.

Références

- [1] B. M. C. Silva, J. P. C. Rodrigues, I. T. Diez, M. L. Coronado, and K. Saleem, "Mobile-health: A review of current state in 2015", *J. Biomed. Inf.*, vol. 56, pp. 265-272, Aug. 2015.
- [2] IBM, "The digital hospital evolution", *Livre Blanc Editions IBM Global Business Services*, USA, Avril 2013.
<https://www.himss.eu/file/183/download?token=jqj90Jmn>
- [3] M. N. K. Boulos, A. C. Brewer, C. Karimkhani, D. B. Buller, and R. P. Dellavalle, "Mobile medical and health apps: state of the art, concerns, regulatory control and certification," *Online J. Pub. Health Inf.*, vol. 5, no. 3, Feb. 2014.
DOI: 10.5210/ojphi.v5i3.4814
<https://ojphi.org/ojs/index.php/ojphi/article/view/4814>
- [4] L. Vassieux, "Applications mobiles, objets connectés et promotion de la santé", *Dossier technique*, no. 9, France, Juin 2017.
https://ireps-bfc.org/sites/ireps-bfc.org/files/dt_ocs_promotion_sante_version_finale.pdf
- [5] Organisation Mondiale de la Santé, "Santé mobile : utilisation des technologies mobiles sans fil pour la santé publique", *Rapport du Secrétariat, Conseil Exécutif*, no. EB139/8, 2016.
https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB139/B139_8-fr.pdf
- [6] S. Cicalò, M. Mazzotti, S. Moretti, V. Tralli and M. Chiani, "Multiple Video Delivery in m-Health Emergency Applications," in *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 18, no. 10, pp. 1988-2001, Oct. 2016.
DOI: 10.1109/TMM.2016.2597001.
- [7] D. Zhong, M. J. Kirwan, and X. Duan, "Developing Interoperability Standards for Personal Health Devices", *Global forum, IEEE, Bluetooth Org and Continua Alliance*, Geneva, 24 Nov. 2013.
https://www.who.int/medical_devices/global_forum/Sun_pm_SAF_3_ZHONG.pdf?ua=1
- [8] M. W. J. Huygens, J. Vermeulen, I. C. S. Swinkels, R. D. Friele, O. C. P. Van Schayck, and L. P. De Witte, "Expectations and needs of patients with a chronic disease toward self-management and eHealth for self-management purposes," *BMC Health. Serv. Res.*, vol. 19, Jul. 2016.
- [9] A. Bourouis, "Développement d'applications de Télé médecine sur Smartphones", *Thèse de doctorat en Systèmes et Réseaux de Télécommunications de l'Université Abou Bekr Belkaid*, Tlemcen, Février 2014.
<http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/3718>
- [10] S. Paul, "Application des algorithmes de haute résolution à la localisation de mobiles en milieu confiné", *Thèse de doctorat en Micro et Nano Technologies, Acoustique et Télécommunications de l'Université des Sciences et Technologies de Lille*, France, juin 2010.
<https://ori-nuxeo.univ-lille1.fr/nuxeo/site/esupversions/7a0635f7-8633-4c99-843f-beb7177264dc>
- [11] S. M. Riazul Islam, D. Kwak, H. Kabir, M. Hossain, and K. S. Kwak, "The Internet of Things for Health Care: A Comprehensive Survey," *IEEE Access.*, vol. 3, pp. 678-708, Jun. 2015.
http://www.ieee.org/publications_standards/publications/rights/index.htm
- [12] L. Bote-Curiel, S. Muñoz-Romero, A. Gerrero-Currieses, and J. L. Rojo-Álvarez, "Deep Learning and Big Data in Healthcare: A Double Review for Critical Beginners," *MDPI*, vol. 1, pp. 2-34, 6 jun. 2019.
<https://www.mdpi.com/2076-3417/9/11/2331>
- [13] D. Metcalf, S. T. J. Milliard, M. Gomez, and M. Schwartz, "Wearables and the Internet of Things for Health : Wearable, Interconnected Devices Promise More Efficient and Comprehensive Health Care," *IEEE Pulse.*, vol. 7, pp. 35-359, Oct. 2016.
- [14] Nuance Communications Inc., "5 bonnes raisons d'intégrer la reconnaissance vocale au dossier patient", *Livre Blanc Editions Nuance*, France, 2014.
<https://www.himss.eu/file/190/download?token=17y5sq9b>
- [15] C. Zhang, P. Patras, and H. Haddadi, "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 30 Jan. 2019.
arXiv : 1803.04311 v3 [cs.NI]
<https://arxiv.org/abs/1803.04311>
- [16] A. M. Ahmed, "Augmented Intelligence", *Livre Blanc Editions AGFA healthcare*, USA, 2017.
https://www.himss.eu/sites/himss.eu/files/education/whitepapers/Augmented_Intelligence_The_Next_Frontier_%28English_-_White_Paper%29.pdf
- [17] M. Jemni and M. Koutheair Khribi, "ALECSO mobile apps initiative", *Scientific Phone Apps and Mobile Devices*, Springeropen, pp. 1-9, 2017.

https://www.researchgate.net/publication/315715653_ALECSO_mobile_apps_initiative

[18] A. M. Kuo, "Opportunities and Challenges of Cloud Computing to Improve Health Care Services", *J. Med. Internet Res.*, Sept. 2011.

<https://www.jmir.org/2011/3/e67/>

[19] Athenahealth, "Cloud-computing in healthcare : athenahealth", 2020.

<https://www.athenahealth.com/>

[20] A. Tahat, A. Sacca, and Y. Kheetan, "Design of an Integrated Mobile System to Measure Blood Pressure", *2011 18th IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, Nov. 2011.

DOI: 10.1109/SCVT.2011.6101306

[21] P. W. U. Chan, J. M. Nepomuceno and J. P. Ocampo, " Android Based Application for Blood Pressure and Real-Time Pulse Rate Monitor with SMS Alert Notification," *Design Report Bachelor of Science in Computer Engineering., Mapúa Institute of Technology, December 2012.*

[22] S. Gradl, P. Kugler, C. Lohmüller and B. Eskofier, "Real-time ECG monitoring and arrhythmia detection using Android-based mobile devices," *2012 Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, San Diego, CA, 2012, pp. 2452-2455, Sept. 2012.

DOI: 10.1109/EMBC.2012.6346460.

[23] A. Szczepański , K.Saeed, "A Mobile Device System for Early Warning of ECG Anomalies", *Sensors*, pp. 11031-11043, 2014.

<http://www.mdpi.com/journal/sensors>

[24] A. R. Fekr, M. Janidarmian, K. Radecka, and Z. Zilic, "Respiration Disorders Classification With Informative Features for m-Health Applications," *IEEE J Biomed. Health Inf.*, vol. 20, no. 3, pp. 733-745, Jul. 2015.

[25] S. H. Chang, R. D. Chiang, S. J. Wu, and W. T. Chang, "A Context-Aware, Interactive M-Health System for Diabetics," *IEEE Comput. Soc.*, vol. , pp. 14-22, 2016.

[26] A. La Cruz, R. Medina, F. Vega, W. Pérez, B. Ochoa, V. Saquicela, M. Espinoza, L. Solano-Quinde and M.E. Vidal, "Mobile Teleradiology System Suitable for m-Health Services supporting Content and Semantic Based Image Retrieval on a Grid Infrastructure", *IEEE*, pp. 3580-3583, 2016.

<https://europepmc.org/article/med/28269475>

[27] N. Zarka, M. M. Mansour and A.Saleh, "Mobile Healthcare System", *ICYRIME 2016 International Conference for Young Researchers in Informatics, Mathematics and Engineering*, vol. 1712, pp. 13-15, Catania, Italy, 2016.

<http://ceur-ws.org/Vol-1712/p03.pdf>

[28] T. P. Utomo, N. Nuryani and Darmanto, "QRS peak detection for heart rate monitoring on Android smartphone", *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2017.

DOI :10.1088/1742-6596/909/1/012006

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/909/1/012006/pdf>

[29] L. J. Mena, V. G. Felix, J. D. Melgarejo and G. E. Maestre, "Mobile Personal Health Monitoring for Automated Classification of Electrocardiogram Signals in Elderly," *Computational and Mathematical Methods in Medicine, Hindawi*, Vol. 2018, Article ID 9128054, 2018.

<https://doi.org/10.1155/2018/9128054>

[30] LifeScan, Inc, "OneTouch", 2018.

<https://www.onetouch.com/>

[31] iHealth Labs, "iHealthMyVitals", 2020.

<https://ihealthlabs.com/mobile-apps>

[32] iMDsoft, "MetaVision Products", 2017.

<https://www.imd-soft.com/metavision-products/mv-for-intensive-care>

[33] Meyko SAS, "Meyko : Care for me, I'll care for you", 2016.

<https://www.hellomeyko.com>

[34] Tactio Health Group, "Tactio Health", 2019.

<https://www.tactiohealth.com/fr>

[35] Empatica Inc., "Embrace2", 2020.

<https://www.empatica.com/en-eu/embrace2/>

[36] Siren, "Siren Care", 2020.

<https://siren.care/>

[37] Samsung Electronics Co, "Samsung Digital Health - Programming Guide", 2020.

<https://developer.samsung.com/health/android/data/guide/intro.html>

[38] Exelus SAS, "Nomadeec : Mobile Telemedicine Platform", 2019.

<https://nomadeec.com/>

[39] Butterfly Network Inc., "Echographe portable : Butterfly iQ", 2020.

<https://www.butterflynetwork.com/fr/>

[40] Qardio Inc., "Qardio - State of the Heart Technology", 2020.

<https://www.getqardio.com/>

[41] North Africa Health, "Soins de santé numériques en Afrique du Nord ", *Rapport de North Africa Health Editions Informa Markets*, 2020.

https://www.northafricahealthexpo.com/content/dam/Informa/northafricahealthexpo/english/downloads/NAH-IndustryReport_1_FRENCH.pdf

[42] Siemens Healthineers, "Avoiding Medical Errors and Adverse Events ", *Livre blanc Editions Siemens Healthcare GmbH*, 2018.

<https://www.siemens-healthineers.com/pl/education/avoiding-medical-errors>

[43] F. Touati and R. Tabish, "U-Healthcare System: State-of-the-Art Review and Challenges," *J. Med. Syst.*, Jun. 2013.

DOI: 10.1007/s10916-013-9949-0

<https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-013-9949-0>

[44] R. V. Milani, R. M. Bober, and C. J. Lavie, "The Role of Technology in Chronic Disease Care", *Progress in Cardiovascular Diseases, Elsevier*, pp. 579-583, 2016.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0033062016300019>

[45] C. C. Wilhide III, M. M. Peebles, and R. C. A. Kouyaté, "Evidence-Based m-Health Chronic Disease Mobile App Intervention Design: Development of a Framework," *Online J. Pub. Health Inf.*, vol. 5, no. 1, Feb. 2016.

DOI: 10.2196/resprot.4838

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26883135/>

[46] S. Ghouali, "Développement d'applications de Télé médecine sur Smartphones", *Thèse de doctorat en Systèmes et Réseaux de Télécommunications de l'Université Abou Bekr Belkaid*, Tlemcen, juin 2017.

<https://www.archives-ouvertes.fr/tel-01652792/document>

[47] GTX Corp, "GPS SmartSole", 2017.

<https://gpssmartsole.com/gpssmartsole/>

[48] M. S. Alberta, S. T. DeKoskyb, D. Dicksond, *et al.*, "The diagnosis of mild cognitive impairment due to Alzheimer's disease: Recommendations from the National Institute on Aging-Alzheimer's Association workgroups on diagnostic guidelines for Alzheimer's disease ", *Alzheimer's & Dementia, NCBI*, pp. 270–279 , 2011.

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3312027/>

[49] B.T. Hymana, C. H. Phelps, T. G. Beachc, *et al.*, "National Institute on Aging–Alzheimer's Association guidelines for the neuropathologic assessment of Alzheimer's disease", *Alzheimer's & Dementia* , NCBI, pp. 01–13 , 2012.

DOI:10.1016/j.jalz.2011.10.007

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4773596/>

[50] T. Li, W. Li, Y. Yang and W. Zhang, "Classification of brain disease in magnetic resonance images using two-stage local feature fusion", *PLoS ONE*, vol. 12, no. 2, Feb. 2017.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171749>

[51] J. Cancela, S. V. Mascato, D. Gatsios, *et al.*, "Monitoring of motor and non-motor symptoms of Parkinson's disease through a mHealth platform," in *Proc.38th Annu. Int. Conf. IEEE. Eng. Med. Biol. Soc.*, pp. 663-666, Aug. 2016.

[52] Accenture, "Beyond Records: The Service Design Approach to Digital Health adoption", *Livre blanc Editions Accenture*, 2015.

<https://www.himss.eu/content/accenture-beyond-records-service-design-approach-digital-health-adoption>

[53] M. Aitken and J. Lyle, "Patient Adoption of mHealth", *Livre blanc Editions IMS Health*, 2015.

<https://www.iqvia.com/-/media/iqvia/pdfs/institute-reports/patient-adoption-of-mhealth.pdf>

[54] C. Graham, "Study: Wearable Technology & Preventative Healthcare", *Livre blanc Editions Technology Advice*, 2014

<https://healthblawg.typepad.com/files/ta-study-wearable-technology-preventative-healthcare.pdf>

- [55] T. Ching, D. S. Himmelstein, B. K. Beaulieu-Jones, *et al.*, "Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine", *Royal Society*, pp. 01- 47, 2018.
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsif.2017.0387>
- [56] E. J. S. Luz, W. R. Schwartz, G. Cámara-Chávez, and D. Menotti, "ECG-based heartbeat classification for arrhythmia detection: A survey," *Computer Methods and Programs in Biomedicine.*, vol. 127, pp. 144–164, Apr. 2016.
<https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2015.12.008>
- [57] A. Auroy, M-B. badau, S. Bahou, P. Barreau, S. Bernhardt, "La Geolocalisation", *Livre INSA Lyon département Telecom Services & Usages*, Lyon, France, Janvier 2010.
<http://telecom.insa-lyon.fr/sites/default/files/cgt/promo-20092012%20-%20geolocalisation.pdf>
- [58] R. Merzougui, "Adaptation of an Intelligent Mobile Assistant Medical (IMAM) of the Heterogeneous Data for the Telemedicine Services: Design and Implementation," *Wireless Personal Communications.*, vol. 84, pp. 3091–3107, Oct. 2015.
- [59] J. Hanen, Z. Kechaou, and M. Ben Ayed, "An enhanced healthcare system in mobile cloud computing environment," *Vietnam J. Comput. Sci.*, vol. 3, pp. 267-277, 2016.
- [60] A. Tahat, G. Kaddoum, S. Yousefi, S. Valaee and F. Gagnon, "A Look at the Recent Wireless Positioning Techniques With a Focus on Algorithms for Moving Receivers," in *IEEE Access*, vol. 4, pp. 6652-6680, 2016.
DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2606486.
- [61] D. Réjane, "Méthodes de localisation par le signal de communication dans les réseaux de capteurs sans fil en intérieur", *Thèse de doctorat en Informatique et Systèmes Embarqués de l'Université de Toulouse*, France, juin 2013.
<https://www.theses.fr/2013ISAT0020.pdf>
- [62] T. Shah, A. Yavari, K. Mitra, S. Saguna, P. P. Jayaraman, F. Rabhi, R. Ranjan, "Remote health care cyber-physical system: quality of service (QoS) challenges and opportunities," *IET Cyber-Phys. Syst., Theory & Appl.*, vol. 1, pp. 40-48, 2016.
- [63] Silicon Laboratories Inc., "AN988 : Health Device Profile", *iWRAP Application Note*, version 3.5, Thursday, 28 Mar. 2019.
<https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN988.pdf>
- [64] P. K. D. Pramanik, B. K. Upadhyaya, and S. Pal and T. Pal, "Internet of things, smart sensors, and pervasive systems: Enabling connected and pervasive healthcare", Chapter, *Healthcare Data Analytics and Management*, Elsevier Inc, Nov. 2018.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815368-0.00001-4>
- [65] A. Hommersom, P. J. F. Lucas, M. Velikova, G. Dal, J. Rodrigues, M. Germs and H. S. Evalan BV, "MoSHCA – My Mobile and Smart Health Care Assistant," in *Proc. IEEE 15th Int. Conf. e-Health Network. Appl. Serv.*, pp. 188-192, 2013.
- [66] D. Camps-Mur, A. Garcia-Saavedra and P. Serrano, "Device-to-device communications with Wi-Fi Direct: overview and experimentation," *IEEE Wireless Communications Magazine*, Jun. 2013.
DOI: 10.1109/MWC.2013.6549288
- [67] M. Eckert, J. S. Volmerg and C. M. Friedrich, "Augmented Reality in Medicine: Systematic and Bibliographic Review," *JMIR Mhealth Uhealth*, vol. 7, no. 4, Apr. 2019.
DOI: 10.2196/10967
- [68] O. Adetunjia, C. Ajaegbub, N. Otunemec, and O. J. Omotosho, "Dawning of Progressive Web Applications (PWA): Edging Out the Pitfalls of Traditional Mobile Development", *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS)*, vol. 68, no. 1, pp. 85-99, May, 2020.
https://asrjetsjournal.org/index.php/American_Scientific_Journal/article/view/5812
- [69] Site officiel de l'Organisation mondiale de la Santé, "Maladies cardiovasculaires", 2020.
[https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- [70] Medgeeks, D. Champigny, "How to Read an ECG - Medgeeks", 2020.
<https://medgeeks.co/articles/how-to-read-an-ecg>
- [71] WebMD LLC, "WebMD - Alzheimer Dementia", 2017.
<https://www.webmd.com/alzheimers/default.htm>
- [72] K. Lakhdari, R. Merzougui and H. Slimani. "An intelligent m-Health Platform for Chronic Diseases: Design and Conception", *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, vol. 13, no. 3, 2018.

Deuxième Partie : Solution proposée

Chapitre I

Classification des données médicales, des signaux et des images

SOMMAIRE

- I.1 – Classification, une approche multisectorielle
 - I.2 – Approche algorithmique
 - I.3 – Résultats et performances
 - I.4 – Présentation de la base des données "PTB-DB"
 - I.5 – Transformation du signal aux images
 - I.6 – Classification des images
 - I.7 – Conclusion
-

La conception d'une solution destinée au domaine médical sensible et exigeant, nécessite une forte base logique sur laquelle le traitement des données et la fourniture des décisions finales s'appuient. Pour cela, notre plateforme **SMILE** déploie des algorithmes avancés de traitement et de classification de l'ECG. Ces méthodes intelligentes sont détaillées dans ce chapitre.

Vers la fin, des travaux additionnels destinés au traitement des images médicales sont aussi présentés, pour donner à notre solution la possibilité d'intégrer encore plus de maladies chroniques.

I. 1 - Classification, une approche multisectorielle

En mathématique, la classification regroupe l'ensemble des lois et des règles essentielles à l'établissement d'un tri ou d'un classement des paramètres définies [97]. Gardant toujours le même concept, en informatique et plus précisément dans le domaine des sciences des données, la classification signifie l'étude approfondie d'un ensemble de données, et les mettre chacune dans la classe la plus convenable [82]. Elle appartient au groupe dit "Supervised Learning" de la branche de AI. Ce type d'apprentissage rassemble les cas où nous savons vraiment les classes finales, dans lesquelles les données traitées s'appartiennent [90]. Son utilisation est donc radicale lorsqu'il s'agit de fournir des réactions différentes pour chaque paramètre. D'une autre façon, elle est très efficace en définissant la règle "*qui prend quoi*".

Pour cela et vu son impact à la décision et à la fourniture des services adéquats, la classification représente une approche multisectorielle, qui peut être utilisée dans une large variété d'applications quotidiennes. Allant des conceptions industrielles, militaires, automobiles, jusqu'aux applications de santé, de traitement des données, des signaux et des images médicales [112].

I. 1.1 - Classification d'un signal ECG

Répondant aux exigences médicales et vu que le signal ECG représente un critère très important pour le diagnostic et la détection des anomalies cardiaques, pouvoir classier les données ECG d'une façon intelligente symbolise une révolution des services médicaux spécialisés [106], [111].

Cette idée de classification de l'ECG n'est pas vraiment très récente. Depuis longtemps, beaucoup de recherches scientifiques ont été consacré à introduire de nouvelles méthodes, de combiner des méthodes déjà existantes, et de proposer des nouvelles démarches scientifiques. l'état de l'art de ce domaine est très large ; allant des méthodes mathématiques plus anciennes, comme les transformées de Fourier, passants par l'utilisation des ondelettes (Wavelets), l'utilisation des techniques de ML, finissant par l'utilisation des algorithmes plus profonds de DL [111]. Cette dernière méthode enrichit les réseaux de neurones avec d'autres opérations mathématiques plus anciennes comme la convolution pour donner naissance aux réseaux CNN [73], [103].

Après une large étude des travaux scientifiques dédiés à la classification de l'ECG, le tableau **Tab. I.1** représente un état de l'art bien résumé des différentes techniques utilisés dans la littérature.

Auteurs	Année	Description	Techniques utilisées	Performances
W. W. Tan <i>et al.</i> [130]	2007	Cette étude propose une application de la logique floue (Fuzzy Logic) pour classier l'ECG. Trois classes sont traités (Normal, Fibrillation Ventriculaire, Tachycardie)	Le système analyse la largeur du complexe QRS et la période de l'intervalle [R-R]. Selon ces paramètres, des règles sont générées pour classier les données de l'ECG. Le type-2 de la méthode de la logique floue est proposé. Ce type utilise une méthode de regroupement (Clustering) des données.	Le taux de précision de cette méthode est de 90,91% pour la détection de Tachycardie, et 84% pour la fibrillation Ventriculaire.
V. D. Montano <i>et al.</i>	2015	Ce travail introduit la conception d'un appareil de mesure de l'ECG et sa collecte	Le réseau utilisé pour cette classification est un réseau de neurones (NN) composé de	Ce travail a abouti à une moyenne de précision de 98,67%.

[131]		et classification par une application mobile utilisant les technologies de l'AI.	trois couches, avec 12, 13 et 5 neurones, respectivement. L'entraînement de ce de réseau est appliqué en utilisant l'algorithme de "Levenberg Marquardt (MLA)".	Sa sensibilité est de 96,67%.
C. I. M. Cruz <i>et al.</i> [132]	2016	<p>Cet article a étudié deux techniques de classification du signal ECG. Il représente une comparaison des performances de ces deux techniques.</p> <p>Les données ECG sont à l'origine de la célèbre base de donnée "MIT-BIH Arrhythmia", de "PhysioNet".</p> <p>La procédure suivie est composée de trois étapes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Obtention des données. 2. Utilisation de la technique des ondelettes "Discret Wavelet Transform (DWT)" pour l'extraction des informations utiles à partir de l'ECG. 3. Classification du signal en utilisant deux techniques de Machine Learning couplées à DWT. 	<p>1- "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)" couplée à La méthode "Haar Mother Wavelet": ANFIS est une technique qui combine les réseaux de neurones (NN) avec la logique floue (Fuzzy Logic).</p> <p>2- "Support Vector Machine (SVM)" couplée à la méthode "Mother Wavelet Daubechies": SVM est sous forme des méthodes linéaires de classification, appartenant au groupe dit "Supervised Learning". Dans cette étude la fonction nommée "Radial Basis" est utilisée.</p>	<p>D'après cette étude, la deuxième technique (SVM + DWT) est plus performante que la première méthode (ANFIS + DWT). La classification de l'ECG a donné quatre classes distinguées:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ECG normal. 2. Bruit (pas un ECG). 3. ECG anormal, détectant la fibrillation artérielle. 4. ECG anormal, détectant la Tachycardie .
M. Zihlmann <i>et al.</i> [133]	2017	<p>Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'application des technologies de DL pour la classification de l'ECG.</p> <p>Les données utilisées sont celles du challenge "CinC Challenge 2017" de PhysioNet. Cette étude se focalise sur la classification de la fibrillation artérielle.</p>	<p>Cette étude introduit deux formes des réseaux de neurones profonds:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. CNN : C'est un réseau profond constitué des couches de convolution regroupées en block; tel que chacun contient 4 couches, avec un calcul de moyenne temporelle. 2. Convolutional Recurrent Neural Network (CRNN): Contrairement au premier réseau, les blocks dans ce réseaux sont constitués de 6 	<p>La deuxième méthode est plus performante que la première, avec un degré de précision de 82.3% pour le CRNN devant 81.2% pour le CNN.</p>

			<p>couches.</p> <p>A la place d'un calcul simple de la moyenne temporelle, une approche dite Long-Short Term Memory (LSTM) est ajoutée.</p>	
J. Li <i>et al.</i> [126]	2018	<p>Dans le même contexte de l'utilisation des systèmes de Deep Learning pour la classification de l'ECG, ce travail résout le problème d'inadaptation des réseaux CNN à la morphologie du signal ECG.</p> <p>Cette initiative transforme le signal ECG de 1D en un vecteur à 2D pour être plus supportable par les CNN.</p>	<p>La technique de transformation utilisée est de fusionner le signal ECG avec des informations de rythme cardiaque obtenues à partir de la base de données "MIT-BIH Arrhythmia". Cette fusion est faite par une méthode de codage dite "One-Hot Encoding".</p>	<p>Cette idée de transformer le signal ECG en un vecteur de 2D a amélioré clairement les performances des réseaux CNN.</p> <p>La précision obtenue de cette classification est augmentée jusqu'à 97%.</p>
X. Zhai et C. Tin [129]	2018	<p>Similaire à la précédente, cette étude introduit une technique de transformation du signal ECG en une matrice de deux dimensions. Cependant, la méthode de classification (surtout partie de trainage du model CNN) est beaucoup plus automatisée.</p>	<p>Pour transformer le signal ECG en une information bidimensionnelle sous forme d'une matrice, une technique de couplage des signaux adjacents est pratiquée.</p> <p>La sélection des entrées pour la phase "trainage" est déclenchée automatiquement, en choisissant les ondes S les plus remarquables.</p>	<p>Ce réseau est d'autant plus performant aux solutions précédentes, que sa précision a abouti à un pourcentage de 98.6%.</p>
S. Savalia et V. Emamian [92]	2018	<p>Cet article utilise deux types des réseaux de neurones profonds, dérivantes des technologies deDL.</p>	<p>La première méthode utilisée est celle nommée "Multi-Layer Perceptron (MLP)", et constituée de quatre couches.</p> <p>La deuxième méthode est sous forme d'un réseau CNN avec quatre couches de convolution.</p> <p>Les deux algorithmes sont programmés en Python, en utilisant la librairie "TensorFlow".</p>	<p>Les deux méthodes prouvent leur bon fonctionnement avec des performances favorables de 88,7% de précision du système MLP et de 83,5% de précision du réseau CNN.</p>
J. Zhang <i>et al.</i> [127]	2019	<p>Cette étude représente une nouvelle manière d'utilisation des réseaux CNN.</p> <p>Cette méthodologie consiste à générer un modèle de classification sur chaque niveau, fusionner les modèles</p>	<p>Avant de faire passer le signal ECG dans un CNN, une première étape consiste à transformer son domaine temporel en un spectre de fréquences; en utilisant la transformée de Fourier "Short-Time Fourier</p>	<p>Le résultat de cette méthode sera la fusion des modèles générés pour des données de volumes variés à chaque niveau. Donc, ce</p>

		généralisés et reproduire un modèle final plus performant.	Transform (STFT)". La deuxième étape établit une approche de DL ; en introduisant un réseau CNN. La dernière étape consiste à effectuer une méthode de fusion des sorties de prédiction générées à chaque niveau.	le modèle final est bien plus performant que les autres modèles. Cette méthode est alors très fiable, et sa précision est parvenue à 99% pour des données de test.
J. Huang <i>et al.</i> [95]	2019	Suivant la même direction, cette étude a proposé encore une fois la STFT, pour la première étape avant d'utiliser le CNN. Cette étude analyse l'impact des paramètres du CNN sur ses performances. Un nombre défini de cinq classes du signal ECG est traité.	La sortie spectrale du STFT représente l'entrée d'un réseau de CNN à deux dimensions (2D-CNN). Une comparaison de ce réseau avec un autre d'une seule dimension (1D-CNN) est établie. Le changement des paramètres de CNN ; y compris le taux d'apprentissage et la taille des lots (batch size) est appliqué pour mesurer leur impact sur les performances du CNN.	Le réseau proposé en 2D est plus performant que celui de 1D. Il a atteint un taux de précision de 99%. Le bon choix des paramètres du CNN et l'intégration du STFT ont amélioré remarquablement les résultats.

TAB. I.1 – Etat de l'art des méthodes de classification des données de l'ECG.

D'après le tableau TAB. I.1, et malgré la variété des procédures suivies pour classifier les données de l'ECG, une large intégration des technologies de ML et de DL est interprétée ; vu sa grande efficacité à classifier les données de l'ECG, plus intelligemment et précisément. Ce domaine de AI est basé sur les réseaux de neurones. La forme d'un réseau de neurones artificiels (ANN) est inspirée du réseau de neurones naturels ; qui constituent le cerveau humain. C'est le modèle choisi par les savants pour donner à la machine une puissance de résolution des problèmes plus complexes, simulant celle du cerveau humain [79].

I. 1.1.1 - Perceptron

La forme la plus simple des ANN est celle constituée d'un seul neurone. Cette forme est nommée "Perceptron" [92]. Tout comme le neurone naturel, le perceptron est généralement composé d'un ensemble des entrées et une seule sortie (Voir FIG. I.1). Il faut noter que le perceptron supporte seulement des valeurs numériques. De ce fait, il définit des seuils à respecter pour chaque classe de données, ce qui revient à pratiquer la méthode de classification [91].

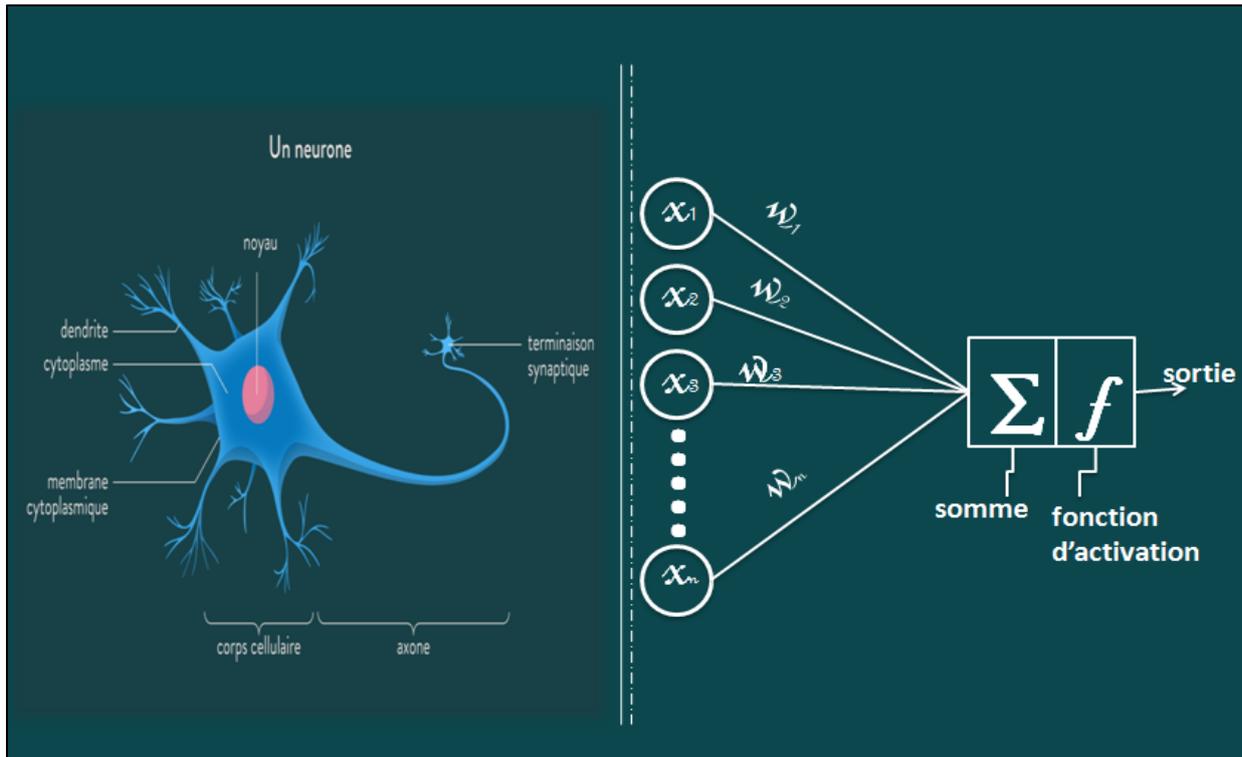


FIG. I.1 - Comparaison entre la forme d'un neurone naturel et celle d'un perceptron.

Les principaux composants de ce perceptron peuvent être détaillés comme suit :

- Entrées : Elles sont multiples sous forme de valeurs numériques (sous forme de nombres réels).
- Connexions : Ces connexions apportent des poids bien déterminés aux liaisons du réseaux (peuvent être aussi des nombres réels).
- Une somme : A ce niveau, une somme des produits résultants de la multiplication de chaque entrée avec son poids est établie.
- La fonction d'activation : le résultat de la somme symbolise l'entrée d'une autre fonction de transfert appelée "la fonction d'activation". Cette fonction a pour rôle de donner un aspect de continuité au résultat de la somme; qui est plus au moins discontinu. Il existe de nombreux types de cette fonction, cependant, la fonction dite "Sigmoide" est la plus utilisée.

I. 1.1.2 - Multi-Layer Perceptron

Un ensemble de perceptrons organisés en un nombre de couches bien déterminé est connu par le nom "Multi-Layer Perceptron (MLP)" [92]. Ce type des réseaux ANN est caractérisé par des couches totalement connectées, dont chaque perceptron de chaque couche est lié à chaque perceptron de la couche suivante [92]. Les sorties d'une couche représentent donc les entrées de la couche suivante (Voir Annexe A).

I. 1.1.3 - Notions de ML et de DL

Les réseaux de neurones représentent le noyau des algorithmes de ML. Cette subdivision de l'AI a pour but principal de pousser la machine (ordinateurs, PC, terminaux mobiles, etc.) à apprendre de générer ses propres algorithmes pour résoudre un problème, en se basant sur l'étude approfondie des données en relation avec ce problème [100]. Contrairement aux cas ordinaires, où il est

indispensable d'écrire le code du programme pour que la machine résolve ce problème. La classification des données vient alors dans ce cas, après la phase de l'extraction des caractéristiques capables de classifier ces données.

A son tour et comme étant une subdivision du ML, le DL introduit des réseaux de neurones beaucoup plus profonds ; avec un grand nombre de couches intermédiaires (entre les entrées et les sorties) pour produire des modèles de classification et de prédiction plus performant [94]. Cette méthode fusionne la phase de l'extraction des caractéristiques et celle de la classification en une seule étape (Voir Fig. I.2).

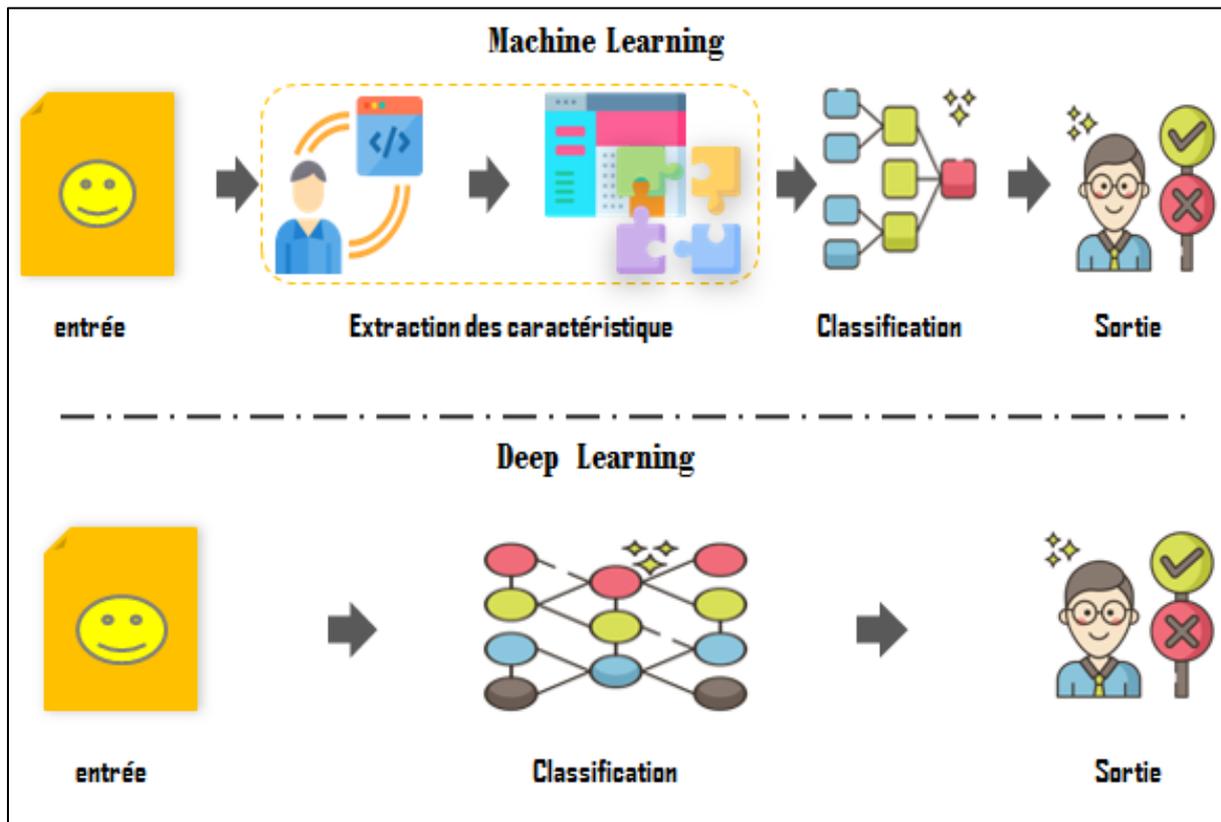


FIG. I.2 - Comparaison entre l'architecture des réseaux ML et celle des réseaux DL.

I. 1.1.4 - Principaux types de la technologie DL

Le domaine DL est composé principalement de deux grandes catégories, selon la façon à laquelle les réseaux de neurones sont arrangés (Voir Annexe A). Ces deux catégories représentent les réseaux de neurones à des connexions directes ; en un seul sens entre les différentes couches, connus par le terme "Feed Forward (FFNN)". Le deuxième type est caractérisé par ces connexions sous forme d'un cycle répétitif ; en utilisant une mémoire interne pour se souvenir des événements passés et former de nouvelles entrées à chaque fois. Ce type itératif des réseaux de neurones regroupe des réseaux récurrents RNN [78].

Parmi les FFNN les plus utilisés pour le traitement des images, les réseaux CNN sont caractérisés par un nombre multiple de couches intermédiaires exécutant l'opération mathématique de convolution, en plus des autres opérations possibles [108] (Voir Fig. I.3). Ce type de réseaux est le plus adapté à la morphologie bidimensionnelle des images car il est basé sur l'extraction des caractéristiques visuelles des données [88]. Il étudie leur apparence et leur figure totale. Cette convolution permet d'analyser

la totalité de l'image, pixel par pixel, pour détecter ses caractéristiques indispensables à sa classification [112].

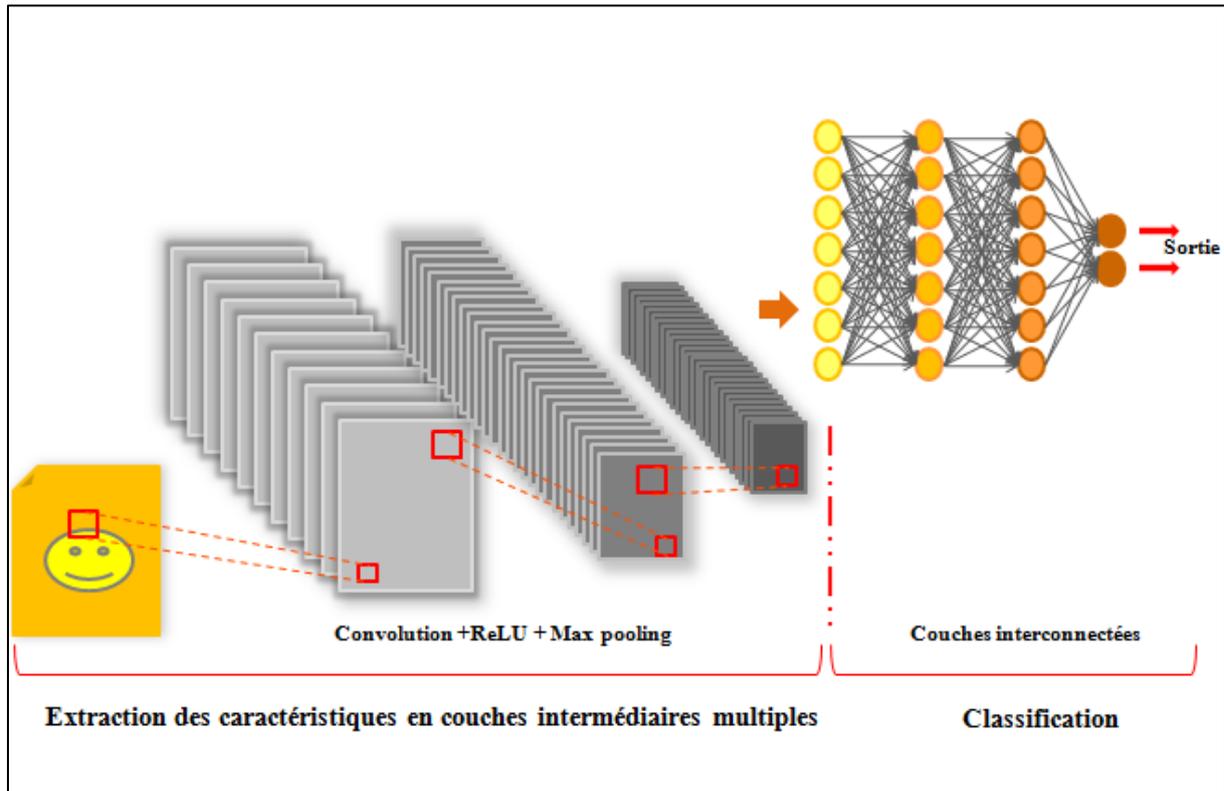


FIG. I.3 - Architecture des réseaux CNN.

Il existe d'autres types des réseaux FFNN, comme la machine dite "Restricted Boltzmann Machine (RBM)" ou les réseaux "Deep Belief Networks (DBN)" composés d'un ensemble des RBM et ayant la capacité de reconstruire probablement leurs entrées [115], [79]. Ce dernier type est plus préféré pour l'étude du signal EEG [115]. **Annexe A** représente une illustration détaillée des types de réseaux de neurones discutés dans cette partie.

I. 1.1.5 - Rôle des données

La qualité des données traitées par ces algorithmes est aussi très importante. La base de données utilisée doit être la plus claire possible, pour donner à la machine toutes les informations indispensables à la génération d'un bon modèle de classification ou de prédiction [103]. Pour cela des étapes de filtrage, de prétraitement et même d'augmentation peuvent être établies avant de déclencher la procédure de ML. Ces données généralement massives (Big Data) doivent comporter le plus grand nombre des cas possibles caractérisant une classe ou une catégorie ; vu que le nombre des données en plus de sa qualité peut augmenter d'une façon remarquable les performances du modèle généré [103].

I. 1.1.6 - Création d'un modèle DL

La démarche DL consiste à concevoir des modèles de réseaux de neurones très profonds (multicouches) pour classer les données ou prédire leurs évolutions possibles [106]. Cette démarche s'appuie sur les données qui représentent les ressources indispensables à son

déclenchement. Cette première étape est sous forme d'une succession des opérations de traitement des données afin de produire une meilleure qualité d'informations constructives du modèle. Ce traitement représente tout acte de filtrage, d'amplification, d'augmentation ou de segmentation [103], [109]. Cette étape n'est pas toujours obligatoire, mais importante pour offrir au modèle les ressources nécessaires à son bon fonctionnement. A ce niveau, le DL à son propre sens peut se déclencher. La sélection d'une version primaire du modèle de réseaux de neurones peut s'exécuter ; en se basant sur la nature du domaine, les catégories, et les objectifs visés par le développeur. Pour cela, des pré-requis sur l'état de l'art et la littérature couvrant ce domaine sont très importants pour une sélection pointue d'un modèle plus convenable aux besoins du concepteur [114].

Après cette sélection, une étape d'entraînement (Train) de la machine est déclenchée. Durant cette étape, le modèle va recevoir les données, les analyser et de même extraire les informations nécessaires pour générer ces propres méthodes de calcul, de classification et de prédiction [111]. Cette étape d'entraînement consomme le pourcentage le plus grand des données utilisées (Voir Fig. I.4). Par la suite, une étape de validation des résultats de ce modèle est établie afin de mesurer ses performances. Si ces dernières ne sont pas vraiment satisfaisantes, la variation des valeurs et de la morphologie du modèle est toujours la meilleure solution, jusqu'à l'obtention du modèle le plus convenable avec les performances les plus avantageuses [83]. Le modèle est maintenant prêt à être tester. A ce stade, les nouvelles données non labélisées (le petit pourcentage restant) sont utilisées pour examiner le modèle généré [108]. C'est au modèle maintenant de faire correspondre ces données à leurs caractéristiques respectives.

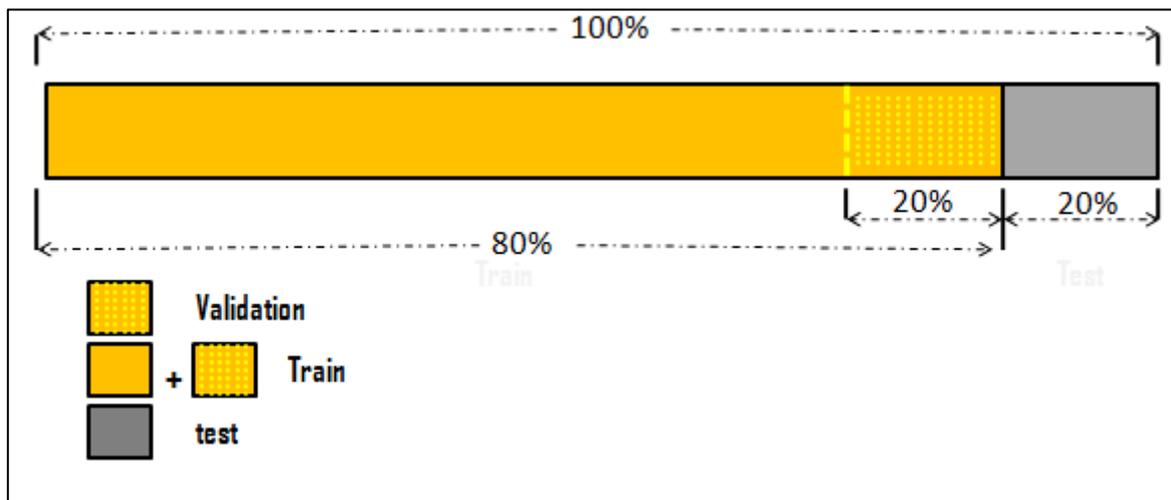


FIG. I.4 - Subdivision des données entre les trois étapes : entraînement, validation et test.

Le modèle DL est maintenant préparé à être déployer pour classifier ou prédire les événements, les paramètres ou les phénomènes envisagés. Il peut être de même exporter à d'autres environnements de développement des applications ; selon les besoins et suivant certaines méthodes (Voir Fig. I.5).

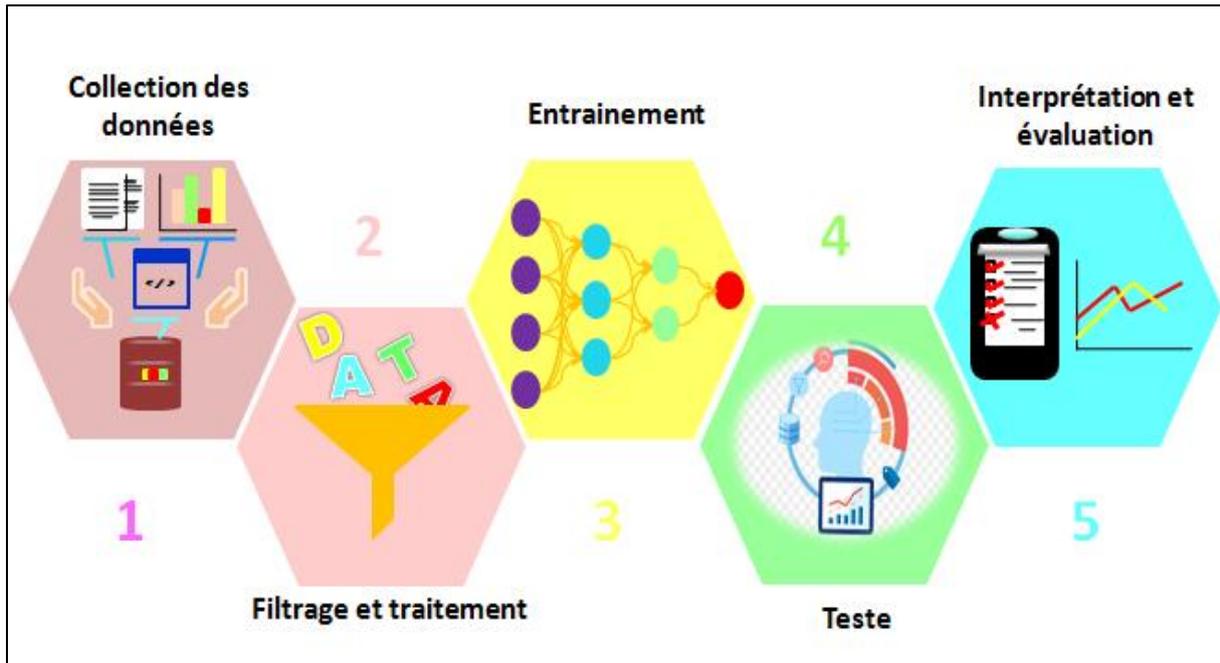


FIG. I.5 - Etapes principales pour la production et le déploiement d'un modèle de classification.

I.2 - Approche algorithmique

Pour la réalisation de notre approche de classification proposée, une sélection des outils et des méthodes indispensables à cette conception est privilégiée. Ces méthodes sont d'autant plus efficaces que récentes. La partie suivante explique ce choix pointu des logiciels et des méthodes de classification utilisées.

I.2.1 - Langage de programmation

Le langage de programmation utilisé dans cette méthode est le langage le plus préféré par les experts dans le domaine de traitement des Big Data et des technologies de ML. Ce langage est celui connu par le nom "Python". Les domaines d'application de ce langage de programmation ne cessent de prendre de l'ampleur depuis 20 ans de sa première apparition [116]. Python est reconnu pour sa très grande simplicité et souplesse à résoudre des problèmes complexes, allant du développement des applications de toutes sortes, à l'automatisation des tâches quotidiennes, y compris les applications de ML et d'AI [117]. Les versions utilisées lors de cet œuvre est " 3.6" et "2.7", vu leur compatibilité avec les autres éléments choisis.

I.2.2 - Environnements de développement et auxiliaires

- Miniconda : Le système nommé par "Miniconda" est utilisé pour gérer l'environnement du développement de notre solution. Cet intermédiaire est une dérivée du système "Conda" ; conçu spécialement pour résoudre les problèmes reconnus au cours du développement des applications sous Python [118]. Cette solution est idéale pour se remédier aux problèmes d'installation, de compatibilité et de gestion des paquets (Packages) nécessaires aux déploiement des technologies de DL.
- Jupyter : Ce carnet (Notebook) est un projet sous forme d'une application web dédiée au développement des applications écrites en une variété de langages de programmation ; y

compris le langage Python [119]. Durant cette réalisation, nous allons utiliser ce moyen pour exécuter et visualiser nos programmes.

- Tensorflow : C'est une librairie ouverte aux développeurs (Open-Source) pour concevoir des systèmes de ML. Cette librairie est introduite par l'industrie Google. Elle offre un contrôle souple des modèles, en proposant un système très flexible qui peut être exécuter sur une variété de terminaux [122]. Il existe dans la littérature d'autres librairies équivalentes à celle-ci, comme la librairie "Theano" développée par l'institut Québécois "Mila" et la librairie "CNTK (Cognitive Toolkit)" de Microsoft [123]. Nous optons à travailler avec Tensorflow, vu sa compatibilité avec les applications mobiles Android.
- Keras : C'est une librairie de haut niveau. Elle peut être exécuter en dessus de Tensorflow, vu qu'elle représente une bonne interface des librairies de DL. Son utilisation est beaucoup plus simple et facile [123].
- WFDB : Cette librairie contient des outils conçus spécialement pour accéder, manipuler et traiter les données médicales offertes sur la célèbre plateforme "PhysioBank" [124].
- Scikit-Learn : C'est une autre librairie écrite en Python, dédiée spécialement à la construction et au déploiement des modèles de ML. Elle permet également d'examiner les performances de ces modèles et leur degré de précision [117].
- Numpy : écrite aussi en Python, cette librairie permet de gérer les données numériques sous forme de tableaux [117]. Elle représente une dérivée de Scipy, le système conçu pour le but d'assembler les librairies de Python. Une autre équivalente de Numpy est connue par Pandas, la librairie dédiée spécialement à la manutention des données [117].
- Matplotlib : Après leur manipulation par les bibliothèques citées auparavant, la présentation graphique de ces données est réalisée grâce à cette librairie nommée Matplotlib [117].
- Biosppy : est une librairie dédiée spécialement au traitement des signaux physiologiques, y compris l'ECG, l'EEG, l'EMG, etc. Elle offre notamment des fonctionnalités de filtrage, de segmentation et d'analyse de ces signaux biologiques [121].
- OpenCV : est une autre librairie de traitement d'image en 2D, de détection des objets en 3D et de vision graphique. De même, elle est très fiable pour l'analyse des vidéos. Contrairement aux autres librairies, OpenCV n'est pas disponible seulement en Python, elle est aussi écrite en Java et en C++ [120].

1.2.3 - Bases de données

Les données de l'ECG utilisées lors de cette étude appartient à la fameuse base de données "MIT-BIH Arrhythmia Database". Cette base de données regroupe des enregistrements du signal ECG de 47 personnes [102]. Ces signaux étaient numérisés en 360 échantillons par seconde pour chaque canal. Le nombre total des annotations (des symboles explicatifs des signaux, comme par exemple l'annotation N pour le signal normal) est de 110000 annotations [102]. Cette base de donnée contient des enregistrements de 1440 minutes en total. Il existe d'autres bases de données dédiées aux études scientifiques de l'ECG comme la base de donnée de l'association Américaine "AHA" et la base de données Européenne "European ST-T" [102]. Cependant, la base de données MIT-BIH reste la base de données de l'ECG la plus célèbre, vu son utilisation scientifique fréquente. Elle représente les classes de l'ECG normal (qui ne représentent aucune anomalie), des contractions prématurées (auriculaires et ventriculaires), des deux blocs de branche (droite et gauche) et du signal à un rythme accéléré [102].

Une autre base de données intégrée à cet œuvre est nommée "PTB-DB". Cette base de donnée contient des archivages des signaux ECG de 290 personnes avec un taux de 1 à 5 enregistrements par personne [125]. Les classes étudiées sont variées. Elles peuvent être résumées en deux classes principales représentant les signaux des personnes saines et celles des personnes atteintes d'une variété de maladies coronariennes comme l'infarctus du Myocarde (la mort partielle des cellules constituant le muscle cardiaque, connue communément par la crise cardiaque [69]).

1.2.4 - Concept général

Le but principal de cette étude est d'analyser le signal ECG, le classifier et détecter systématiquement ses anomalies afin de donner naissance à des outils logiciels performants. Ces outils aident les professionnels de santé à suivre l'état de leurs patients en temps réel, à générer leur décision en toute rapidité, efficacité et permanence et à gagner du temps en cas d'une urgence susceptible. Pour cela, une approche algorithmique basée sur le DL est suivie afin de permettre à la machine de classifier l'ECG d'une manière souple et efficace. Le modèle adapté à cette situation utilise une architecture de CNN caractérisée par des paramètres et des ingrédients bien choisis, déduits d'une étude approfondie des outils mathématiques les plus adaptatives à la classification des signaux ECG.

1.2.5 - Méthodologie

Choisir le type des réseaux CNN pour classifier un signal (des valeurs en une seule dimension "1D") est un challenge au vrai sens du mot, vu que ce type des réseaux de neurones était conçu spécialement pour la classification des images (des valeurs en deux dimensions "2D"). Cependant, plusieurs travaux scientifiques ont prouvés leur capacité de classifier ces paramètres unidimensionnels, en donnant des résultats très encourageants [78], [82], [83], [93]. A son tour, notre modèle de classification des signaux ECG basé sur cette architecture est précédé de plusieurs étapes de prétraitement des données de l'ECG utilisées lors de ce mécanisme. Ces principales étapes sont présentées dans l'ordre suivant :

- Chargement des données :

La toute première étape s'agit de charger les données nécessaires à l'entraînement du modèle de classification. Ce chargement se fait directement à partir des bases de données choisies et en utilisant les outils de manipulation des données proposés par la bibliothèque WFDB. Vu que la première base de donnée choisie est celle nommée MITBIH, le chargement des données met en valeur les cinq classes du signal ECG qu'elle contient (Voir Fig. 1.6). Nous pouvons extraire les informations essentielles sur ses données en utilisant quelques lignes de programmation en Python (Voir Fig. 1.7).

```
0      90589
4       8039
2       7236
1       2779
3        803
Name: 187, dtype: int64
```

FIG. 1.6 - Quantité et type des données des classes de MIT-BIH.

```

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 109446 entries, 0 to 21891
Columns: 188 entries, 0 to 187
dtypes: float64(188)
memory usage: 157.8 MB
None

```

FIG. I.7 - Type, taille et usage en mémoire des données MIT-BIH.

Pour bien comprendre et analyser cette base de données, nous avons établi quelques présentations graphiques à l'aide des outils et des bibliothèques de programmation comme Pandas et Numpy, pour illustrer la subdivision des données selon ces classes (Voir **Fig. I.8**). Les signaux normaux "n" en rouge prends la majorité avec un pourcentage de 82.8%. La deuxième classe en vert est celle nommée "q", elle regroupe des signaux aléatoires et bruités. La classe dite "v" est celle qui représente des contractions ventriculaires rapides et anormales au niveau des ventricules (apercevables au niveau des complexes "QRS" de l'ECG [80]), pendant que "s" est la classe qui symbolise des anomalies au niveau des contractions supra-ventriculaires (entre ventricules et oreillettes) ; signalant des troubles de rythme cardiaque comme la Tachycardie (fréquence cardiaque élevée [70]). La dernière classe "f" représente les signaux formant une fusion des signaux normaux et ventriculaires.

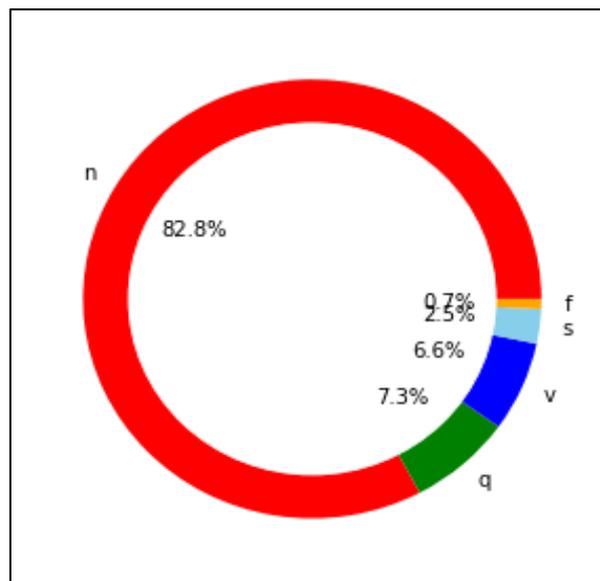


FIG. I.8 - Subdivision et pourcentage des données de chacune des 5 classes.

Pour plus de détails, des illustrations des exemples de ces classes "n", "s", "v", "f", et "q" sont introduits par la suite (Voir **Fig. I.9**).

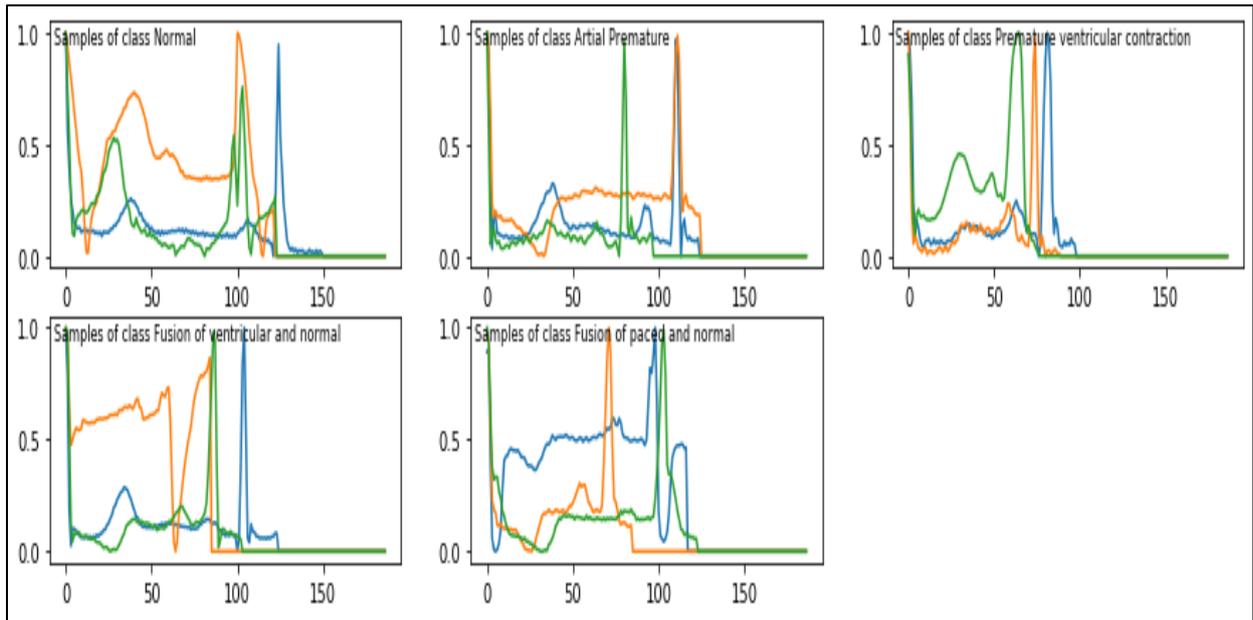


FIG. I.9 - Exemples des données de chaque classe (n, s, v, f et q).

- Annotations des données :

L'étape suivante consiste à attribuer les annotations convenables à chaque battement (Voir FIG. I.10). Ces annotations représentent des symboles spécifiques utilisés pour différencier chaque type de battements. Ceci a pour but principale de faciliter la lecture et l'apprentissage de la machine [80].

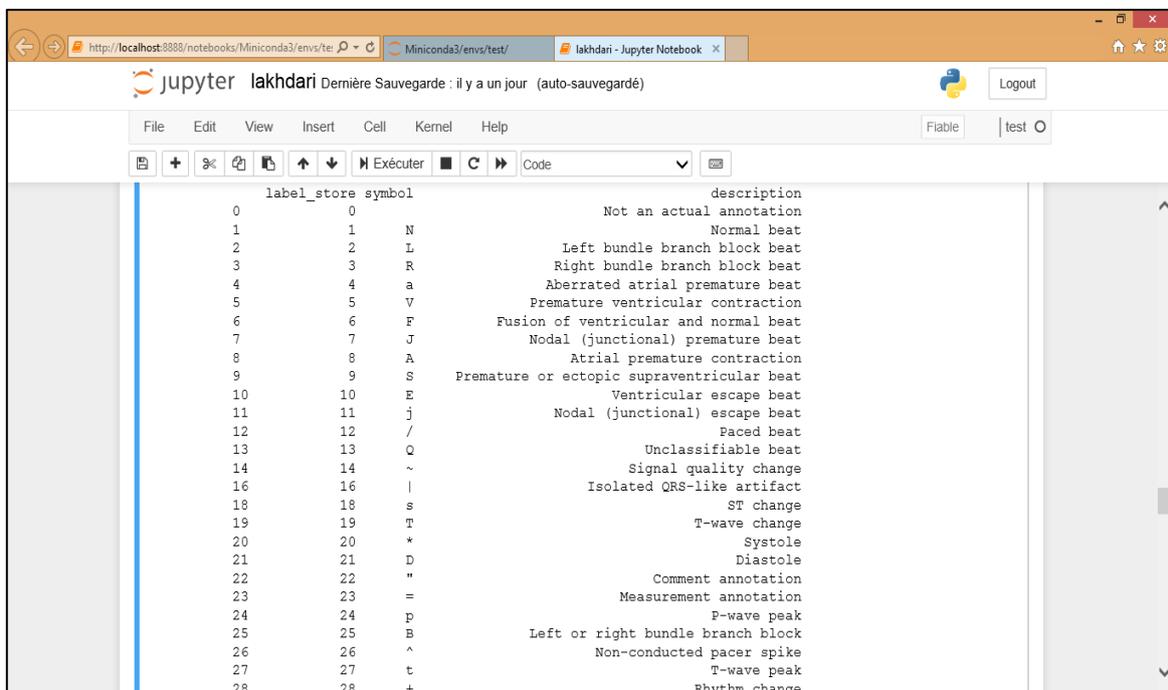


FIG. I.10 - Partie de la liste des annotations générées.

Des échantillons du signal ECG en plus des annotations attribuées à ces signaux peuvent être représentés à l'aide du même programme (Voir FIG. I.11 et FIG. I.12).

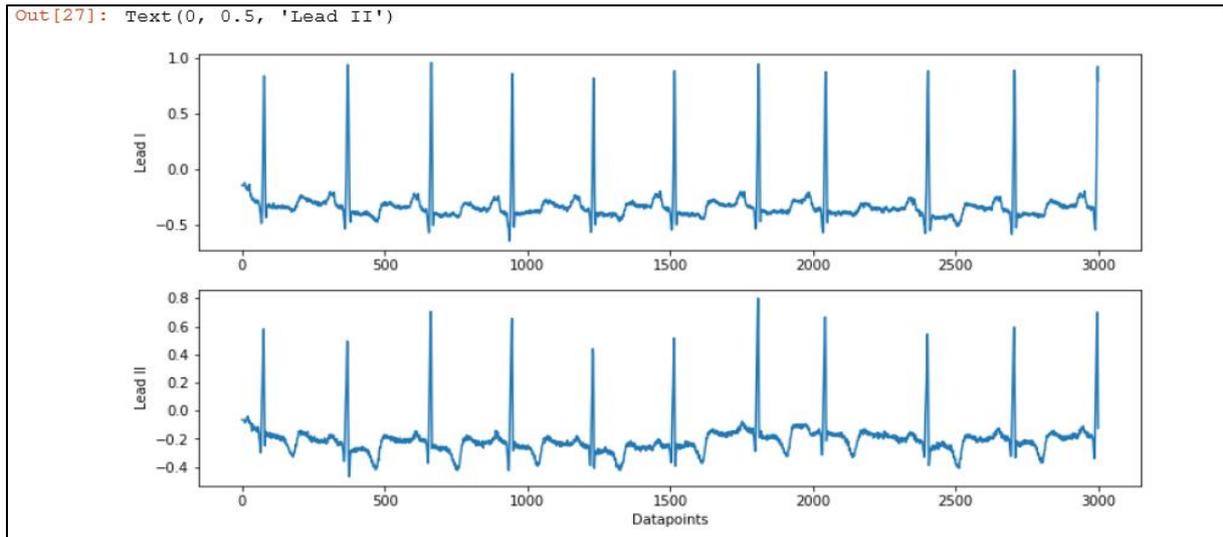


FIG. I.11 - Echantillons du signal ECG.

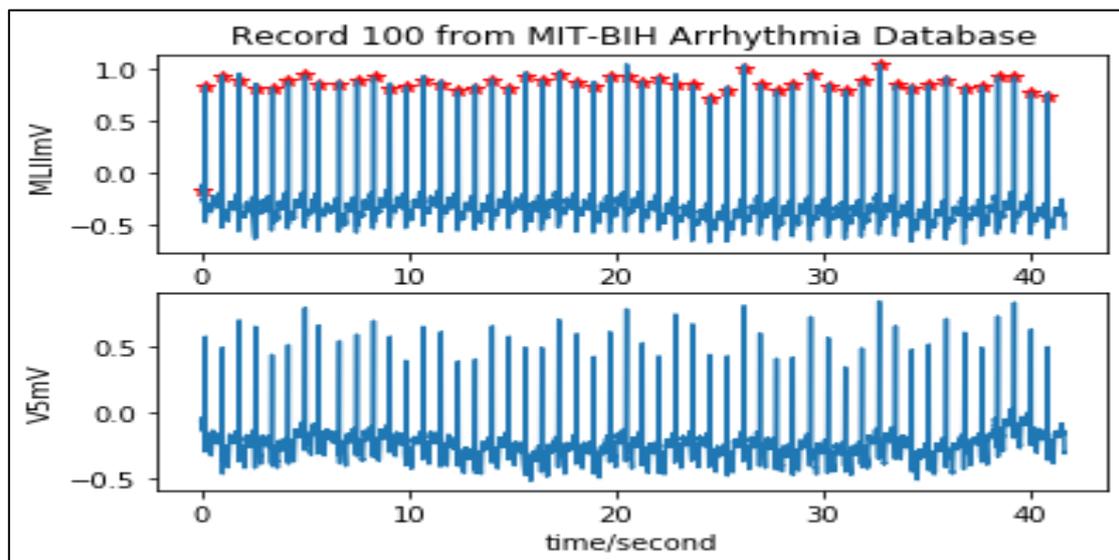


FIG. I.12 - Annotation d'un seul enregistrement de la base MIT-BIH.

- Représentation spectrale :

Cette étape est facultative, elle a pour objectif de représenter le spectrogramme des échantillons de l'ECG (Voir FIG. I.13). Cette représentation fréquentielle peut être utilisée pour étudier le signal ECG ou de même le classifier à l'aide d'autres méthodes connues dans la littérature [127], en ajoutant d'autres outils mathématiques particuliers comme les ondelettes [115].

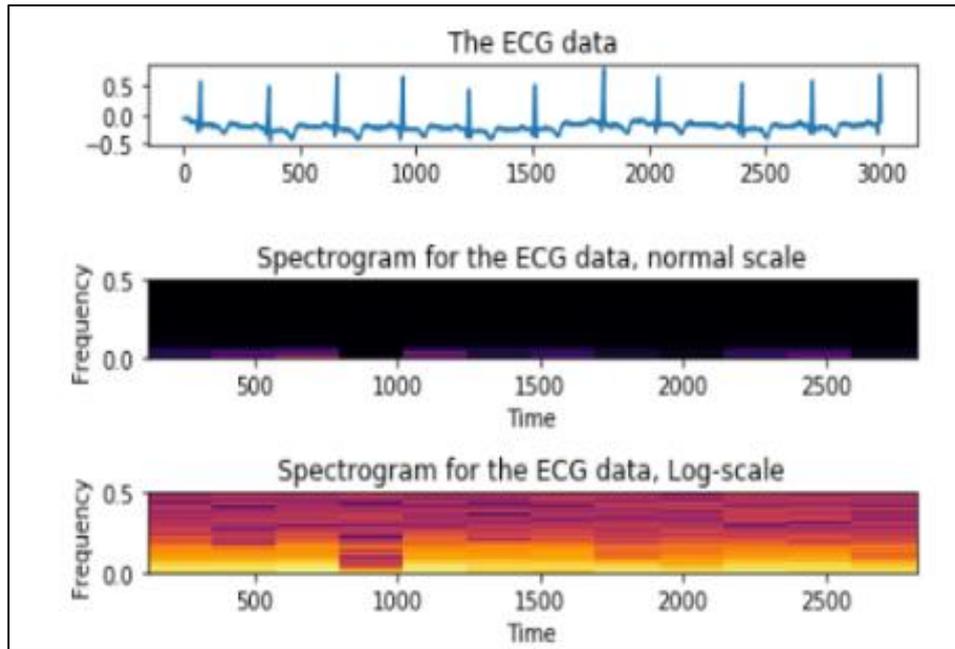


FIG. I.13 - Exemples des représentations spectrales d'un échantillon de l'ECG.

- Amplification et augmentation des signaux :

Avant de construire le modèle de classification, une étape d'amplification des signaux est effectuée dans le but d'augmenter et d'agrandir les données initiales ; vu la nécessité d'introduire des données énormes pour bien entraîner le modèle envisagé (Voir FIG. I.14).

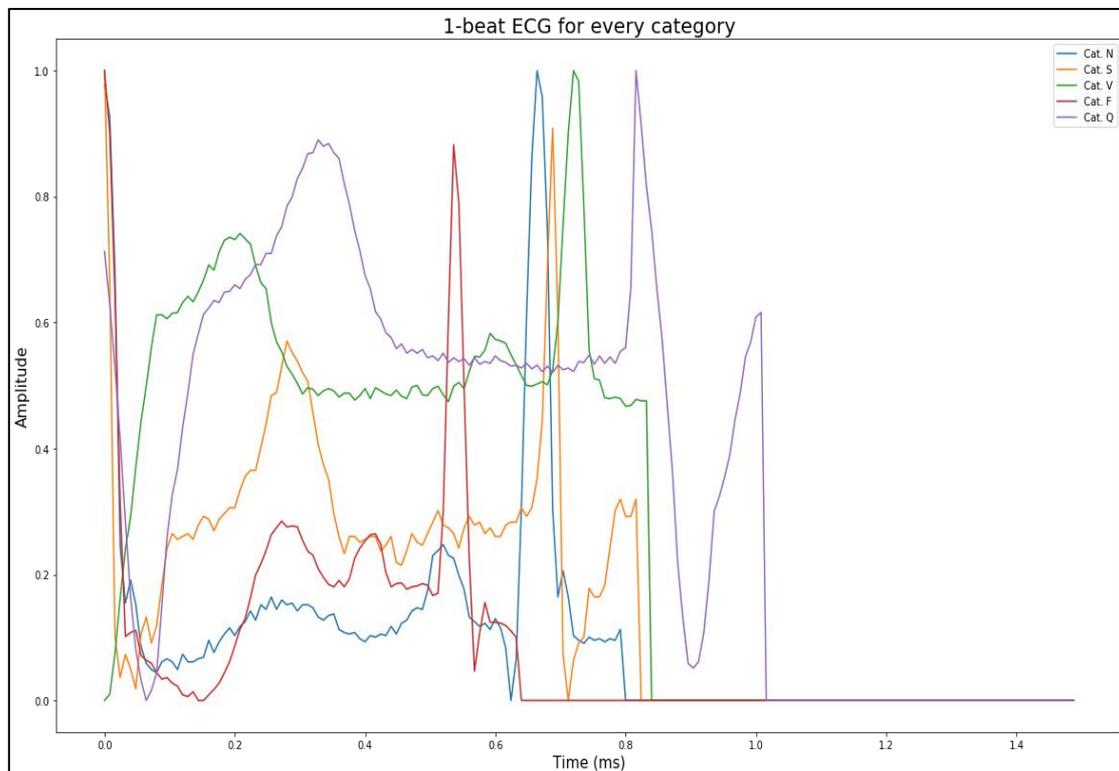


FIG. I.14 - Amplification des battements de chaque classe.

- Détection des complexes "QRS" :

Cette étape est primordiale à l'étude du signal ECG, vu que le complexe "QRS" représente l'une de ses caractéristiques les plus importantes. Ce complexe est indispensable à la détection d'un grand nombre d'anomalies cardiaques [80]. La technique choisie pour cette détection était introduite dans une étude scientifique récente de Jun *et al.* [73]. Ce choix réside principalement sur les bonnes performances de cette approche, en plus de la facilité de son intégration grâce à sa fonction de segmentation directement incluse dans la bibliothèque Biosppy [121], [80]. La fréquence d'échantillonnage utilisée est de 1000 Hz (Voir Fig. I.15).

Une autre approche plus simple consiste à utiliser directement la fonction appelée "gqrs_detect" proposée par la bibliothèque WFDB. Les résultats de cette méthode de détection sont très favorables (Voir Fig. I.16 et Fig. I.17).

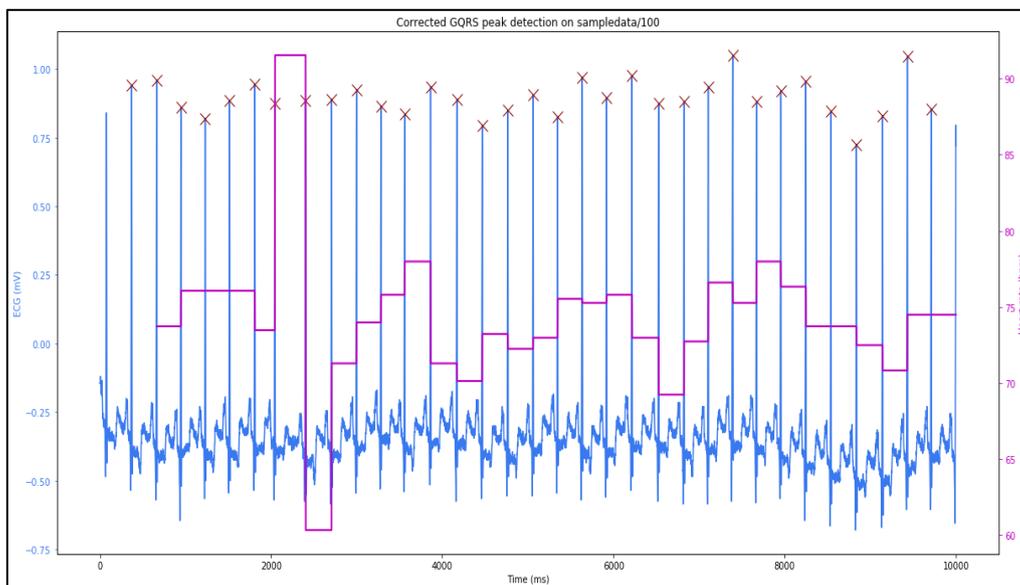


FIG. I.15 - Détection des complexes QRS sur un seul échantillon.

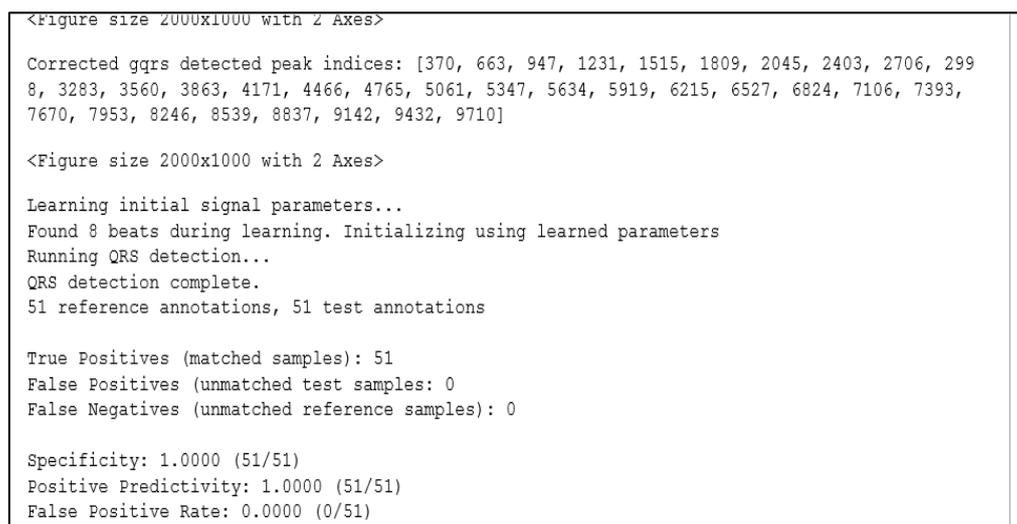


FIG. I.16 - Résultats de la détection des complexes QRS.

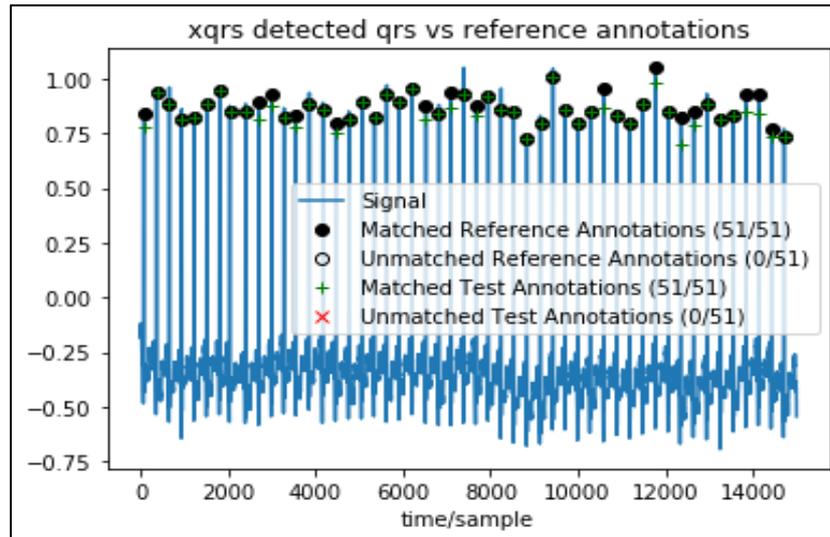


FIG. I.17 - Représentation graphique des résultats de la détection des complexes QRS.

- Reformulation des entrées :

Pour notre algorithme, cette étape consiste à utiliser une méthode de codage appelée "One-hot Encoder". Cette méthode repose sur le principe de transformer toutes les valeurs de la base de données en vecteurs de taille de "188" bits (Voir Fig. I.18). Ces vecteurs sont constitués des "0" et un seul "1". L'emplacement du "1" est responsable de différencier chaque vecteur des autres [126]. Ce qui revient à différencier chaque valeur de l'ECG des autres valeurs. Ensuite, une subdivision de la totalité des données en deux groupes est mise en œuvre, un groupe pour entraîner la machine avec un pourcentage de plus de 96% des données initiales, et un autre groupe pour tester le modèle conçu avec un pourcentage d'environ 4% des données initiales.

<pre>X_train (109150, 187, 1) y_train (109150,) X_test (4000, 187, 1) y_test (4000,)</pre>	<pre>X_train (109150, 187, 1) y_train (109150, 5) X_test (4000, 187, 1) y_test (4000, 5)</pre>
(a)	(b)

FIG. I.18 - Paramètres des données de l'entraînement et du test.

(a) Avant la méthode du One-Hot Encoder. (b) Après la méthode du One-Hot Encoder.

- Implémentation du modèle de classification :

C'est jusqu'à maintenant que la classification proprement dite se déclenche. La déclaration de l'architecture principale de ce modèle se fait en désignant le nombre ainsi que le type des couches utilisées (Voir Fig. I.19). Notre modèle est inspiré de l'étude de Kachuee *et al.* [132]. Il est constitué d'une couche initiale de convolution, ensuite d'un bloc composé d'une autre couche de convolution et d'une couche de fonction d'activation de type "Leaky-ReLU" qui a pour rôle principal d'activer les neurones du réseau. Ce type particulier attribue une variante pour les valeurs négatives de telle sorte que les neurones ne expirent jamais. Ce bloc est aussi composé d'une autre couche de convolution,

d'une addition, d'une couche d'activation et d'une dernière couche de "Max pooling" qui consiste à conserver les valeurs maximales des vecteurs. Ce bloc est répété 5 fois. Vers la fin, une couche de "Flatten" pour aplatir les vecteurs verticales en horizontal, de "Dense", d'activation en plus de deux autres couches de "Dense" et une dernière de "Softmax" ou le maximum pour avoir la sortie finale. Plus de détails sur les différentes fonctions mathématiques utilisées sont exposés dans **Annexe A**.

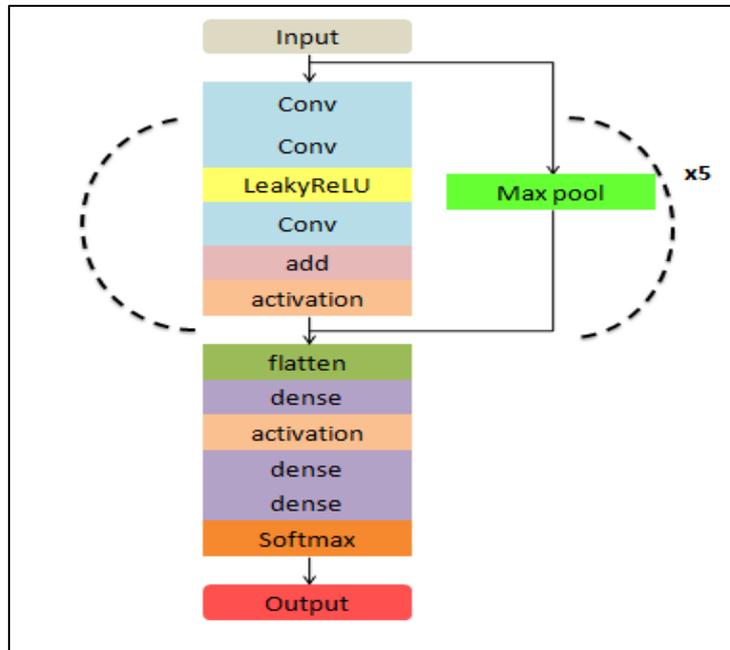


FIG. I.19 - Architecture du modèle de classification proposé.

I.3 - Résultats et performances

Notre modèle de classification a donné de très bons résultats en terme de "Accuracy" (Voir **Fig. I.20**) et de taux de pertes "Loss" (Voir **Fig. I.21**), durant son entraînement sur un nombre de 75 époques (75 intervalles ou 75 fois d'apprentissage sur la totalité des données) et sa validation par le reste des données non labélisées (4% des données). Les formules de ces paramètres sont présentés dans **Annexe A**.

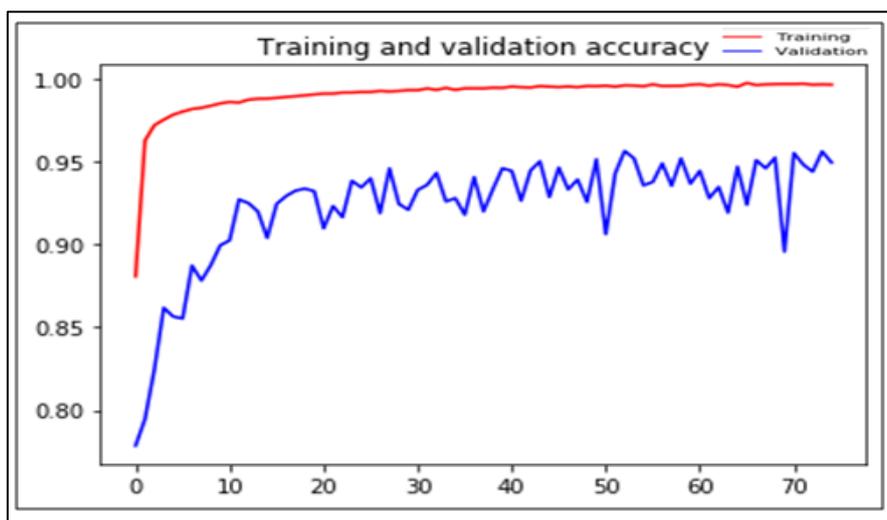


FIG. I.20 - Accuracy du modèle proposé sur les données de MIT-BIH.

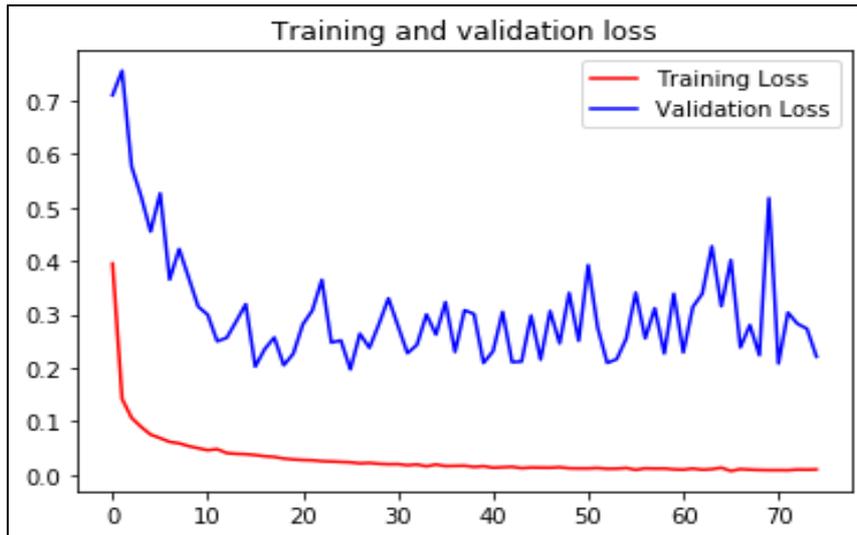


FIG. I.21 - Loss du modèle proposé sur les données de MIT-BIH

La particularité de notre modèle réside sur la fonction d'activation de type "*Leaky-ReLU*". Contrairement au modèle de base et de la majorité des travaux scientifiques qui utilisent la fonction "*ReLU*". Le point essentiel de différence entre ces deux approches est que les neurones ne meurent pas dans notre cas. C'est à cause de cette fonction qui attribue une variante aux valeurs négatives, contrairement à la fonction "*ReLU*" qui donne un "0" à ces valeurs, ce qui tue les neurones [132]. Les prétraitements effectués sur les données primaires en plus des couches de "Dense" ont aussi amélioré ces résultats grâce à leur effet de régularisation des sorties pour éviter le sur-apprentissage. Ce dernier revient à décrire la faiblesse du modèle devant des données nouvelles et différentes. Ce phénomène est généralement causé par un apprentissage massif sur des données répétitives [126]. Il est donc très performant lors de cet apprentissage, mais dès qu'il aura un changement des entrées, il va perdre cette performance basée seulement sur ces données particulières et non pas sur la compréhension de leurs caractéristiques distinctives.

Notre modèle a prouvé une efficacité particulière de sa méthode utilisée sur des données nouvelles. Les matrices de confusion des deux approches (Voir FIG. I.22 et FIG. I.23) ainsi que les résultats obtenus à partir des nouvelles données de test (différentes de celle de la base de données MITBIH) (Voir FIG. I.24) ont prouvé la haute performance de notre approche (avec la fonction *Leaky-ReLU*) devant sa concurrente [132]. Les taux d'erreur et de pertes sont aussi réduits dans cette approche proposée.

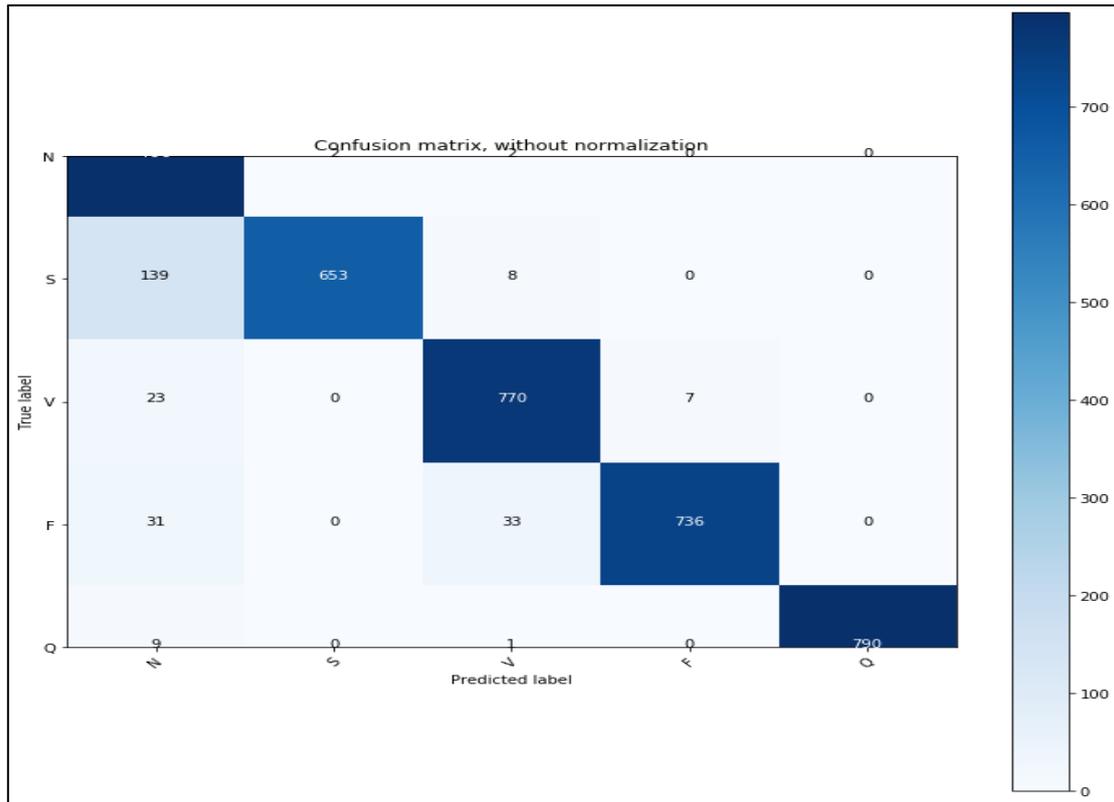


FIG. I.22 - Résultats de la matrice de confusion du modèle de base (avec ReLU).

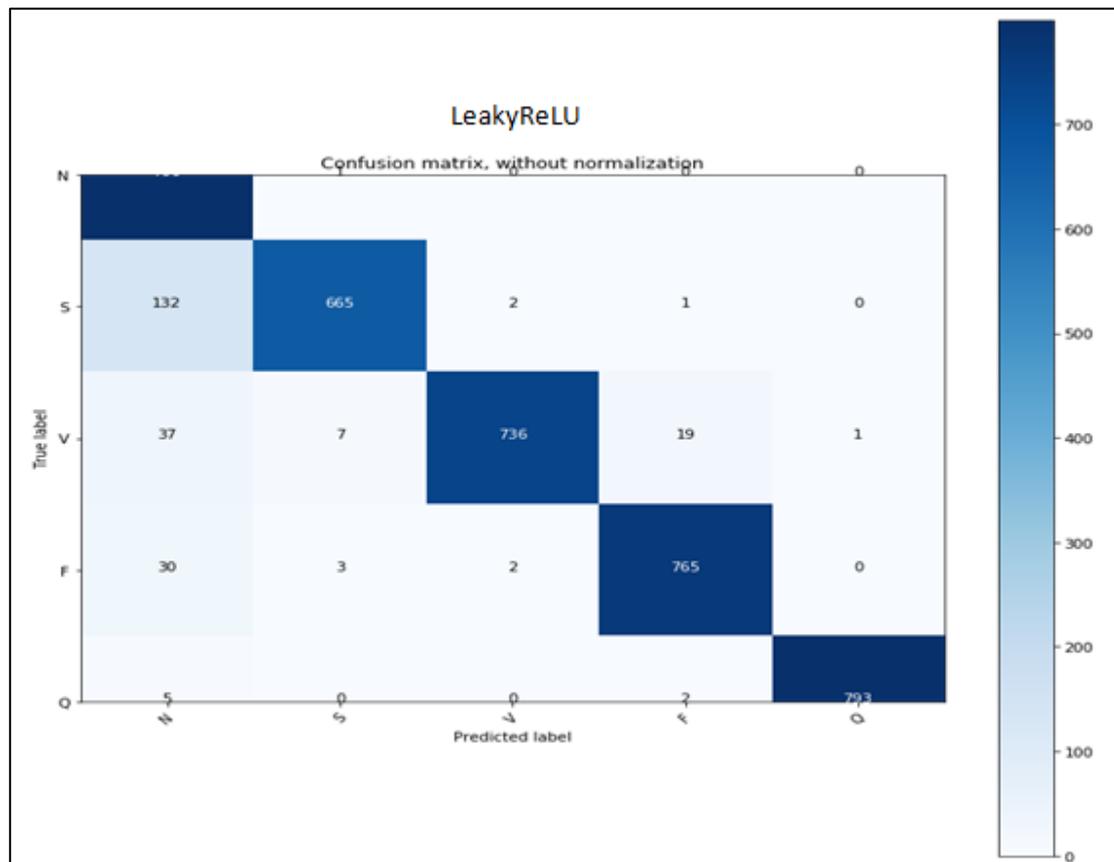


FIG. I.23 - Résultats de la matrice de confusion du modèle proposé (avec Leaky-ReLU).

	precision	recall	f1-score	support
0	0.82	0.99	0.90	800
1	1.00	0.84	0.91	800
2	0.90	0.96	0.93	800
3	0.99	0.87	0.93	800
4	0.99	0.99	0.99	800
accuracy			0.93	4000
macro avg	0.94	0.93	0.93	4000
weighted avg	0.94	0.93	0.93	4000
ranking-based average precision : 0.964				
Ranking loss : 0.020				
Coverage_error : 1.082				

(a)

	precision	recall	f1-score	support
0	0.84	1.00	0.91	800
1	1.00	0.86	0.92	800
2	0.93	0.96	0.94	800
3	0.99	0.92	0.95	800
4	0.99	0.99	0.99	800
accuracy			0.94	4000
macro avg	0.95	0.94	0.94	4000
weighted avg	0.95	0.94	0.94	4000
ranking-based average precision : 0.971				
Ranking loss : 0.017				
Coverage_error : 1.068				

(b)

FIG. I.24 - Comparaison entre les résultats de test.

(a) Résultats du modèle de base. (b) Résultats du modèle proposé (avec Leaky-ReLU).

I.4 - Présentation de la base des données "PTB-DB"

La deuxième base de données est caractérisée par des paramètres de format et de taille similaires à ceux des premières données avec un usage en mémoire inférieur à celui utilisé dans le premier cas (Voir FIG. I.25). Par contre, cette base de données est composée de deux classes principales y compris la classe des signaux normaux et celle des signaux arythmiques présentant l'anomalie dite "Infarctus du Myocarde (MI)" (Voir FIG. I.26).

Notre but principal en utilisant cette base de données est de détecter cette anomalie particulière qui peut être une origine d'une morte subite.

```
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Int64Index: 14552 entries, 0 to 10505
Columns: 188 entries, 0 to 187
dtypes: float64(188)
memory usage: 21.0 MB
None
```

FIG. I.25 - Paramètres des données de la base PTB-DB.

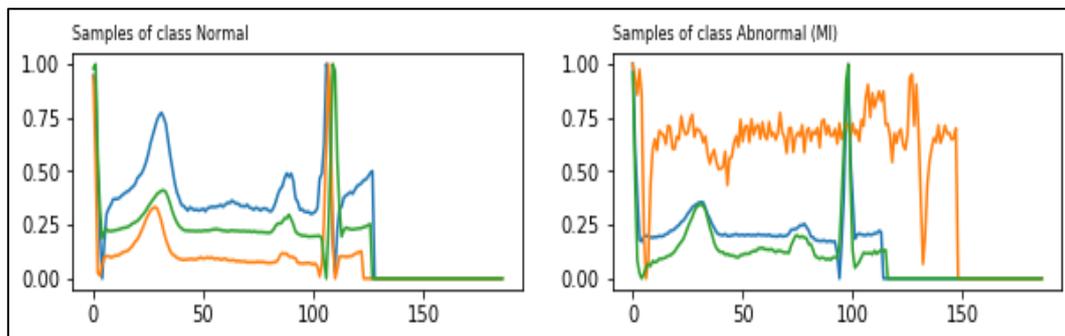


FIG. I.26 - Exemples des signaux des deux classes de PTB-DB.

I.4.1 - Etapes et résultats de classification

Les étapes de prétraitement suivies pour cette deuxième méthode sont pratiquement les mêmes utilisées pour le premier cas. A son tour, Le modèle de classification déployé est aussi le même que le modèle CNN utilisé auparavant, avec un seul petit changement au niveau de la fonction d'activation qui est remplacée par la célèbre fonction "ReLU" pour ce cas. L'apprentissage de ce modèle est réalisé sur 30 époques. Les résultats de performances globales de précision et de pertes sont de loin très avantageux, en se rapprochant des 99% et 0%, respectivement, devant une "Accuracy" de 95,9% de l'étude Kachuee *et al.* [132] (Voir Fig. I.27 et Fig. I.28).

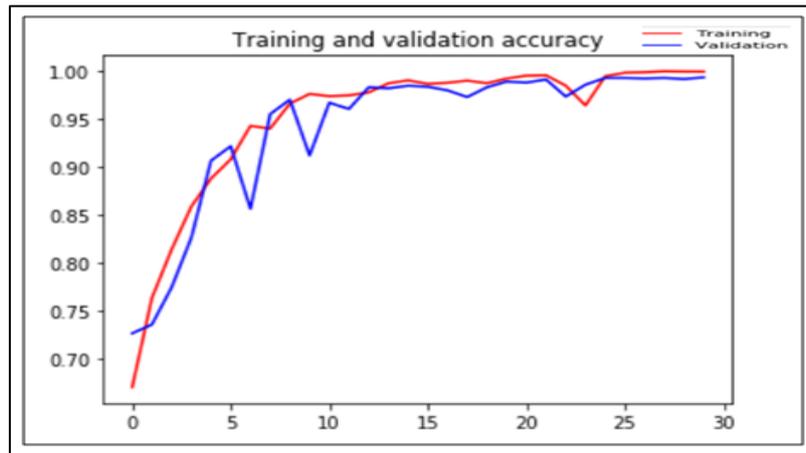


FIG. I.27 - Accuracy du modèle proposé sur les données de PTB-DB.

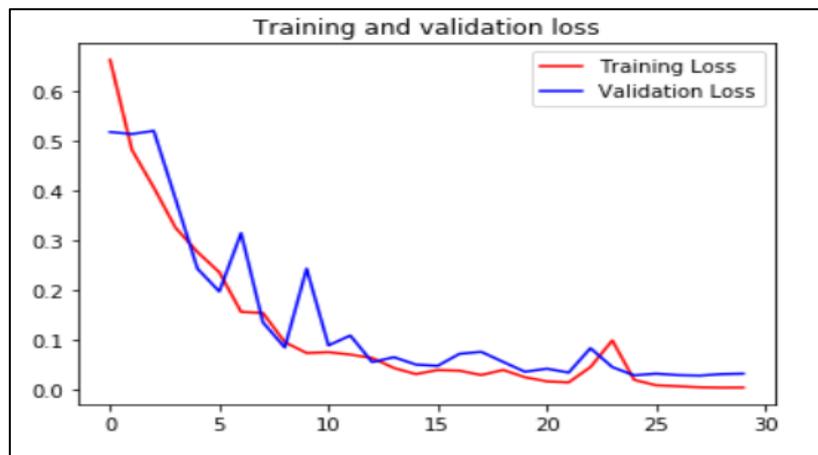


FIG. I.28 - Résultats de taux de perte du modèle proposé sur les données de PTB-DB

Encore plus, ce modèle très performant a prouvé sa grande efficacité pour classifier des nouvelles données, lors des tests effectués dans des conditions différentes. Il a donné une précision de 99% (Voir Fig. I.29 et Fig. I.30). Ces performances ont dépassé celles obtenues dans la littérature des travaux scientifiques effectués à cette base de donnée [132].

```
2183/2183 [=====] - 1s 329us/sample - loss: 0.03
32 - acc: 0.9927
The accuracy on the testing set is 99.3%
```

FIG. I.29 - Résultats de précision durant le test sur les nouvelles données.

	precision	recall	f1-score	support
0.0	0.99	0.98	0.99	619
1.0	0.99	1.00	0.99	1564
accuracy			0.99	2183
macro avg	0.99	0.99	0.99	2183
weighted avg	0.99	0.99	0.99	2183

FIG. I.30 - Résumé des résultats du modèle proposé durant le test sur les nouvelles données.

I.5 - Transformation du signal aux images

Les résultats très encourageants des modèles de classification précédents ont motivé notre esprit de recherche scientifique et d'exploitation des nouvelles approches de classification des signaux de l'ECG. Parmi ces approches très récentes, la transformation des signaux unidimensionnels de l'ECG en d'autres formats bidimensionnels représente une des voies les plus prometteuses [73]. Le principe de base consiste à transformer l'ECG en une image de deux dimensions par l'utilisation des outils de la librairie OpenCV, en plus de quelques autres outils de la gamme Matplotlib. Ceci a pour but principal l'amélioration des performances des réseaux CNN ; en entraînant la machine avec un nombre immense des images de chaque classe des signaux de l'ECG, vu que ces réseaux CNN ont été conçus spécialement pour classer des images en pixels.

Malheureusement, cette méthode n'avait pas la possibilité de se développer, à cause des limitations des capacités graphiques de notre matériel utilisé. Notre machine n'a pas pu continuer cette approche de transformation des signaux en images, vu le nombre immense des images en nuances de gris possibles à générer depuis une seule catégorie des signaux de l'ECG de la base MIT-BIH. Elle a généré seulement des images de la première classe dite "n", représentant les signaux normaux (Voir **Fig. I.31**). Cette méthode prometteuse reste très intéressante à exploiter et de même possible à améliorer dans l'avenir proche, en utilisant une machine plus performante avec des caractéristiques de cartes graphiques et du processeur (GPU) plus élevées.

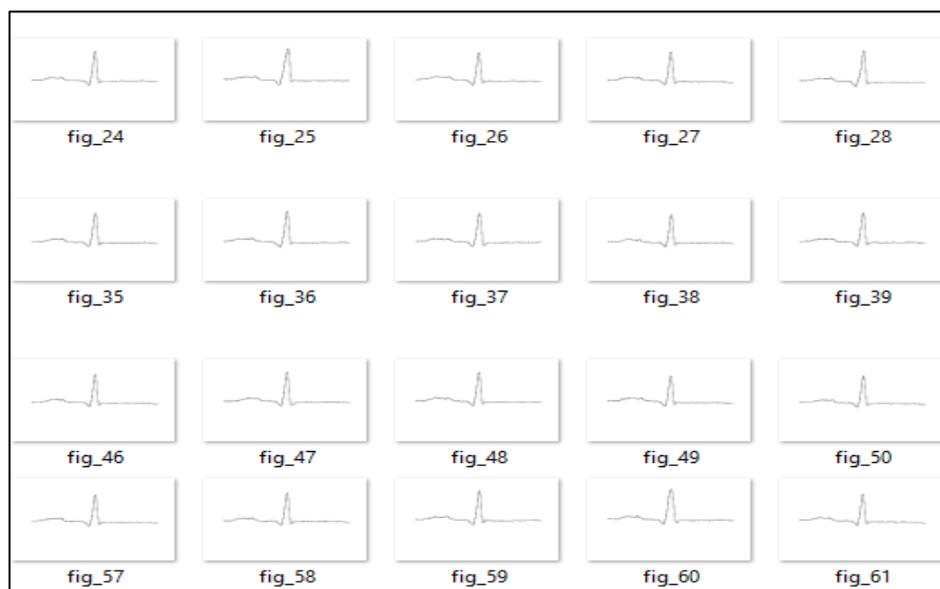


FIG. I.31 - Partie des figures générées par le modèle de transformation proposé sur l'ECG normal.

I.6 - Classification des images

Dans le but d'ajouter encore plus de valeur scientifique à nos solutions proposées, une étape de classification des images a été mis en place pour offrir la possibilité d'intégrer des outils de télésurveillance des patients souffrant des anomalies du cerveau.

Cette approche utilise une base de données publiée sur le site connu par "Kaggle" [76] et contient un nombre limité des images de l'IRM du cerveau, regroupées en deux classes. La première classe contient des images des cerveaux sains, normaux et qui ne représentent aucune anomalie. A son tour, la deuxième classe possède des images des cerveaux manifestant des cas variés du tumeur. Pour cela, notre but primaire de cette étude est la conception d'un modèle capable de détecter n'importe quelle anomalie (maligne) de la structure biologique du cerveau. Ce modèle n'aurai pas donc la capacité de déterminer le type de cette anomalie, il aura juste l'aptitude de déterminer sa présence.

I.6.1 - Augmentation et prétraitement des images

Vu la limite apercevable en terme de quantité des images disponibles [76], des méthodes d'augmentation ont été mis en place. Ces méthodes utilisent des outils de traitement des images multiples, tel que la génération des versions variées d'une même image à partir de plusieurs vues (horizontales, verticales, centrées, etc.), de zoomer l'image originale ou de la segmenter (Voir Fig. I.32).

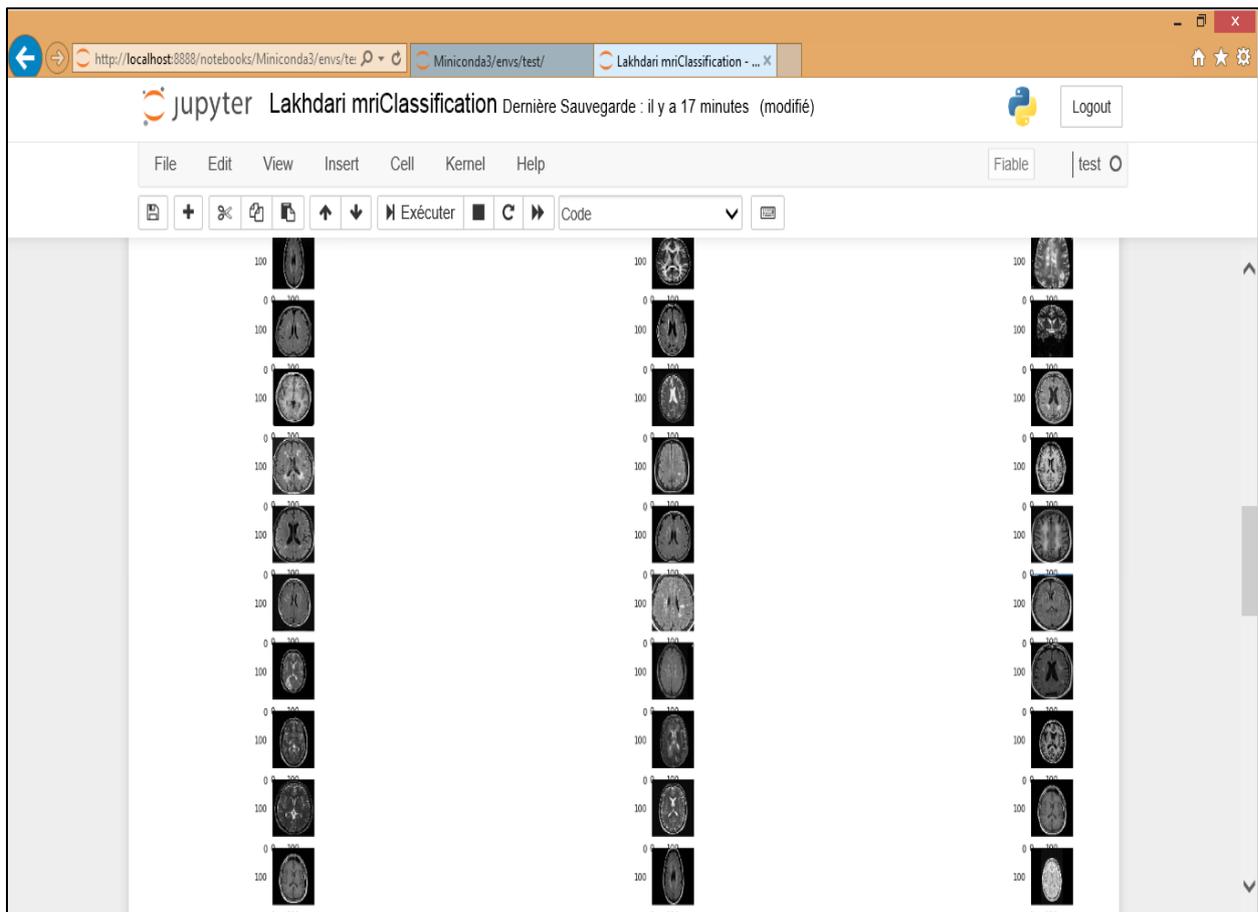


FIG. I.32 - Partie des images IRM de la base de données utilisée.

I.6.2 - Architecture du modèle proposé

Le modèle de classification des images utilisé est aussi basé sur l'architecture des réseaux CNN. Cette architecture a prouvé sa capacité de classifier les images par rapport à la majorité des architectures présentées dans le domaine de DL et de ML en général. Ce modèle est inspiré de l'étude de Sajjad *et al.* [103]. Il est constitué de quatre blocs (Voir FIG. I.33).

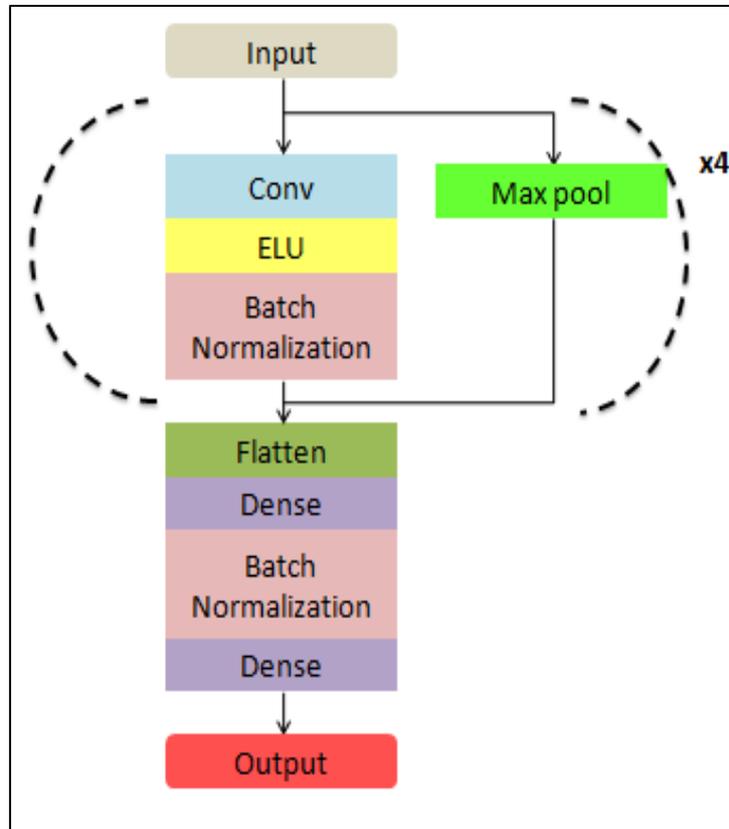


FIG. I.33 - Architecture du modèle proposé pour la classification des images IRM du cerveau.

Chaque bloc est composé d'une couche de convolution, d'une fonction d'activation de type exponentiel "ELU", une autre couche de "Batch Normalization" ayant pour but de normaliser les valeurs suivant un certain seuil et une autre couche de "Max Pooling". Vers sa fin, ce modèle est composé des couches de "Flatten", de "Dense", d'une autre couche de "Batch Normalization" et finalement d'une autre couche de "Dense".

I.6.3 - Résultats et performances

Notre contribution majeure à cette architecture est l'introduction des couches de normalisation des valeurs "Batch Normalization" à chaque niveau du modèle, dans le but d'augmenter sa performance et d'éviter des effets indésirables de sur-apprentissage. Cette contribution a donné des résultats intéressants et des performances salutaires en terme de précision et de taux de pertes, sur un nombre de 30 époques. Ces performances avantageuses sont plus favorables devant les nouvelles données de validation que devant celles de l'entraînement (Voir FIG. I.34 et FIG. I.35).

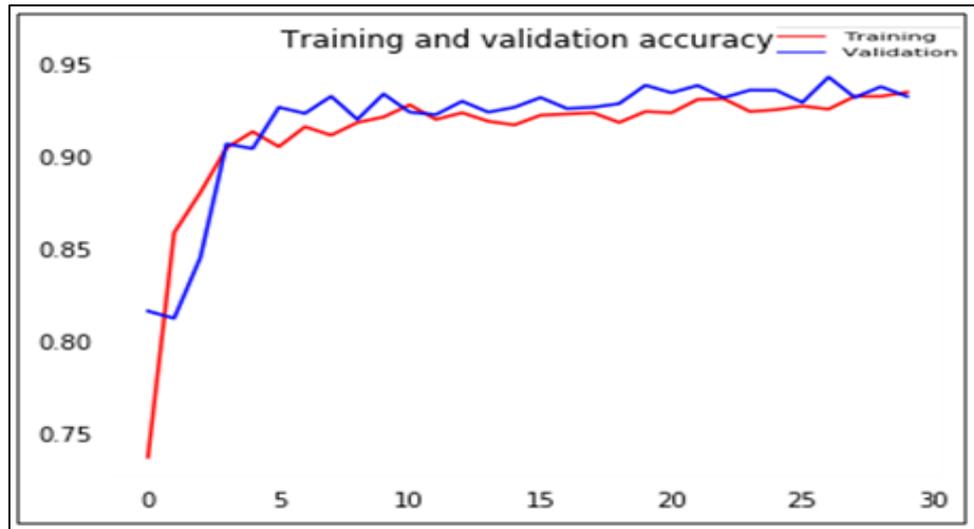


FIG. I.34 - Accuracy du modèle proposé durant l'entraînement et la validation.

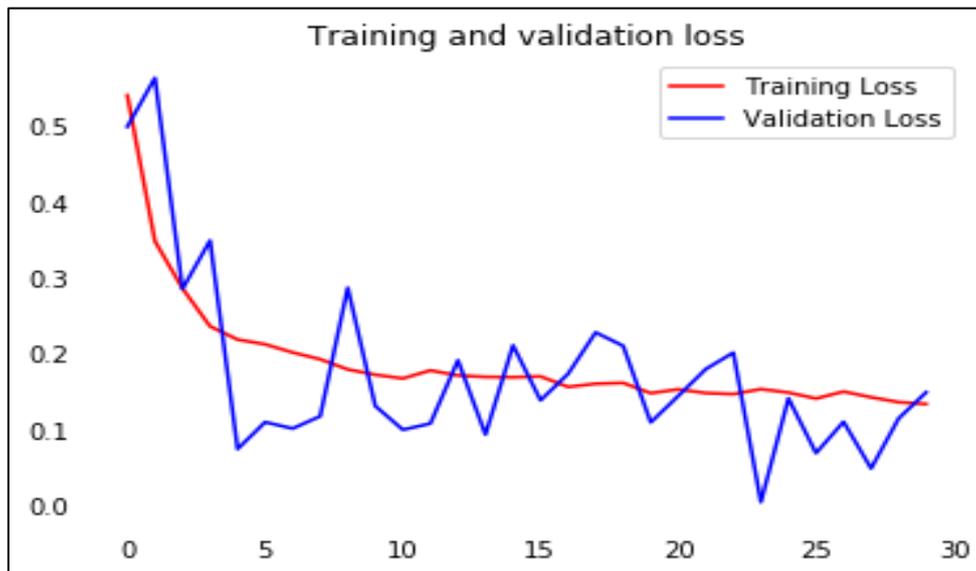


FIG. I.35 - Loss du modèle proposé durant l'entraînement et la validation.

Cependant cette méthode de classification des images IRM nécessite plus d'amélioration pour augmenter sa capacité de détecter le type de l'anomalie au niveau du cerveau étudié. Cette amélioration n'est possible que dans le cas d'une disponibilité d'une base de donnée plus riche et variée, en terme de quantité et de type des pathologies intégrées.

I.7 - Conclusion

Les méthodes puissantes de traitement de l'ECG ont donné naissance à des algorithmes de classification de haute qualité, capables de détecter les anomalies pathologiques du rythme cardiaque avec une très grande précision, ainsi de générer des décisions médicales adéquates. Ces logiciels performants représentent le cerveau analytique de notre plateforme de télésurveillance **SMILE**. Plus de détails sur leur intégration à la partie logicielle de cette plateforme sont présentés dans les chapitres suivants.

Chapitre II

Collection des données médicales via un prototype mobile de l'ECG

SOMMAIRE

- II.1 – Holter ECG, notions et actualités
 - II.2 – Jargon technique
 - II.3 – Réalisation du prototype proposé
 - II.4 – Contributions
 - II.5 – Conclusion
-

Après la mise en route du design global de l'expérience des patients la plus répondante à leurs besoins et exigences, ainsi que l'implémentation logique des méthodes de classification de leurs données médicales, des étapes de réalisation pratique pour donner de la vie à ces concepts sont proprement déclenchées.

La toute première étape discutée dans ce chapitre regroupe des moyens et des composants matériels, choisis soigneusement pour garantir les meilleures performances possibles. Cette étape décrit la conception d'un prototype initial de l'appareil mobile utilisé pour la mesure de l'activité cardiaque et sa télétransmission aux autres parties logicielles de notre plateforme **SMILE**.

II.1 - Holter ECG, notions et actualités

Comme étant un appareil de détection du rythme cardiaque, le Holter ECG permet de mesurer l'activité du cœur en continu et pendant une durée possible de 2 jours [88]. Cette surveillance ambulatoire permet de résoudre les problèmes majeurs des appareils traditionnels [88]. Ces derniers sont parfois insuffisants dans le cas d'une mesure effectuée dans un moment ordinaire où le fonctionnement du cœur peut sembler normal. Les apports majeurs de continuité et de mobilité accordent à cet appareil le rôle d'une solution médicale sollicitée par les professionnels de santé dans les cas nécessitant une surveillance prolongée des patients [88], [107], [110].

Cependant, cet appareil propose une durée de mesure limitée de 1 à 2 jours, ce qui peut être parfois insuffisant [86]. De même, le diagnostic de ses enregistrements par le médecin ne peut être effectué qu'après cette période. Cette solution peut être donc inutile dans un cas d'urgence et qui nécessite une intervention médicale rapide [86], [87], surtout qu'il s'agit des anomalies cardiovasculaires dangereuses et parfois provocantes de la morte subite.

Pour remédier à ces problèmes, plusieurs travaux scientifiques ont été mis en place. Le nombre des versions mobiles de l'ECG proposées sur le terrain est en croissance continue [86], [87], [88], [107], [110].

Le tableau **Tab. II.1** représente des exemples de ces solutions proposées, choisies à partir d'un grand nombre de travaux connexes dans le but d'évaluer leurs particularités, leurs valeurs ajoutées, et de même leurs lacunes.

Solution	Description	Avantages	Inconvénients
Polar H10 [74]	Ceinture de mesure de la fréquence cardiaque dédiée au sport.	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne précision. - 2 Connexions simultanées (Bluetooth et ANT+). - Compatibilité avec des applications variées. - Facile à porter. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'affichage de résultats, ni de niveau de la batterie (cela se fait à l'aide d'une application mobile). - Chère. - Durée de vie limitée. - Pas suffisant pour le diagnostic médical vu qu'il détectent seulement la fréquence cardiaque (analyse limitée aux besoins sportifs).
Apple watch [105] / Fitbit [138]	Montres pour la mesure de la fréquence cardiaque quotidiennement.	<ul style="list-style-type: none"> - Bon design, pratique et facile à utiliser au quotidien. - Affichage en temps réel des mesures. - Intégration des autres indicateurs comme la respiration, la forme et le stress. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure limitée à la fréquence cardiaque et non pas à la totalité du signal ECG. - Prix plus au moins chers.
AliveCor [139]	Un ECG mobile basé sur une méthode simplifiée en utilisant seulement les doigts.	<ul style="list-style-type: none"> - Très minimisé et facile à utiliser. - Contact direct des doigts sans l'utilisation des 	<ul style="list-style-type: none"> - Une incertitude de précision à cause de cette façon très simplifiée de mesure.

		électrodes d'un ECG ordinaire. - Détecte des anomalies dans un signal ECG. - Partage des données avec les cardiologues.	- Pas largement acceptable par les professionnels de santé.
CardioSecur [140]	Un ECG mobile à 4 électrodes, muni de deux applications mobiles pour patients et médecins.	- Une mesure complète des données de l'ECG à cause du nombre élevé des dérivations (jusqu'à 22). - Une détection des anomalies différentes à partir d'une lecture intégrale des mesures. - Partage des données et suivi en continu. - Certifié et bien reconnu par la communauté médicale.	- Pas d'affichage sur l'appareil lui-même. - besoin d'une liaison via câble aux terminaux mobiles pour pouvoir recevoir les données. - Délai d'une minute pour la génération des feedbacks.
Open Holter [86]	Un projet de fabrication d'un Holter ECG avec des caractéristiques améliorées.	- Longue durée de vie de la batterie (12 jours). - Capacité de stockage élevée. - Coût très réduit. - Affichage en continu.	- Pas de connectivité à distance (se relie via câble au PC). - Taille plus au moins grande par rapport à l'Holter ordinaire.

TAB. II.1 – Exemples des appareils de mesure de l'ECG commercialisés

II.2 - Jargon technique

Pour cette première étape, des systèmes dits embarqués sont utilisés afin de construire le réseau de capteur responsable de mesurer les données médicales envisagées. Avant d'entamer ce sujet, quelques définitions simples sont énoncées pour simplifier son contexte général.

II.2.1 - Systèmes Embarqués

Ce sont des systèmes qui combinent des caractéristiques électroniques (sous forme du hardware) et informatiques (sous forme du software), capables d'exécuter une fonction bien déterminée [107]. Ils peuvent être introduits comme étant des systèmes de base des microcontrôleurs, parfois programmables, travaillant en temps réel [107].

II.2.2 - Microcontrôleurs

Ils sont constamment employés pour structurer les systèmes embarqués, ayant la capacité d'incorporer les processeurs, les mémoires et les interfaces d'entrée et de sortie dans un même boîtier [110], [113]. Lors de la réalisation de notre prototype, un ensemble des microcontrôleurs reliés par des connexions spécifiques avec un nombre varié des composants électroniques, fabriqué par

l'industrie "Arduino" est utilisé afin de construire un réseau de capteur capable de détecter certains paramètres vitaux, et les interpréter par la suite.

II.2.3 - Cartes électroniques Arduino

Cette fameuse firme introduit un ensemble de cartes électroniques, de microcontrôleurs et de logiciels, constituant une plateforme facile à utiliser, simple à accéder, et fiable à exécuter des tâches variantes ; allant de la lecture d'une simple donnée à la manipulation de tout un système de surveillance d'une maison [134]. Composé d'une carte électronique programmable et un logiciel gratuit, Arduino représente une des meilleures façons pour se familiariser avec le domaine de l'électronique [134]. Il s'agit d'une plateforme dite "Open Source" offrant à ses utilisateurs l'avantage de créer des systèmes complexes sur des cartes électroniques simples, prêtes à utiliser et à être commandées par un programme écrit par le développeur ; en utilisant un logiciel gratuitement offert [134].

Parmi la grande variété des produits présentés par cette firme, les principaux types des cartes électroniques les plus célèbres (Voir Fig. II.1) peuvent être résumés comme suit [134] :

- Uno : C'est la carte la plus célèbre. Elle est idéale pour s'introduire au monde cette firme ; en offrant aux utilisateurs la majorité des fonctionnalités des microcontrôleurs envisagées. Munie de 6 pins d'entrées analogiques, et de 14 pins entrées/sorties numériques, cette carte permet de créer des systèmes électroniques, seulement en l'attachant au PC par un simple câble.
- Nano : En plus qu'elle peut être représentée comme une variante de la première, cette carte est sa version réduite en terme de taille, et augmentée en terme de nombre de pins analogiques intégrés. Elle est de même plus efficace, voire favorable pour les projets nécessitant un produit minimisé et facile à utiliser.
- Mega : Elle est très similaire à la carte Uno, avec un nombre plus large de pins, proposant aux développeurs la possibilité de construire des systèmes et des projets à une plus grande échelle.
- Leonardo : C'est la toute première carte développée par cette firme. Cette carte est beaucoup plus simple, en la comparant avec les autres cartes de cette gamme.
- LilyPad : C'est une carte dédiée spécialement aux capteurs du textile ou "Wearables" ; ayant des caractéristiques de la technologie "e-textile" avec un grand nombre de connexions et une surface très lisse. Elle est facilement fafilée aux vêtements, et de même lavée en toute sécurité. Pareille aux autres cartes, LilyPad est aussi munie d'un nombre des pins Entrée/Sortie, des capteurs, et de l'alimentation nécessaire à son déploiement.
- Nano 33 BLE Sense : Cette carte est munie des capacités de AI en offrant une possibilité d'intégration des modèles intelligents. Elle est de même équipé d'un ensemble de capteurs, un module Bluetooth et un autre Low Energy (BLE).

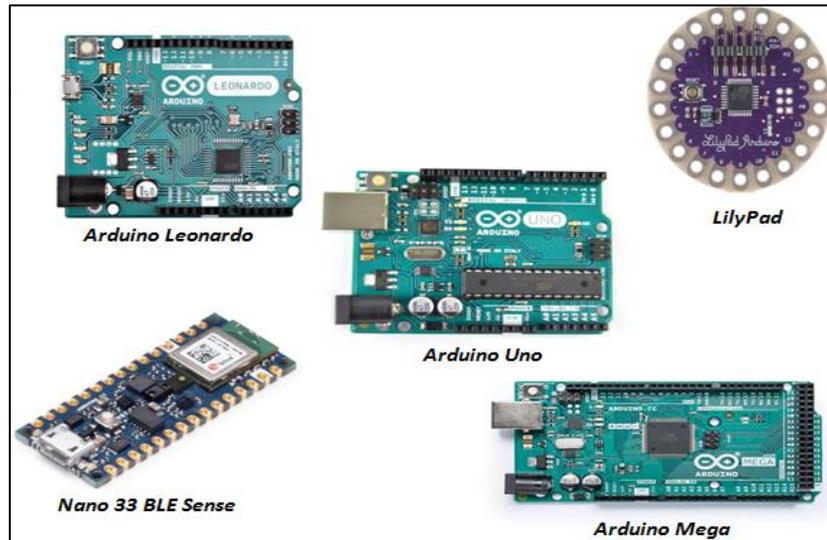


FIG. II.1 - Exemples des cartes Arduino.

II.2.4 - Arduino IDE

A fin de programmer les cartes Arduino, un environnement de développement dit "Arduino IDE" est présenté sous forme d'un logiciel gratuit et ouvert aux développeurs [132]. A l'aide d'un langage de programmation spécifique, Arduino IDE permet aux développeurs de programmer leurs cartes électroniques en toute aisance, pour concevoir des systèmes électroniques riches et variés. Ce développement peut se faire soit en utilisant directement l'éditeur Arduino du web ou bien, en installant son IDE sur la machine personnelle.

II.2.5 - Protocoles de communication

Les protocoles de communication entre les différents circuits électroniques sont variés. Pour notre cas, deux principaux types sont déployés (Voir **Annexe B**) :

- Inter Integrated Circuit (I2C) : Dédié à la connexion des circuits intégrés suivant le mode bus. Chaque élément de cette structure peut jouer le rôle d'un maître et de même d'un esclave [86].
- Serial Peripheral Interface (SPI) : Ce protocole est en mode "full duplex". Tous ces composants sont liés à un seul maître [86].

II.3 - Réalisation du prototype proposé

Lors de la conception de notre plateforme **SMILE**, une première approche dédiée à la détection de l'ECG est envisagée. Pour cela, les composants Arduino utilisés pour concevoir un prototypage de notre solution de mesure de l'ECG, sa récupération et son affichage sont répartis en trois parties principales (Voir **Fig. II.2**). Des fiches techniques plus détaillées de ces composants sont présentées dans **Annexe B**.

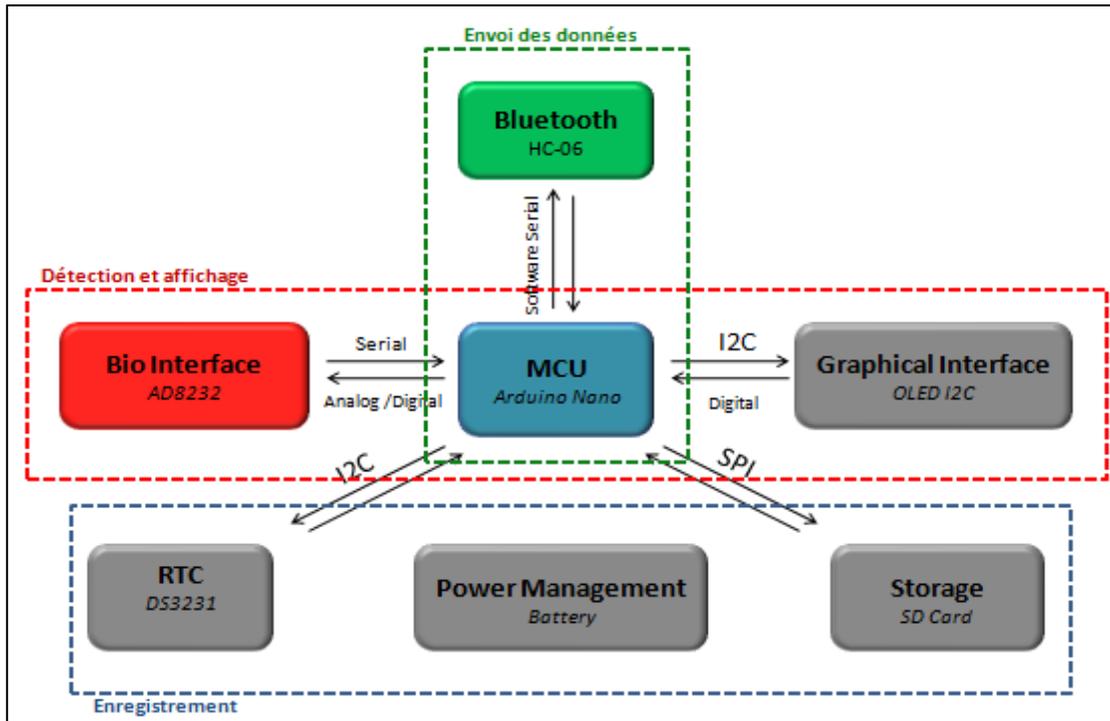


Fig. II.2 - Schéma de blocs des composants du prototype de l'ECG proposé.

II.3.1 - Détection et affichage

Cette partie est composée d'une carte Arduino Nano avec son câble ; représentant le cerveau de notre système et également le moyen qui le relie à la machine pour être programmer. Une plaquette blanche, en plus des fils de connexion sont aussi utilisés lors de cette première phase de programmation.

A son tour, Le détecteur de l'ECG est une carte de "Sparkfun" nommée "AD8232". Cette carte peut détecter l'activité électrique du cœur à l'aide de son entrée reliée aux trois électrodes placés sur le corps humain. Sa sortie est donc reliée à la carte Nano : c'est une sortie analogique qui va générer le signal ECG [85]. L'affichage de ce dernier est établi à l'aide d'un écran "OLED" suivant le protocole I2C.

II.3.2 - Envoi des données

Lors de cette deuxième partie, un module de Bluetooth est ajouté. Cet élément est capable d'envoyer les données de la sortie numérique de la carte Nano à l'application mobile sur Smartphone. Cette étape a pour but principal l'ajout des aspects de connectivité, de mobilité et de temps réel à notre prototype proposé. Le choix de ce mode de connexion est jugé le meilleur vu son débit, sa zone de couverture largement suffisante pour notre cas (distance entre l'appareil porté par le patient et son mobile), sa consommation en énergie plus au moins favorable devant le Wifi [43] et sa disponibilité sur la majorité des téléphones mobiles contrairement au Zigbee [43]. Ce qui augmente l'accessibilité du produit proposé aux utilisateurs.

II.3.3 - Enregistrement des données

Une autre partie composée d'une carte mémoire SD et une horloge "DS 3231" est incorporée pour garantir un enregistrement et un stockage synchronisé en temps réel des données détectées au

niveau de l'ECG mobile. Ce mécanisme offre aux patients la possibilité d'enregistrer leurs données médicales sur l'appareil lui-même, en plus de l'application mobile ; ce qui renforce la préservation de ces données en cas d'une perte accidentelle sur un des endroits de stockage. Ce système est aussi renforcé par l'addition d'une pile rechargeable dans le but d'augmenter sa durée d'utilisation limitée habituellement par un maximum de 2 jours.

II.3.4 - Prototypage et connexions

Les connexions des parties nécessaires à la conception de notre prototype sont définies par les étapes suivantes :

- Placement des électrodes sur le corps humain : Il existe deux types de placement des électrodes sur le corps [107]. Le premier type consiste à les placer sur trois principaux endroits autour du cœur (Voir **FIG. II.3**), tandis que la deuxième manière permet de les placer sur les deux poignets et la jambe droite.

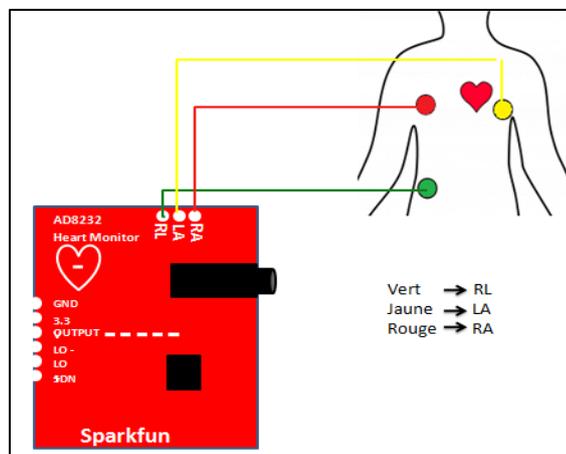


FIG. II.3 - Placement des électrodes autour du cœur.

- Connexions entre le microprocesseur et le détecteur de l'activité cardiaque : La carte AD8232 contient 6 pins, dont 5 sont nécessaires à son déploiement [85] (Voir **FIG. II.4**).

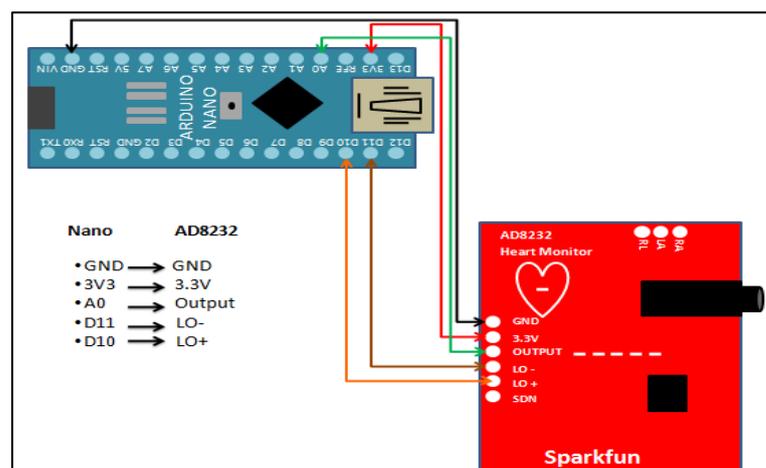


FIG. II.4 - Connexions entre le microprocesseur et le capteur de l'ECG.

- Connexions entre le microprocesseur et l'écran d'affichage : L'écran OLED I2C est connecté à la carte Nano via 4 pins (Voir Fig. II.5). Pour ce composant, la connaissance de son adresse est indispensable pour sa programmation [135].

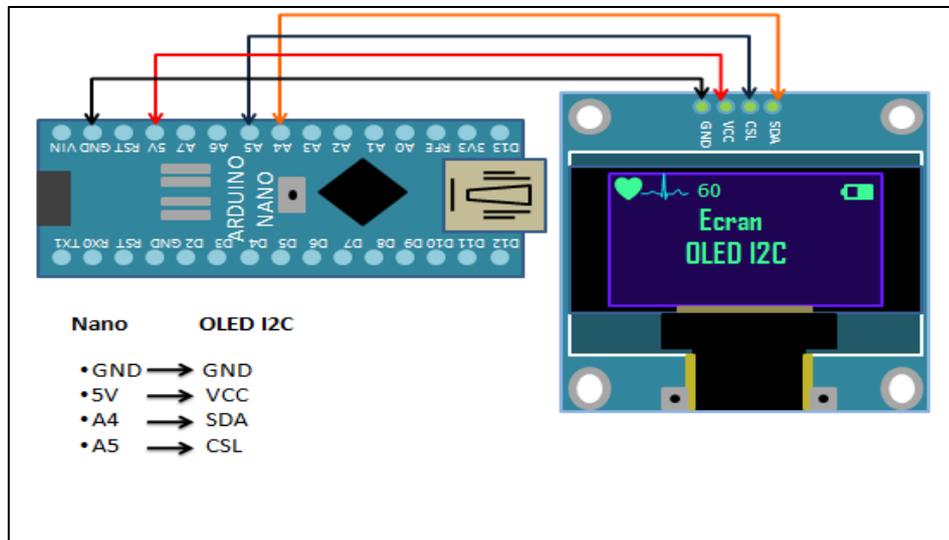


Fig. II.5 - Connexions entre le microprocesseur et l'écran OLED.

- Connexions entre le microprocesseur et le module du Bluetooth : Le module utilisé est de type HC-06. Il contient 4 pins (Voir Fig. II.6). Ce module nécessite un diviseur de tension sur son entrée de réception des données "RDX" constitué de deux résistances montées en parallèle [136]. Le pairage de ce module va être déclenché à partir de l'application mobile, vu qu'il agit comme un esclave par défaut [136]. Dès qu'il est prêt, il peut communiquer, envoyer et recevoir les données en question.

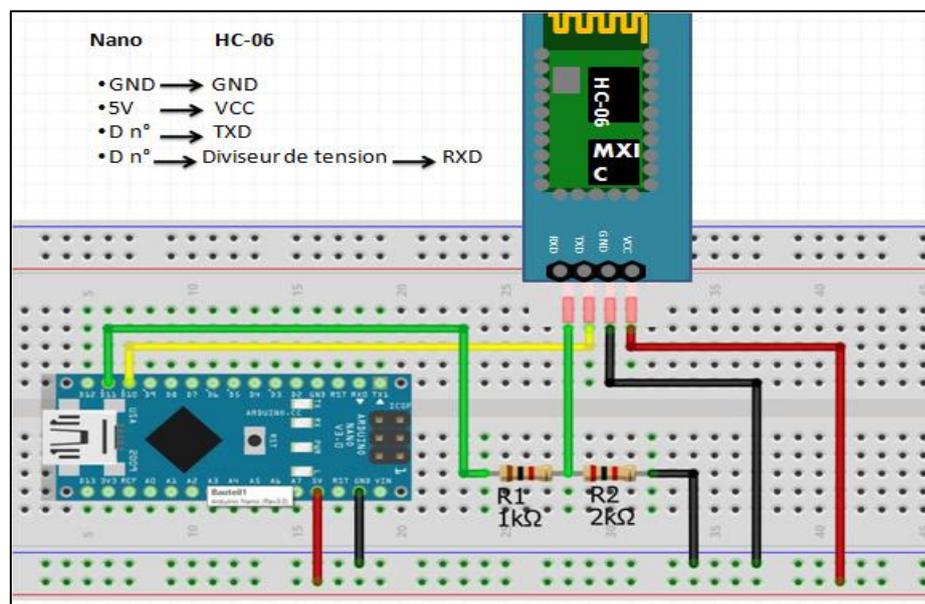


Fig. II.6 - Connexions entre le microprocesseur et le module HC-06.

- Connexions entre le microprocesseur et le système de stockage : L'horloge DS 3231 et la carte SD sont connectées au microprocesseur via 4 et 6 pins respectivement [86], [137] (Voir Fig. II.7 et Fig. II.8).

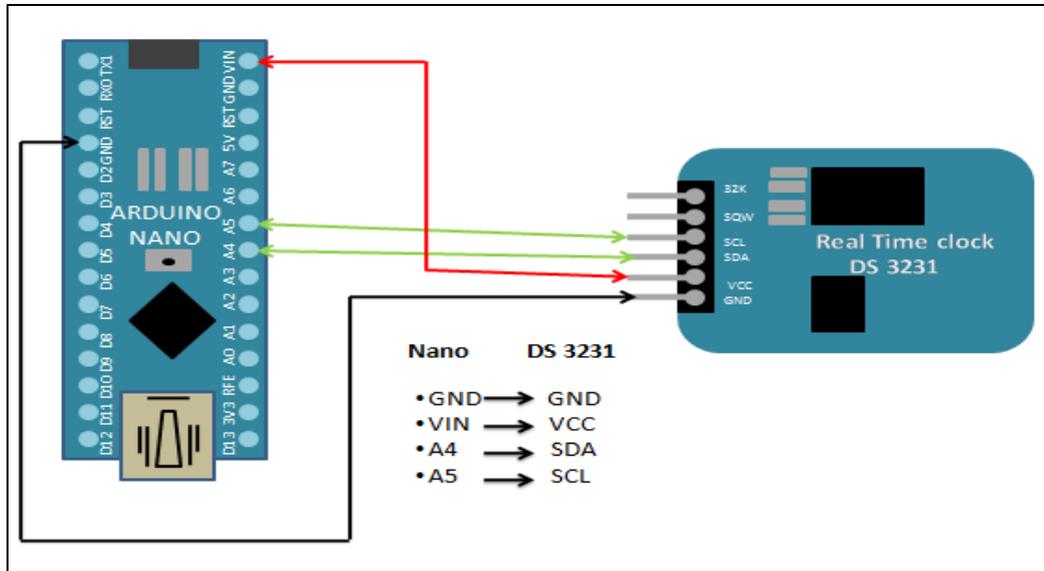


FIG. II.7 - Connexions entre le microprocesseur et la DS 3231.

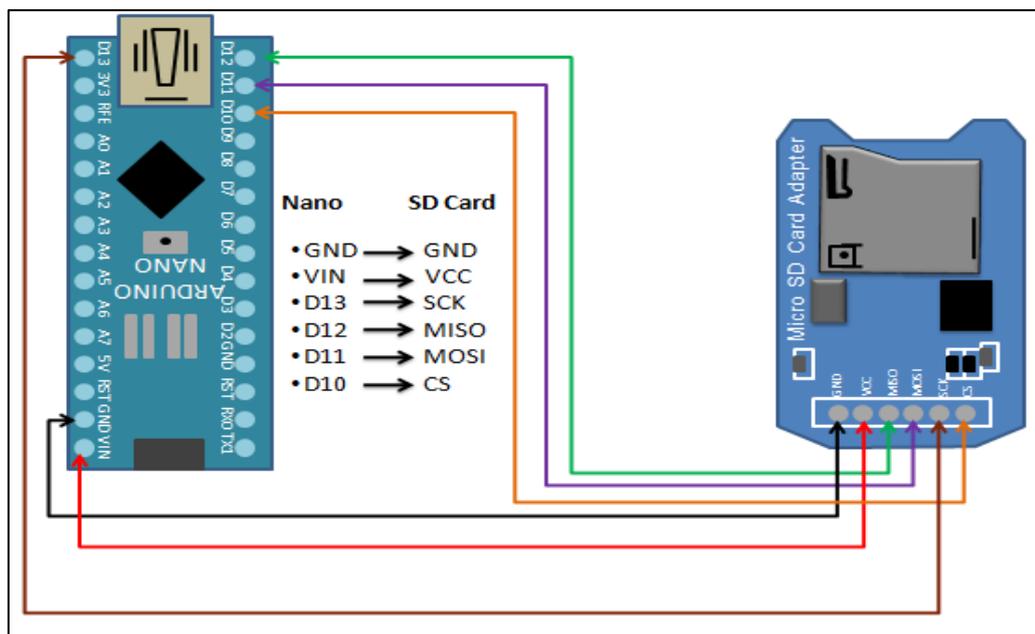


FIG. II.8 - Connexions entre le microprocesseur et la carte SD.

- Le montage final de notre prototype est établi à l'aide d'un logiciel de prototypage appelé "Fritzing" (Voir Fig. II.9). Le montage pratique (Voir Fig. II.10) démontre toutes les connexions entre les différents composants matériels responsables à la détection, la génération, l'enregistrement et l'envoi des données ECG au Smartphone. Sa programmation à l'aide de

l'IDE nécessite l'intégration de quelques bibliothèques spécifiques à chacune des cartes (Voir Annexe B). Les résultats finals de la détection et de la transmission de l'ECG sont présentés dans la partie finale de cet œuvre.

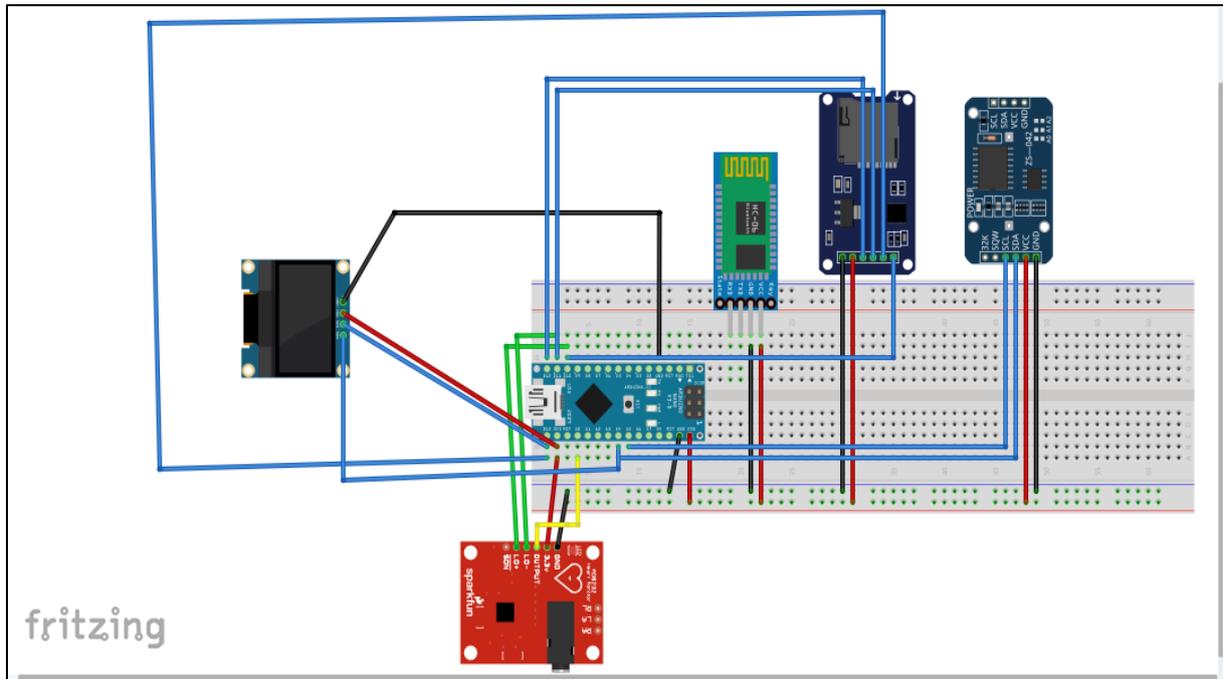


Fig. II.9 - Connexions entre le microprocesseur et toutes les parties par Fritzing.

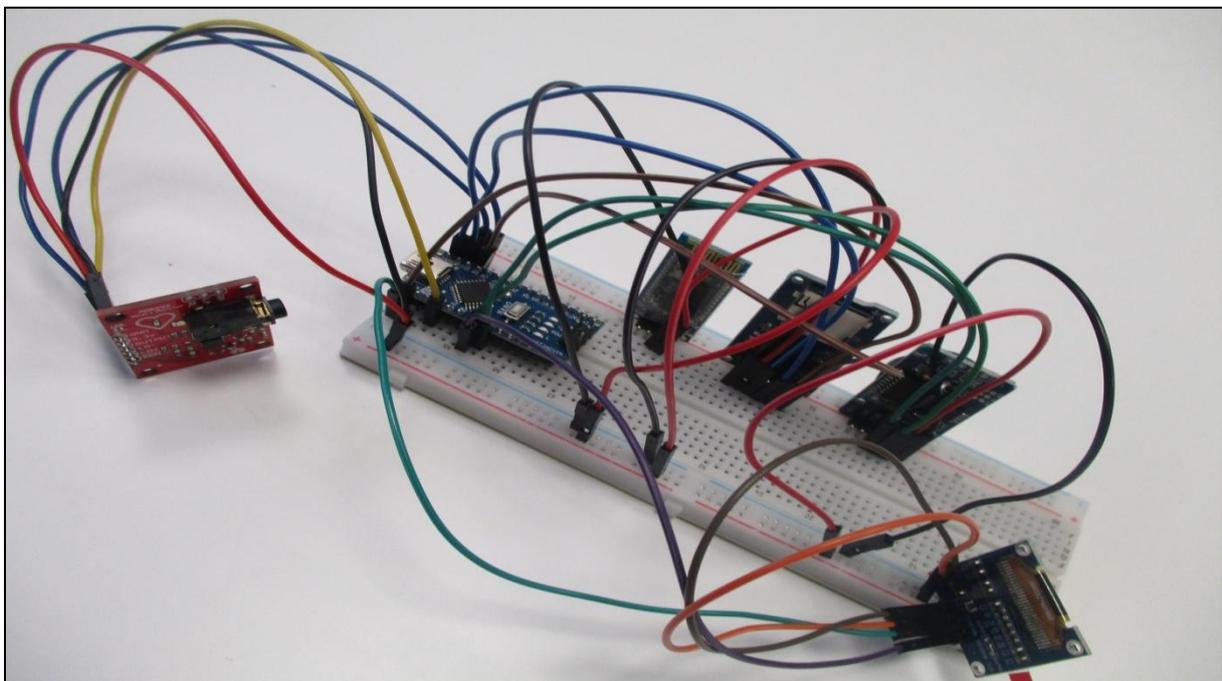


Fig. II.10 - Montage final du prototype primaire de l'ECG proposé.

II.4 - Contributions

Les avantages majeurs de cette partie résident sur l'incorporation des notions de mobilité, de flexibilité en terme de durée d'usage, d'espace de stockage, et de redondance. Notre conception est enrichie par un module Bluetooth pour préserver les aspects de mobilité, d'accessibilité et de télétransmission des données médicales en temps réel de leur détection au niveau du corps humain. De plus, l'espace de stockage est muni d'une carte SD (au choix). Le mécanisme d'enregistrement synchronisé offre aux utilisateurs la possibilité d'avoir les informations nécessaires sur le temps, et la date de ces enregistrements. En cas d'une perte inattendue des données médicales sur l'application mobile, ce support peut secourir son utilisateur et de même les professionnels de santé en offrant ces informations perdues. De même, la durée d'usage peut être de plus de 2 jours avec la possibilité de l'allonger en chargeant la pile. De plus, Le prix abordable de la totalité des composants donne naissance à un produit bien accessible à la majorité des patients. A son tour, L'interface graphique munie d'un affichage numérique du signal détecté est un autre point de plus de notre prototype.

D'une autre part, le fait que la carte AD8232 ne peut pas remplacer un circuit sophistiqué de mesure de l'ECG provoque des problèmes de certification médicale du produit proposé. Cependant, ses performances techniques restent acceptables voire favorables pour notre cas nécessitant un moyen accessible et abordable en premier lieu pour faciliter le développement des parties logicielles de notre plateforme **SMILE**. L'amélioration de ce produit est également possible par le remplacement de cette carte par un circuit ECG plus précieux. Les autres parties électroniques incorporées sont très bien acceptables dans le milieu industriel, ce qui préserve la majorité des qualités favorables de notre prototype proposé.

De même, ce prototype représente une capacité évolutive remarquable. Il est vivement possible de s'orienter vers la connexion BLE pour préserver de l'énergie utile au continuité des mesures. Il est également faisable d'insérer le modèle de classification produit précédemment, à l'aide de la carte Nano 33 récemment introduite.

II.5 - Conclusion

Les étapes successives de réalisation électronique présentées dans ce chapitre ont donné naissance à une version primaire d'un Holter ECG plus profitable en terme de mobilité, de flexibilité et d'accessibilité, avec une durée d'usage plus prolongée et des caractéristiques de fonctionnement plus avantageuses.

L'expérience des utilisateurs, patients et médecins est encore plus enrichie dans les étapes suivantes. C'est dans le chapitre suivant que cette interaction particulière des utilisateurs de **SMILE** est proprement établie.

Chapitre III

Implémentation des applications interactives

SOMMAIRE

- III.1 – Jargon logiciel
 - III.2 – Structure des applications proposées
 - III.3 – Implémentation
 - III.4 – Contributions
 - III.5 – Conclusion
-

Après pouvoir déterminer le prototype initial de notre solution **SMILE** dédiée aux maladies cardiovasculaires, une étape de programmation purement software est indispensable pour donner naissance à nos contributions sous forme des applications mobiles de télésurveillance et de téléassistance de ces patients. Pour cette démarche, nous allons choisir un outil de développement des applications mobiles célèbre, innovant et qui domine actuellement le marché des Smartphones ; le logiciel connu par "Android".

III.1 - Jargon Logiciel

Dès sa naissance en 2007 par le consortium appelé Open Handset Alliance (OHA), Android est reconnu comme étant une plateforme de téléphonie mobile opérante, moderne, ouverte et riche en fonctionnalités [141]. Il a révolutionné le monde des systèmes d'exploitation mobiles, en offrant à chaque utilisateur un outil fiable pour manipuler son Smartphone de n'importe quelle marque de l'alliance, en toute aisance.

III.1.1 - Architecture de la plateforme Android

Dès son apparence, Android a connu beaucoup de changements à plusieurs échelles [141]. Son architecture principale a été aussi atteinte par ces améliorations successives. Aujourd'hui, cette architecture est composée principalement des parties (Voir Fig. III.1) présentées de bas en haut comme suit [141] :

- Noyau Linux : Constituant le noyau de cette plateforme, Linux offre des avantages de sécurité et de développement de la partie Hardware des applications. Cette couche est l'équivalente de la couche physique selon les normes d'ISO.
- Couche d'abstraction matérielle (HAL) : Cette nouvelle couche intermédiaire contient une variété de modules et de bibliothèques qui permettent d'implémenter une interface spécifique à chaque composant de la couche physique, et le relier aux services correspondants dans les couches supérieures.
- Android "Runtime" : Apparue pour les versions égales ou supérieures à la version 5.0 (API 21), et connue précédemment par Dalvik Java Runtime. Cette nouvelle amélioration est indispensable à la gestion des plusieurs machines virtuelles simultanément, ce qui offre une meilleure optimisation de la consommation en mémoire du système. Cette amélioration a aussi apporté des fonctionnalités riches de débogage et de compilation.
- Bibliothèques "Core Runtime": Ces bibliothèques enrichissent encore le langage de programmation Java.
- Bibliothèques Natives C/C++ : Le fait qu'un large éventail des composants et des services est écrit en langage native de C et C++ a poussé les fondateurs de cette plateforme à utiliser un Framework spécial dans la couche supérieure. Ce Framework offre la possibilité de gérer ce genre de bibliothèques, et d'accéder directement à cette plateforme de bibliothèques natives ; en utilisant l'outil de développement "Native Development Kit (NDK)".
- Infrastructure "Java API" : Vu que la totalité des options et des configurations sont offertes en Java, des Interfaces (APIs) sous forme des classes et des méthodes écrites en Java constituent les sources principales pour créer des applications mobiles sous Android. Cette couche est l'équivalente de la couche présentation du système ISO.
- Système d'applications: C'est la couche application de cette plateforme ; contenant des applications prêtes à utiliser par les développeurs, et à être insérées directement pour enrichir leur créations.

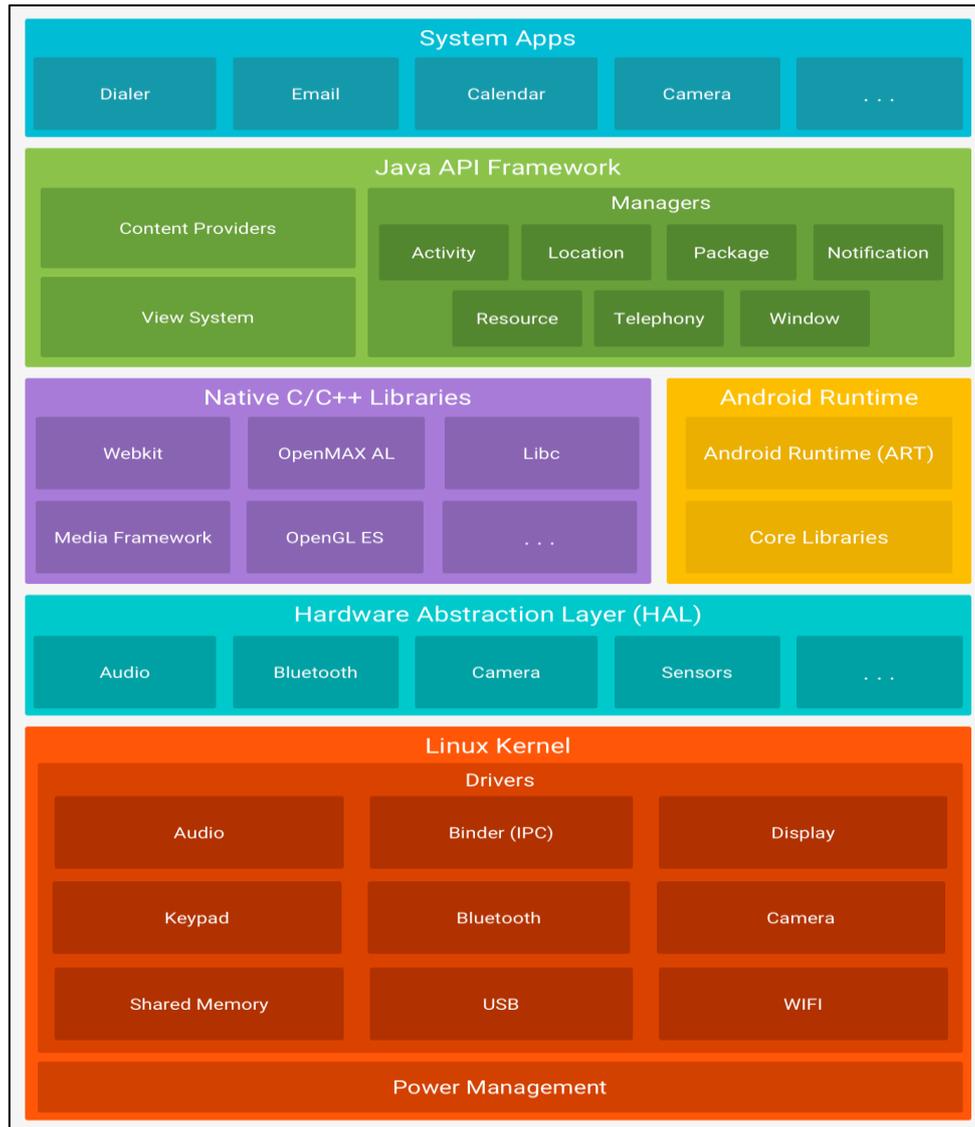


FIG. III.1 - Architecture de la plateforme Android.

III.1.2 - Environnement de développement

Connu par le terme "Software Development Kit (SDK)", Android Studio est un logiciel composé d'un ensemble d'outils, de moyens et de services. Il permet aux développeurs de concevoir des applications mobiles dédiées aux Smartphones, aux Wearables, aux voitures et aux télévisions intelligents [141].

Cet environnement est constitué principalement de [141] :

- Editeur de l'interface graphique : C'est un éditeur de l'interface présentée aux utilisateurs (UI). Il permet de choisir et de configurer la composition visuelle des applications selon le design envisagé par le développeur.
- Editeur du code : C'est un éditeur offrant les capacités de programmation des différentes fonctionnalités de l'application. Il donne ainsi du sens applicatif à chaque élément de l'interface graphique. Cet éditeur est devenu de plus en plus intelligent ; en intégrant des options de correction et de complétion automatique du code écrit en Java, en C/C++, et en Kotlin (le nouveau langage de programmation spécialement dédié à cette plateforme).

- "Android Virtual Device (AVD)" : C'est un émulateur qui permet de simuler le fonctionnement de l'application sur un mobile réel. Cet outil offre l'avantage d'expérimenter les différentes modifications apportées à l'application mobile ; sans être besoin d'utiliser un Smartphone réel. Cet émulateur est devenu plus rapide et intelligent, en incorporant récemment une plateforme de réalité augmentée, et d'autres fonctionnalités plus riches et adhérentes.
- "Gradle" : un système de construction qui offre la possibilité d'introduire plusieurs variantes de l'application, issues d'un seul projet et capables d'être exécuter sur différents terminaux mobiles.
- D'autres outils de gestion de la taille des applications (APK Analyzer) et de visualisation des statistiques de mémoire, des activités et des performances de l'application (Realtime Profilers).

III.1.3 - Capteurs sur Android Studio

Android Studio offre une couverture d'un certain nombre de capteurs du Smartphone. Ces capteurs sont détaillés dans le tableau **TAB. III.1 [141]**.

Capteur	Description et utilisation	Déclaration sous Android Studio
Accéléromètre	C'est un capteur de l'accélération selon des axes linéaires. Pour mesurer l'accélération d'un objet, il faut calculer sa vitesse, son mouvement et son orientation.	Il s'agit des trois variables correspondantes aux trois axes: x, y, z.
Gyroscope	Contrairement à l'accéléromètre qui mesure le mouvement linéaire, le gyroscope permet de mesurer le mouvement d'un objet en rotation.	De même, le gyroscope a besoin des trois axes orthogonaux: x, y, z.
Magnétomètre	Ce capteur permet de calculer l'intensité du champ électromagnétique.	En plus des trois axes, ce capteur a besoin de définir son type sous Android.
Lumière	Ce capteur permet tout simplement de capter l'intensité de la lumière. Il est utilisé fréquemment pour régler l'intensité de la lumière des écrans des Smartphones selon les besoins des utilisateurs.	Ce capteur a besoin d'une seule variable x.
Pression	Ce capteur est l'équivalent du baromètre qui peut mesurer la pression de l'atmosphère autour du Smartphone.	Tout comme le précédent, ce capteur a besoin d'une seule variable x.
Température	Ce capteur mesure la température de l'environnement autour du Smartphone.	En plus de la variable x, déclarer le type de ce capteur est essentiel sous Android.
Humidité	Pareil aux trois derniers capteurs qui mesurent des caractéristiques environnementales, ce capteur est dédié à la mesure de l'humidité autour du Smartphone.	Pour sa propre déclaration sous Android, ce capteur a besoin d'une variable x, en plus de la déclaration de son type particulier.

TAB. III.1 – Liste des capteurs disponibles sur Android Studio.

III.1.4 - Bluetooth HDP

Pour établir une communication Bluetooth entre l'application mobile et l'appareil médical suivant le protocole HDP, spécifiquement dédié aux applications médicales et sous Android Studio, quelques étapes simples sont nécessaires. Ces étapes peuvent être résumées comme suit [7] :

- Il faut tout d'abord définir la référence "Proxy" de l'appareil médical suivant ce protocole. Cette référence est généralement suivant la forme "11073-xxxx", dont les 5 derniers chiffres sont différents d'un appareil à un autre (Voir Chapitre I de la première partie).
- Ensuite, il est essentiel de configurer l'application mobile comme étant un "Sink", ainsi de créer l'activité dite "Health Callback".
- Dans la majorité des cas, la connexion est instinctivement initiée par l'appareil médical.
- Le transfert des données médicales peut être établi en faisant appel à la méthode "Health Manager" qui implémente les mêmes spécifications IEEE des appareils médicaux.

III.1.5 - Service Cloud

Entant que le principal constructeur de cet environnement, l'équipe des développeurs Google essaye de plus en plus de suivre la tendance technologique ; en intégrant des fonctionnalités innovantes au domaine de développement des applications mobiles [141]. Parmi ces options les plus récentes, l'incorporation des bases de données sur le Cloud représente une des capacités créatrices de cette équipe [142]. Dans cette catégorie, Le nom "Firebase" symbolise la fameuse base de données de Google, conçue spécialement pour manipuler une large variété de données mobiles. C'est une base de données qui offre des services en arrière plan aux applications mobiles [142] (Voir Fig. III.2). Ce service gère les données partagées par ces applications ; tout en proposant des repérages automatiques, des synchronisations continues et en temps réel, des options de stockages, des fonctionnalités d'authentification par des standards reconnus (OAuth 2.0, OpenID Connect, etc.) et des options de notification variées selon les préférences des utilisateurs. En plus de cette gamme inédite, Firebase fournit une option dite "Across MultiDevices". Cette option donne la possibilité aux utilisateurs des terminaux mobiles de n'importe quel firme (iOS, Android, etc.) de consulter leurs données sur Cloud, et ceci en gardant toujours la sécurité des données [142].

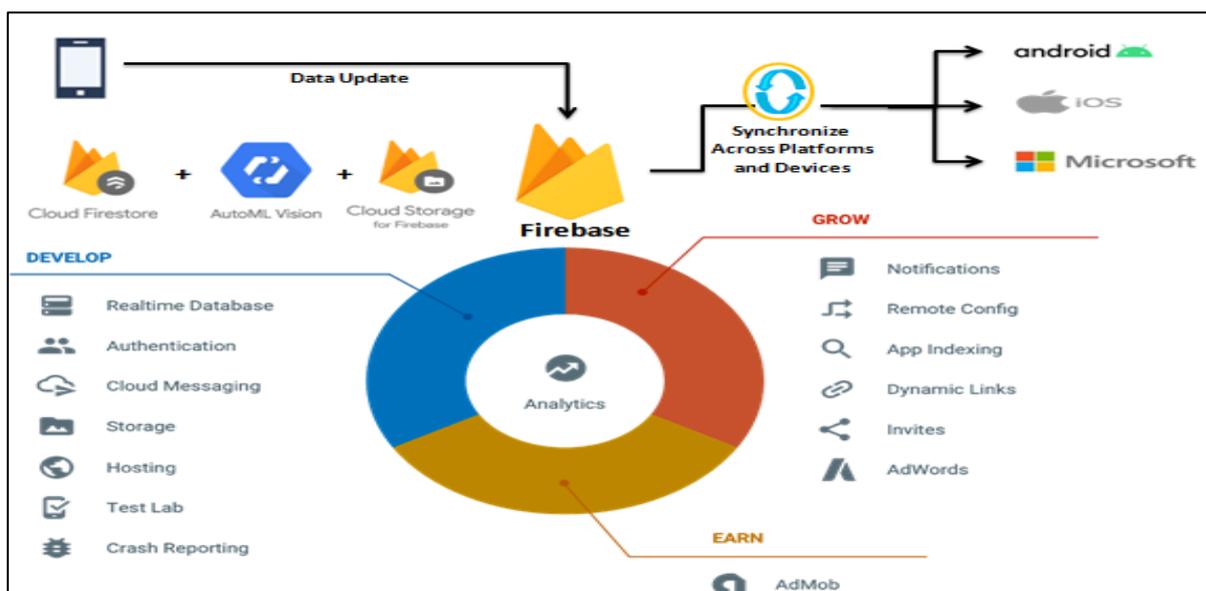


FIG. III.2 - Services et fonctionnalités de Firebase.

III.1.6 - Options Intelligentes

En essayant toujours de suivre la tendance numérique, Google a rediriger encore une fois ces créations pour concevoir des outils innovants, permettant aux développeurs d'enrichir leurs applications par des fonctionnalités intelligentes [143]. Ce Kit sous Firebase, conçu spécialement pour ajouter des systèmes de ML et de DL est nommé "ML Kit" [143]. Il utilise un environnement de haute capacité pour la classification des images et la génération des modèles graphiques des réseaux de neurones de type CNN, RNN, MLP, etc. Cet environnement est connu par "TensorFlow" [144]. En plus de TensorFlow, un autre environnement déployé par ce kit est spécialisé dans le domaine de la reconnaissance des textes est nommé "Optical Character Recognition (OCR)".

III.1.6.1 - Exécution des modèles intelligents sous Android Studio

Vu que les modèles de TensorFlow sont écrits en C++, il est possible d'utiliser l'environnement NDK d'Android Studio pour les exécuter sur les terminaux mobiles [144]. Le modèle peut être conçu sur Python, en utilisant les APIs de TensorFlow et exporté ensuite à l'environnement Android suivant quelques étapes essentielles [144] (Voir Fig. III.3).

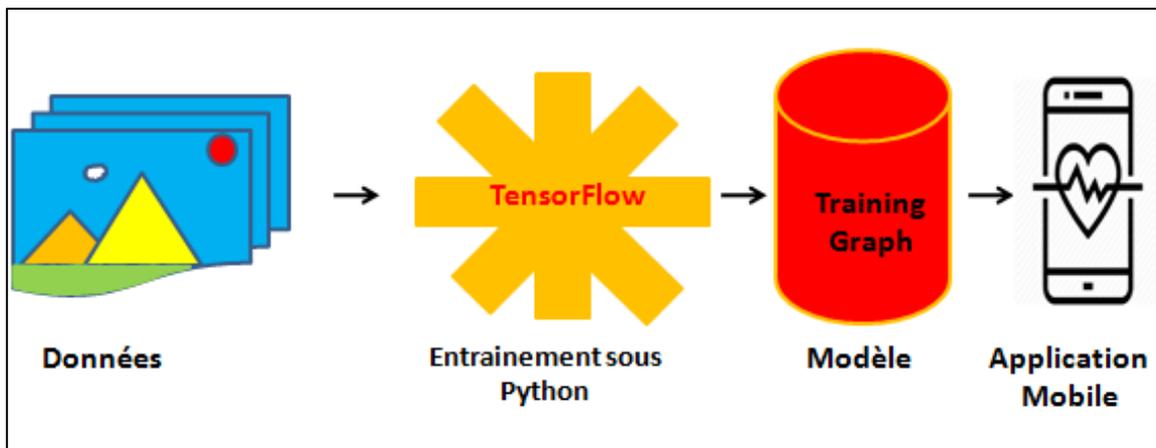


FIG. III.3 - Déploiement d'un modèle de TensorFlow dans une application mobile.

Cette procédure peut être résumée en quelques étapes [144] :

- **Chargement des données** : Cette étape est indispensable au bon fonctionnement de n'importe quel modèle de l'AI. A la simple raison qu'une base de données bien choisit (massives, des données claires) peut améliorer les capacités du modèle généré à la fin, et ceci en donnant des entrées bien distinguées à la boîte noire pour entraîner le modèle le plus efficacement possible [103]. De cette manière nous pouvons affirmer la bonne qualité des sorties et de même l'efficacité du modèle de classification ou de prédiction produit.
- **Conception** : Cette étape représente le cœur du travail. C'est à ce niveau qu'il faut définir le type du modèle, ses différentes couches et les opérations à exécuter sur chaque couche. Les étapes d'entraînement, de validation et de teste sont ainsi essentielles pour la génération finale du modèle en question (Voir **Chapitre I** de la deuxième Partie).
- **Stockage** : l'enregistrement du modèle final est également important pour pouvoir l'exporter par la suite. Ce mécanisme consiste à immobiliser le modèle en un moment donné. Il s'agit de l'approche dite "Freezing" pour pouvoir capter une version globale [145]. Ensuite, des mécanismes d'optimisation de la taille de ce modèle sont suivis afin de produire une version

plus réduite dont les valeurs non nécessaires sont enlevées [145]. D'autres méthodes plus faciles de conservation du modèle peuvent être utiliser comme la fonction "save" [145]. La version du modèle conservée peut être sous forme d'un fichier à l'extension ".h5" ou ".json" [145].

- Exportation : Avant de l'exporter, convertir le modèle en une version plus réduite, plus souple et compatible aux téléphones mobiles dite "Tensorflow Lite" à l'extension ".tflite" est très important pour garantir des performances plus avantageuses [144]. Le modèle est maintenant prêt à être immigrer vers l'environnement de développement de l'application mobile.
- Téléchargement des modules de Tensorflow Lite sur Android Studio [141] : Il faut choisir la dernière version de module de Tensorflow, et le fichier dit "Android Archive (AAR)" qui est compatible avec le système Gradle et peut reconnaître toutes sortes de fichiers écrits en C++. Il existe aussi un nouveau moyen pour immigrer les modèles vers Android Studio. Cette nouvelle méthode consiste à utiliser une nouvelle librairie dite "TensorFlow.jar". Avec cette méthode, il n'est plus obligatoire de concevoir le fichier NDK équivalent.
- Implémentation : Cette étape est essentielle pour ajouter le code nécessaire au déploiement du modèle sur Android. Pour cela une utilisation des méthodes (Tensorflow Interpreter, loadModel, TensorflowClassification, etc.) est indispensable pour programmer l'application mobile intelligente. Après cette étape d'implémentation, des requêtes spécifiques à partir du programme principal sur Android SDK vont être déclenchées vers Android NDK ; en utilisant l'interface intermédiaire entre le langage Java et C++, connue par "Java Native Interface (JNI)" [141]. Les réponses acquises à partir du Tensorflow vont généré le modèle adéquat et par conséquent, la classification des données de l'application mobile (Voir Fig. III.4).

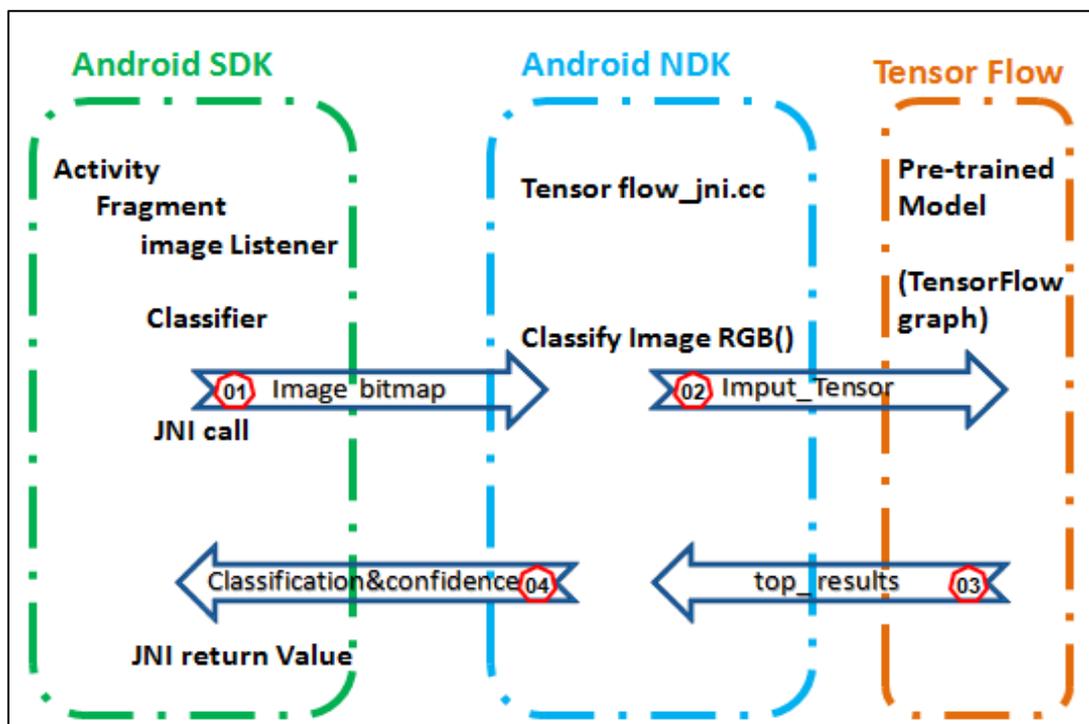


Fig. III.4 - Communications entre le SDK et le NDK pour l'exécution du modèle de classification.

III.2 - Structure des applications mobiles proposées

Notre plateforme *SMILE* est principalement composée des deux applications mobiles. Une application principale est dédiée aux patients. Une autre application secondaire est offerte aux professionnels de santé.

III.2.1 - Application "Patient"

- L'application Patient représente la principale base de cette plateforme. Elle est structurée d'une façon complexe et embrouillée en arrière plan, en regroupant plusieurs fonctionnalités et activités simultanément. Cependant, cette complexité de programmation donne une grande souplesse des interactions offertes aux patients en premier plan, ce qui facilite l'accessibilité, la gestion et la manipulation de la totalité de ces options. Cette structure est composée d'une activité principale nommée "MainActivity", en plus des autres activités donnant naissance à 8 principaux services (Voir Fig. III.5). Ces services regroupent l'identification, les animations relatives à l'utilisation de l'ECG, le Bluetooth, l'affichage des données ECG, la classification, le stockage, les notifications et la localisation.

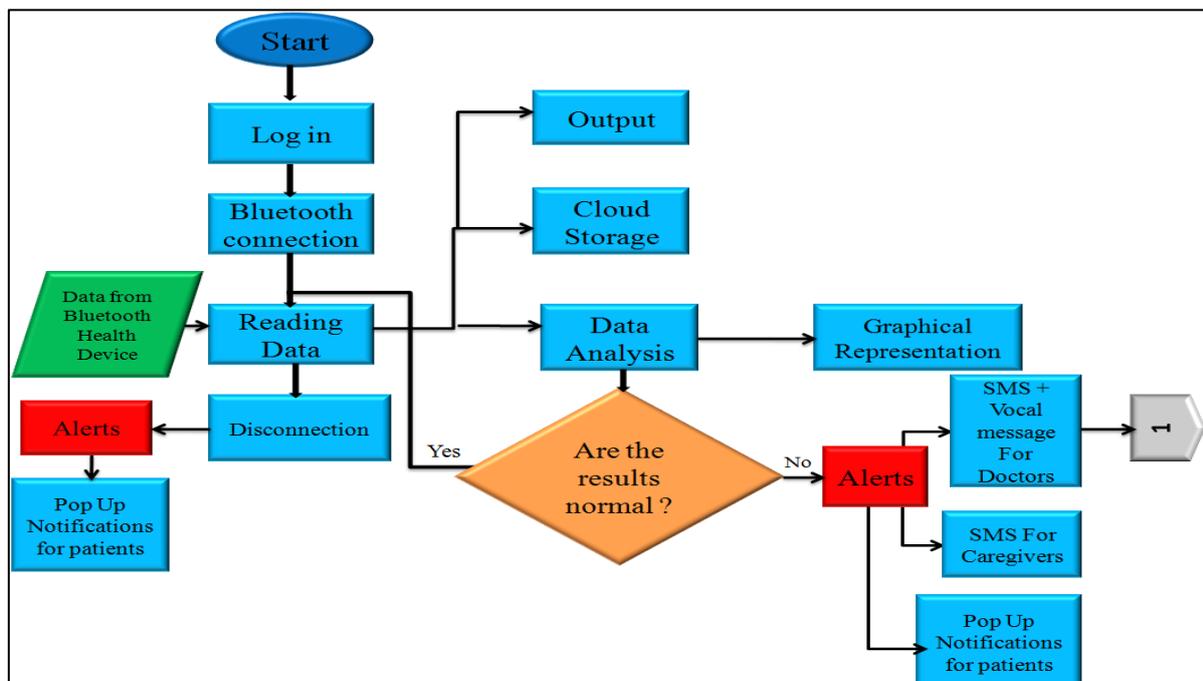


FIG. III.5 - Structure globale de l'application Patient [72].

III.2.1.1 - Service d'identification

Ce service a pour but principal la sécurisation de l'accès aux fonctionnalités de l'application mobile par la méthode d'authentification. Une première étape de souscription est établie afin d'enregistrer les données nécessaires au niveau du service de stockage, y compris le nom, le prénom, le numéro de téléphone, le nom préféré par l'utilisateur, les numéros de téléphone de son médecin et son proche et le mot de passe. Cette étape peut être effectuée par le proche du patient en cas d'une dépendance majeure de ce dernier pour faciliter encore plus cette démarche. Après cette étape, le patient peut bénéficier de toutes ces fonctionnalités en toute sécurité, en tapant son nom et son mot de passe.

III.2.1.2 - Service de manipulation du prototype ECG proposé

Pour faciliter encore plus l'utilisation du prototype ECG proposé dans la section précédente, une animation simple et facile à suivre est proposée pour rappeler la méthode de placement de ses électrodes. Cette animation est jugée très utile vu la difficulté rencontrée par la majorité des patients pour placer ces électrodes correctement. Cette animation est composée des images explicatives affichées successivement avec un délai de quelques secondes.

III.2.1.3 - Service Bluetooth

Ce service est indispensable pour relier l'appareil ECG à l'application mobile. Comme étant le serveur de connexion, cette dernière déclenche une recherche de l'appareil équivalent. Une fois détecté et connecté, l'ECG peut envoyer les données mesurées à l'application en toute aisance. La lecture de ces données est instantanément déclenchée pour les transmettre simultanément aux activités d'affichage, de classification et de stockage.

III.2.1.4 - Service d'affichage

Une fois les deux terminaux mobiles sont connectés, la représentation graphique de l'ECG sur le Smartphone se déclenche directement. Cette représentation est également synchronisée avec les données reçues, dans le but de donner une idée claire aux utilisateurs sur leur état de santé en temps réel. Ce sont ces mêmes données qui vont être traitées et manipulées par les services restants.

III.2.1.5 - Services de classification et de notification

Au même temps de la réception, d'affichage et du stockage des données de l'ECG, le modèle exporté et converti en format réduite est appelé par l'activité de classification pour analyser ces données et générer les évaluations équivalentes. Ce modèle est accompagné d'un fichier texte simple contenant les noms des classes désirées suivant le même ordre utilisé lors de l'entraînement du modèle. Pour un ECG normal, les notifications affichées sur l'écran principal du Smartphone du patient sont encourageantes, amusantes et peut être parfois désactivées pour diminuer la consommation en énergie de l'application. En cas d'une anomalie détectée, une alerte d'urgence sous forme d'un SMS est envoyée automatiquement et au même temps au médecin, et au proche du patient. Ce message est envoyé aux numéros des téléphones récupérés à partir des données enregistrées lors du premier usage (souscription). La notification affichée sur l'écran contient dans ce cas des indications à suivre, avec un langage bien choisi pour ne pas perturber le patient, lui inquiéter ou aggraver son état.

III.2.1.6 - Service de stockage

Ce service est appelé lors de l'exécution de plusieurs étapes de l'application, y compris la première souscription, la vérification du "Login" à chaque fois, la réception des données de l'ECG en continu, et de même leur classification. Deux types de stockage sont utilisés. Le stockage interne sur Smartphone est effectué en utilisant les bases de données "SQLite". Il permet à l'utilisateur d'avoir un œil sur l'historique de ses données. Le deuxième type externe est effectué au même temps sur le Cloud, à l'aide du service de base de données en temps réel offert par Firebase. Ce dernier type permet de partager les données médicales avec le médecin, qui est à son tour connecté à la même base de données après authentification.

III.2.1.7 - Service de localisation

Ce service de localisation est conçu spécialement pour les patients en urgence et qui souffrent d'une anomalie ou d'un malaise. Cette activité peut être déclenchée par le patient, lorsqu'il se trouve dans une situation pareille, en appuyant sur le bouton d'alerte de l'application. C'est à ce moment que le GPS est activé et un SMS contenant son adresse exacte est envoyé, automatiquement et en temps réel à son proche. Le texte du message est écrit automatiquement, le numéro du contact est relevé des données enregistrées et le message est envoyé sans aucune interaction de la part du patient (autre de son premier click sur le bouton).

III.2.2 - Application "Médecin"

Cette deuxième application appelée "Médecin" symbolise l'interaction des professionnels de santé, les différents échanges d'informations et les interventions indispensables pour sauver la vie des patients. Cette application est de taille plus réduite que la première. Elle ne contient que des services d'identification, de visualisation des données sur le Cloud, de leur gestion, de notification et de messagerie (Voir Fig. III.6).

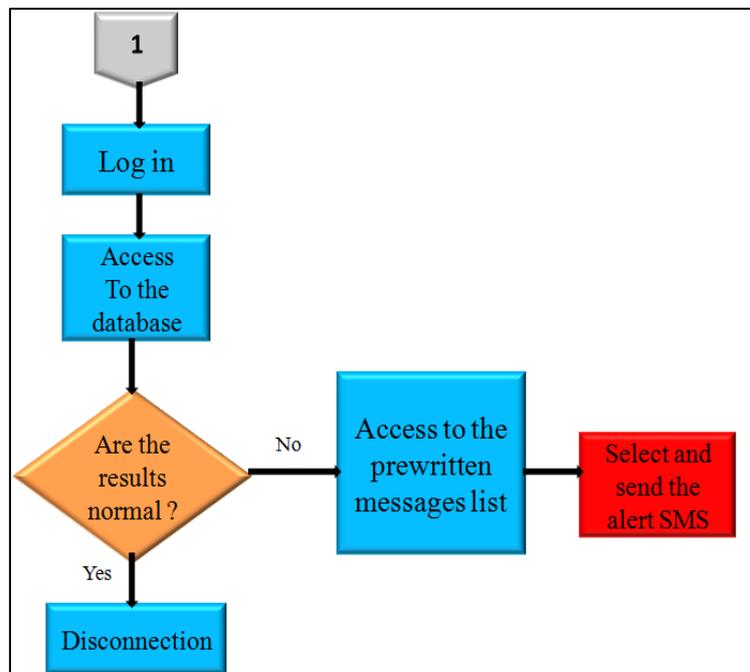


FIG. III.6 - Structure globale de l'application Médecin [72].

III.2.2.1 - Visualisation des données médicales

Lorsqu'il reçoit des alertes sous forme de messages, le médecin peut accéder à la base de données de son patient par une authentification. A ce moment le médecin peut en toute sécurité visualiser les données de son patient, voir l'historique de ses paramètres vitaux et de même construire son avis médical final.

III.2.2.2 - Décision de l'expert médical

Si le médecin trouve que cette alerte est fautive et que cette anomalie n'engendre pas de complications sur l'état de santé de son patient, il peut tout simplement la négliger. Sinon, et dans un cas d'urgence, le médecin peut accéder à sa liste des messages préétablis, et sélectionner le message

le plus adéquat pour l'envoyer au proche du patient, et aux urgences. Il peut également choisir les indications à envoyer au patient. Cette liste de messages est établie en se basant sur les exigences et les recommandations des professionnels de santé.

III.3 - Implémentation

La programmation des différentes activités et des services incorporés aux deux applications mobiles repose sur l'implémentation du code en Java, pour la réalisation et la gestion de la variété des fonctionnalités techniques proposées. Le passage d'une activité à une autre est accompli par l'emploi des fonctions spécifiques appelées "Intent" [141]. La structure de cette programmation est définie par des activités variées ; allant de l'écran principal dédiée au choix de l'application adéquate et équivalent à l'activité dite "Main", aux activités dites "Manager" et "Helper" de gestion des différents services intégrés (Voir **Fig. III.7**).

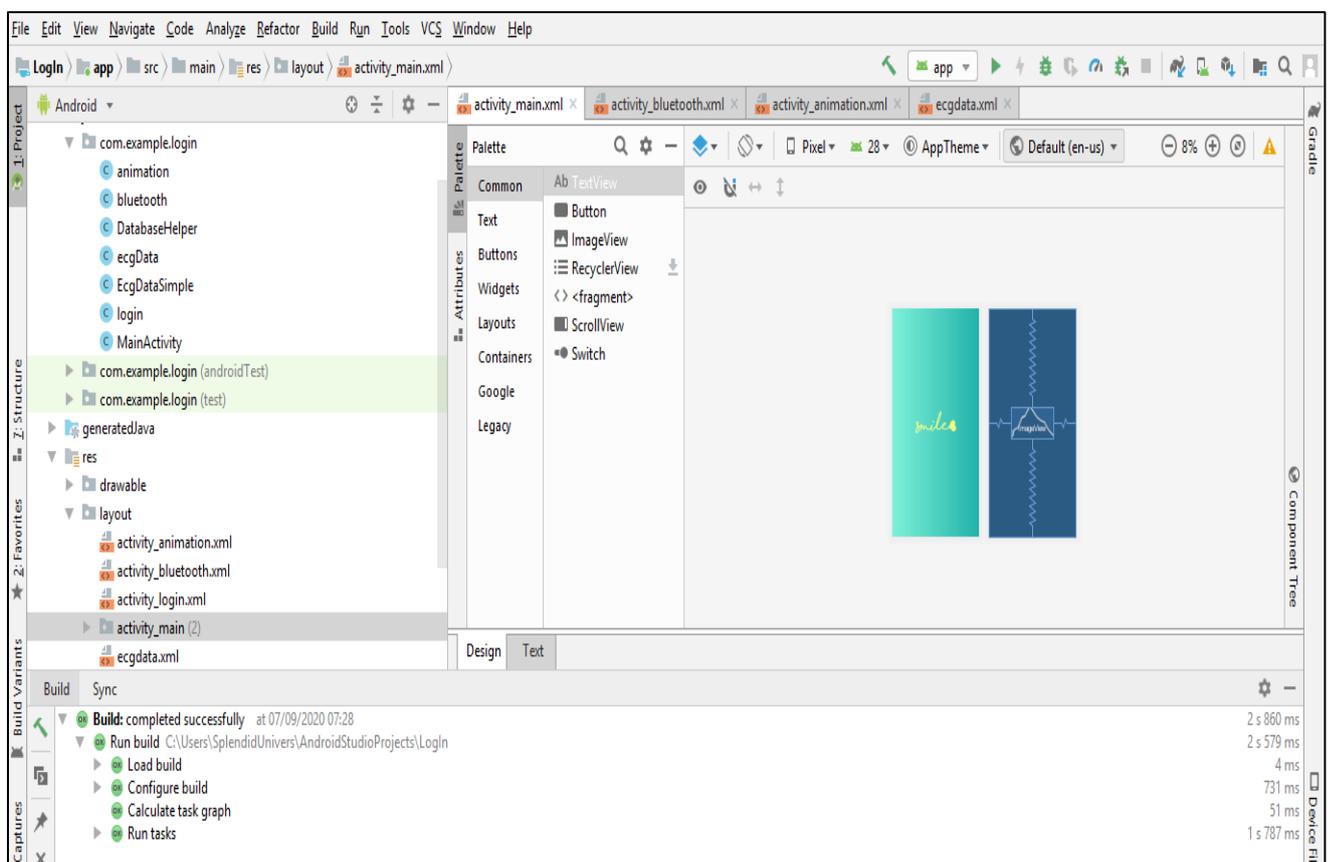


FIG. III.7 - Structure globale de **SMILE** lors de son implémentation.

Les interfaces graphiques sont construites à l'aide du langage XML [141]. Des valeurs de tailles, de couleurs, d'arrangement des textes, des boutons, des images et d'affichage compatibles avec une large gamme de téléphones mobiles sont bien choisies pour garantir le même niveau de performance graphique délivré aux utilisateurs.

III.4 - Contributions

Cette partie de programmation logicielle a donné de la vie aux idées et aux contributions souhaitées au cours des étapes précédentes. Les deux applications mobiles destinées aux patients et aux professionnels de santé sont caractérisées par des solutions d'adaptation et de redondance pour garantir un bon fonctionnement et une continuité d'usage sous les différents cas critiques possiblement rencontrés. L'interopérabilité de design proposé pour une large gamme de téléphones mobiles valides sur le marché actuel, en plus des mécanismes de compatibilité déployés garantissent une grande accessibilité aux options offertes. La sécurité des données personnelles traitées par **SMILE** et échangées entre le patient et son entourage est totalement respectée. La gestion des préférences des patients, la prise en considération de leurs besoins particuliers et de leurs différentes émotions par l'utilisation d'un langage bien choisi, des fonctionnalités sur mesure et des options intelligentes sont les points les plus forts qui donnent de l'originalité à notre plateforme. La notion du temps réel, fondamental dans le domaine des urgences est un autre avantage de nos applications fournies. Cette notion est bien vérifiée grâce au choix particulier des versions légères et rapides des logiciels intégrés.

III.5 - Conclusion

L'implémentation des algorithmes nécessaires à la réalisation des applications médicales a efficacement contribué à la concrétisation des idées et des visions envisagées par notre plateforme **SMILE**. L'harmonisation des différentes parties matérielles et logicielles a finalement achevé ses objectifs par la naissance des deux applications Patient et Médecin destinées à renforcer la relation entre les patients et leurs thérapeutes, ainsi de soutenir le patient chronique face à sa dépendance causée par les maladies cardiovasculaires.

De la conception des algorithmes de classification représentant le cerveau analytique de **SMILE**, aux applications mobiles symbolisant les interactions directes des patients chroniques avec leurs thérapeutes, passant par l'intermédiaire matériel circulant de l'information utile entre le patient et ses outils logiciels, cette deuxième partie a détaillé les étapes nécessaires à la réalisation de toutes ces sections confondues.

Les performances de ces réalisations sont encore évaluées, validées et de même améliorées dans la partie suivante.

Références

- [7] D. Zhong, M. J. Kirwan, and X. Duan, "Developing Interoperability Standards for Personal Health Devices", *Global forum, IEEE, Bluetooth Org and Continua Alliance*, Geneva, 24 Nov. 2013.
- [43] F. Touati and R. Tabish, "U-Healthcare System: State-of-the-Art Review and Challenges," *J. Med. Syst.*, Jun. 2013.
DOI: 10.1007/s10916-013-9949-0
<https://link.springer.com/article/10.1007/s10916-013-9949-0>
- [69] Site officiel de l'Organisation mondiale de la Santé, "Maladies cardiovasculaires", 2020.
[https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-\(cvds\)](https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/cardiovascular-diseases-(cvds))
- [70] Medgeeks, D. Champigny, "How to Read an ECG - Medgeeks", 2020.
<https://medgeeks.co/articles/how-to-read-an-ecg>
- [72] K. Lakhdari, R. Merzougui and H. Slimani. "An intelligent m-Health Platform for Chronic Diseases: Design and Conception", *Eurasian Journal of Analytical Chemistry*, vol. 13, no. 3, 2018.
<http://www.eurasianjournals.com/An-intelligent-m-Health-Platform-for-Chronic-Diseases-nDesign-and-Conception,108860,0,2.html>
- [73] T. J. Jun, H. Minh Nguyen, D. Kang, D. Kim, D. Kim and Y. H. Kim, "ECG arrhythmia classification using a 2-D convolutional neural network", arXiv:1804.06812v1, 18 April 2018.
<https://arxiv.org/abs/1804.06812>
- [74] www.polar.com, "Polar H10 : Ceinture pectorale", 2020.
https://www.polar.com/fr/produits/accessories/capteur_de_frequence_cardiaque_h10
- [75] A. Valsecchi, S. Damas and J. Santamaría, "An image registration approach using genetic algorithms," *2012 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Brisbane, QLD, pp. 1-8, 2012.
DOI: 10.1109/CEC.2012.6256162.
- [76] kaggle.com, "Brain Tumor MRI Classification : VGG16", 2019.
<https://www.kaggle.com/loaiabdalslam/brain-tumor-mri-classification-vgg16>
- [77] A. Nisha , S. S. Nisha, "Comparative Study of Sift & Surf Algorithm in Alzheimer's Disease Detection", *IJIRCCE*, vol. 4, no. 12, pp. 21176 - 21183, Dec. 2016.
DOI: 10.15680/IJIRCCE.2016. 0412130.
- [78] M. Limam, F. Precioso, "Atrial Fibrillation Detection and ECG Classification based on Convolutional Recurrent Neural Network", *2017 Computing in Cardiology (CinC)*, Rennes , vol. 44 , pp. 1-4, 2017.
DOI:10.22489/CinC.2017.171-325.
- [79] A. Kumar, A. Bhisikar, A. K. Pandit, K. Singh and A. Shitole, "Brain Controlled Car using Deep Neural Network", *Asian Journal of Convergence in Technology*, vol. 5 ,no. 1, pp. 1-8, 2019.
<http://asianssr.org/index.php/ajct/article/view/773>
- [80] I. I Christov, "Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold", *BioMedical Engineering OnLine*, pp. 1-9, Aug. 2004.
DOI:10.1186/1475-925X-3-28.
<http://www.biomedical-engineering-online.com/content/3/1/28>
- [81] S. Sabour ,N. Frosst and G. E. Hinton, "Dynamic Routing Between Capsules ", arXiv :1710.09829v2 [cs.CV], pp.1-11, Nov. 2017.
<https://arxiv.org/abs/1710.09829>
- [82] M. Kachuee, S. Fazeli and M. Sarrafzadeh, "ECG Heartbeat Classification: A Deep Transferable Representation," *2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, New York, NY, pp. 443-444, 2018.
DOI: 10.1109/ICHI.2018.00092.
- [83] S. Mousavi and F. Afghah, "Inter- and Intra- Patient ECG Heartbeat Classification for Arrhythmia Detection: A Sequence to Sequence Deep Learning Approach," *ICASSP 2019 - 2019 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Brighton, United Kingdom, pp. 1308-1312, 2019.
DOI: 10.1109/ICASSP.2019.8683140.
- [84] N. Soltani, K. Sankhe, S. Ioannidis, D. Jaisinghani and K. Chowdhury, "Spectrum Awareness at the Edge: Modulation Classification using Smartphones," *2019 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, Newark, NJ, USA, pp. 1-10, 2019.
DOI: 10.1109/DySPAN.2019.8935775.

- [85] Analog Devices, Inc, "AD8232 Datasheet and Product Info : Analog Devices", 1995-2020.
<http://www.analog.com/AD8232> .
- [86] R. Rosario, "The OpenHolter Project: D.I.Y. Cardiometry with Arduino and Django", *DjangoCon Europe 2017*, Apr. 2017.
<https://speakerdeck.com/siloraptor/openholter-project-d-dot-i-y-electrocardiography-using-arduino-and-django>
- [87] W. N. Behutiye, "Android ECG Application Development", *Bachelor Thesis in Business information technologies, Oulu University of Applied Sciences*, 2012.
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/41688/Behutiye_Woubshet.pdf?sequence=1
- [88] F. Ragnarsson, "A portable ECG system for real-time arrhythmia classification - Smartphone implementation of a modular convolutional network applied on ECG-signals," Uppsala University, Jul. 2019.
<http://uu.diva-portal.org/smash/get/diva2:1345590/FULLTEXT01.pdf>
- [89] M. Havaei, A. Davy, D. Warde-Farley, A. Biard, A. Courville, Y. Bengioc, C. Palc, P-M. Jodoina and H. Larochelle, "Brain Tumor Segmentation with Deep Neural Networks", *Medical Image Analysis*, vol. 35, pp. 18-31, Jan 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.media.2016.05.004>
- [90] M. M. Badža and M.Č. Barjaktarović, "Classification of Brain Tumors from MRI Images Using a Convolutional Neural Network", *Appl. Sci*, vol. 6, no. 10, 2020.
<https://doi.org/10.3390/app10061999>
- [91] D. Sherathia and V. P. Patel, « Classification of ECG Beats based on Fuzzy Inference System », *International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR)*, vol. 06, no. 05, pp. 835-840, May 2017.
<http://ijsetr.org/wp-content/uploads/2017/05/IJSETR-VOL-6-ISSUE-5-835-840.pdf>
- [92] S. Savalia and V. Emamian, "Cardiac Arrhythmia Classification by Multi Layer Perceptron and Convolution Neural Networks", *Bioengineering*, vol. 5, no. 2, May 2018.
<https://doi.org/10.3390/bioengineering5020035>
- [93] K. He, X. Zhang, S. Ren and J. Sun, "Delving Deep into Rectifiers: Surpassing Human-Level Performance on ImageNet Classification," *2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago*, pp. 1026-1034, 2015.
DOI: 10.1109/ICCV.2015.123.
- [94] A.Y. Hannun, P. Rajpurkar, M. Haghpanahi, *et al.* "Cardiologist-level arrhythmia detection and classification in ambulatory electrocardiograms using a deep neural network". *Nat Med*, vol. 25, pp. 65–69, Jan. 2019.
<https://doi.org/10.1038/s41591-018-0268-3>
- [95] J. Huang, B. Chen, B. Yao and W. He, "ECG Arrhythmia Classification Using STFT-Based Spectrogram and Convolutional Neural Network," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 92871-92880, 2019.
DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2928017.
- [96] S. Pandey, W. Voorsluys, S. Niu, A. Khandoker and R. Buyya, "An autonomic cloud environment for hosting ECG data analysis services", *Future Generation Computer Systems, Elsevier*, vol. 28, no. 1, pp. 147–154, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2011.04.022>
- [97] E. H. Houssein, M. Kilany and A. E. Hassanien, "ECG signals classification: a review", *International Journal of Medical Engineering and Informatics*, vol. 5, no. 4, pp. 376-396, Jan. 2017.
DOI: 10.1504/IJIEI.2017.10008807
<https://www.researchgate.net/publication/320719654>
- [98] D. Yoon, H.S. Lim, K. Jung, T.Y. Kim and S. Lee, "Deep Learning-Based Electrocardiogram Signal Noise Detection and Screening Model", *Healthcare Informatics Research (HIR)*, vol. 25, no. 3, pp. 201-211, Jul. 2019.
<https://doi.org/10.4258/hir.2019.25.3.201>
- [99] R. Harini and B. R. Murthy, "Development of a Wireless Blood Pressure Monitoring System by Using Smartphone", *International Journal of Advanced Research in Electronics and Communication Engineering (IJARECE)*, vol. 6, no. 12, pp. 1383 -1386, Dec. 2017.
<http://ijarece.org/wp-content/uploads/2017/12/IJARECE-VOL-6-ISSUE-12-1383-1386.pdf>
- [100] K. Sugimoto, S. Lee and Y. Okada, "Deep Learning-based Detection of Periodic Abnormal Waves in ECG Data", *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (MECS), Hong kong*, vol. I, 2018.
http://www.iaeng.org/publication/IMECS2018/IMECS2018_pp35-39.pdf

- [101] R.K. Lama, J. Gwak, J-S. Park and S-W. Lee, "Diagnosis of Alzheimer's Disease Based on Structural MRI Images Using a Regularized Extreme Learning Machine and PCA Features", *Journal of Healthcare Engineering, Hindawi*, vol. 2017, pp. 1-11, Jun. 2017
<https://doi.org/10.1155/2017/5485080>
- [102] G. B. Moody and R. G. Mark, "The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 20, no. 3, pp. 45-50, May-June 2001.
DOI: 10.1109/51.932724.
- [103] M. Sajjad, S. Khan, Kh. Muhammad, W. Wu and A.Ullah and S-W. Baik , "Multi-grade brain tumor classification using deep CNN with extensive data augmentation", *Journal of Computational Science , Elsevier B.V*, vol. 30, pp. 174–182 , Jan. 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.jocs.2018.12.003> 1877-7503/
- [104] P. Kalavathi, A. Arul, A. Christy and T. Priya , "Detection of Alzheimer Disease in MR Brain Images using FFCM Method", *National Conference on Computational Methods, Communication Techniques and Informatics*, pp. 140-144 , Jan. 2017.
https://www.researchgate.net/publication/313056807_Detection_of_Alzheimer_Disease_in_MR_Brain_Images_using_FFCM_Method
- [105] www.apple.com, "Watch - Apple", 2020.
<https://www.apple.com/fr/watch/>
- [106] B. Pyakillya, N. Kazachenko and N. Mikhailovsky, "Deep Learning for ECG Classification", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, vol. 913, Sept. 2017.
DOI :10.1088/1742-6596/913/1/012004.
- [107] D. Argüello Ron, "Development of an Intelligent Embedded Interface for Interpreting Biosignals Recorded by Novel Wearable Devices", *Thèse de deuxième cycle en génie électrique de KTH ROYAL Institut de technologie*, Stockholm, Suisse, 2019.
<http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1376477&dsid=3458>
- [108] Y. Ji, S. Zhang and W. Xiao, "Electrocardiogram Classification Based on Faster Regions with Convolutional Neural Network", *Sensors (Basel)*, vol. 19, no. 11, Jun. 2019.
DOI:10.3390/s19112558.
<https://www.mdpi.com/journal/sensors>
- [109] R. Anitha, Mr. Prakash, S. Jyothi, "A Segmentation Technique To Detect The Alzheimer's Disease Using Image Processing", *International Conference en Electrical, Electronics et Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai*, pp. 3800-3801, Jan. 2016.
DOI: 10.1109/ICEEOT.2016.7755424
- [110] M. K. Delano, "A Long Term Wearable Electrocardiogram (ECG) Measurement System", *Thèse de Master, Massachusetts Institut de Technologie, Dept. Génie Electrique et Informatique, USA*, Juin 2012.
<https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/76811>
- [111] L. Plewa, "Early Prediction of Cardiac Arrest through Heart Rate Variability Analysis», *Thèse de Master, en Informatique, Université Polytechnique de California, San Luis Obispo, USA* , June 2015.
<https://core.ac.uk/download/pdf/32434165.pdf>
- [112] O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox, "U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation", *Navab N., Hornegger J., Wells W., Frangi A. (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham*, vol. 9351, Nov. 2015.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28
- [113] R. A. Wahyudi, A. Saripudin and A. H S. Budi, "Simulation of Design and Implementation of Smart Socket Prototype Controlled by Android Application", *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, vol. 384, no. 1, Jul. 2018
DOI:10.1088/1757-899X/384/1/012060.
- [114] Z. Ebrahimi, M. Loni, M. Daneshlab, and A. Gharehbaghi, "A review on deep learning methods for ECG arrhythmia classification", *Expert Systems with Applications: X, Elsevier*, pp. 174–182 , vol. 7, Sept. 2020.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590188520300123>
- [115] A. Sharmila and P. Geethanjali, "DWT Based Detection of Epileptic Seizure From EEG Signals Using Naive Bayes and k-NN Classifiers," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 7716-7727, 2016.
DOI: 10.1109/ACCESS.2016.2585661.
- [116] [Python.org](http://python.org), "Welcome to Python.org", 2001-2020.
<https://www.python.org/>

- [117] SLA Academy, "Role Of Python in Artificial Intelligence", mai 2020.
<https://www.slajobs.com/role-of-python-in-artificial-intelligence/>
- [118] docs.conda.io, "Miniconda - Conda documentation", 2017.
<https://docs.conda.io/en/latest/miniconda.html>
- [119] jupyter.org, "Jupyter Notebook", 2020.
<https://jupyter.org/>
- [120] opencv.org, "OpenCV", 2020.
<https://opencv.org/>
- [121] biosppy.readthedocs.io, "Welcome to BioSPPy — BioSPPy 0.6.1 documentation", 2015-2018.
<https://biosppy.readthedocs.io/en/stable/>
- [122] www.tensorflow.org, " Avec TensorFlow", 2020.
<https://www.tensorflow.org/?hl=fr>
- [123] C. Nnamdi, Medium, " Top 5 Machine Learning Libraries", Aug. 2019.
<https://blog.bitsrc.io/top-5-javascript-machine-learning-libraries-604e52acb548>
- [124] archive.physionet.org, " The WFDB Software Package - PhysioNet", 2018.
<https://archive.physionet.org/physiotools/wfdb.shtml>
- [125] A. Goldberger *et al.*, "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals". *Circulation [Online]*. vol. 101, no. 23, pp. e215–e220, 2000.
- [126] J. Li, Y. Si, T. Xu, S. Jiang, "Deep Convolutional Neural Network Based ECG Classification System Using Information Fusion and One-Hot Encoding Techniques", *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2018, Article ID 7354081, 10 pages, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/7354081>
- [127] J. Zhang, J. Tian, Y. Cao, Y. Yang, X. Xu and C. Wen. "Fine-grained ECG Classification Based on Deep CNN and Online Decision Fusion." *ArXiv abs/1901.06469*, 2019.
<https://arxiv.org/pdf/1901.06469v1.pdf>
- [128] M. Kachuee, S. Fazeli and M. Sarrafzadeh, "ECG Heartbeat Classification: A Deep Transferable Representation," *2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, New York, NY, pp. 443-444, 2018.
 DOI: 10.1109/ICHI.2018.00092.
- [129] X. Zhai and C. Tin, "Automated ECG Classification Using Dual Heartbeat Coupling Based on Convolutional Neural Network," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 27465-27472, 2018.
 DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2833841.
- [130] W. W. Tan, C. L. Foo and T. W. Chua, "Type-2 Fuzzy System for ECG Arrhythmic Classification," *2007 IEEE International Fuzzy Systems Conference, London*, pp. 1-6, 2007.
 DOI: 10.1109/FUZZY.2007.4295478.
- [131] V. D. Montañó, N. Linsangan and N. D. Ramos, "ECG Signal Classification for Remote Area Patients Using Artificial Neural Networks in Smartphone." *International Journal of Computer and Electrical Engineering*, vol. 7, pp. 215-222, 2015.
 DOI: 10.17706/ijcee.2015.7.3.215-222.
- [132] C. I. M. Cruz, J. P. Marasigan, A. P. G. Perez, J. E. V. Pillejera, N. P. Veron and A. R. dela Cruz, "A comparative study between DWT-ANFIS and DWT-SVM in ECG classification," *2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore*, pp. 2052-2055, 2016.
 DOI: 10.1109/TENCON.2016.7848386.
- [133] M. Zihlmann, D. Perekrestenko and M. Tschannen, "Convolutional recurrent neural networks for electrocardiogram classification," *2017 Computing in Cardiology (CinC)*, Rennes, pp. 1-4, 2017.
 DOI: 10.22489/CinC.2017.070-060
- [134] www.arduino.cc, "Arduino - Home", 2020.
<https://www.arduino.cc/>
- [135] cdn-shop.adafruit.com, datasheet, "SSD1306", 2008.
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
- [136] www.alldatasheet.com, "Hc-06 datasheet".
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Hc-06%20datasheet&gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-195TDggzxgoRUGIS5NG9gVHIAqj1ATne5VklSYzGo7BAhN6q-0p0aAlbBEALw_wcB

- [137] www.alldatasheet.com, "Ds3231 Datasheet PDF".
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ds3231&gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-OpTzA4c-4J-U4lf13Y4j4SXD3HnZJHfHV0h1fosASNJF3EYGGHjC0aAhWTEALw_wcB
- [138] www.fitbit.com, "Site Officiel Fitbit", 2020.
<https://www.fitbit.com/fr/home>
- [139] www.alivecor.com, "AliveCor", 2020.
<https://www.alivecor.com/>
- [140] www.cardiosecur.com, "CardioSecur: Mobile ECG Monitor", 2019.
<https://www.cardiosecur.com/>
- [141] www.android.com, developers "Building anything on Android", 2020.
<https://developer.android.com/>
- [142] firebase.google.com, "Firebase - Google Firebase", 2020.
https://firebase.google.com/?gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-36_PWMe6f2u2J1CKTZvj448_DuqXlb1T-fyjITogijwYmeTnMLrbYaAvqcEALw_wcB
- [143] developers.google.com, "ML Kit : Google Developers", 2020.
<https://developers.google.com/ml-kit>
- [144] www.tensorflow.org, "Avec Tensorflow", 2020.
<https://www.tensorflow.org/?hl=fr>
- [145] blog.metaflow.fr, "Tensorflow : How to freeze a model and serve it with a python API", 2016.
<https://blog.metaflow.fr/tensorflow-how-to-freeze-a-model-and-serve-it-with-a-python-api-d4f3596b3adc>

Troisième Partie : Validation

Chapitre I

Achèvements, synthèse et validation

SOMMAIRE

I.1 – Résultats et discussions

I.2 – Validation

I.3 – Conclusion

L'élaboration d'une synthèse des résultats afin de valider notre solution *Smile* sur le plan technique, d'évaluer sa conformité aux normes de santé publique, d'examiner son efficacité à répondre aux besoins critiques des patients chroniques et également aux exigences de leur entourage thérapeutique représentent les principaux atouts de ce chapitre.

I.1 - Résultats et discussions

I.1.1 - Résultats du prototype matériel

Les résultats de la programmation des cartes Arduino incluses dans le montage sont très encourageants (Voir Fig. I.1). Ces visualisations représentent l'ECG mesuré par le capteur de l'activité cardiaque et envoyé par Bluetooth. Ils sont affichés sur l'écran OLED utilisé.

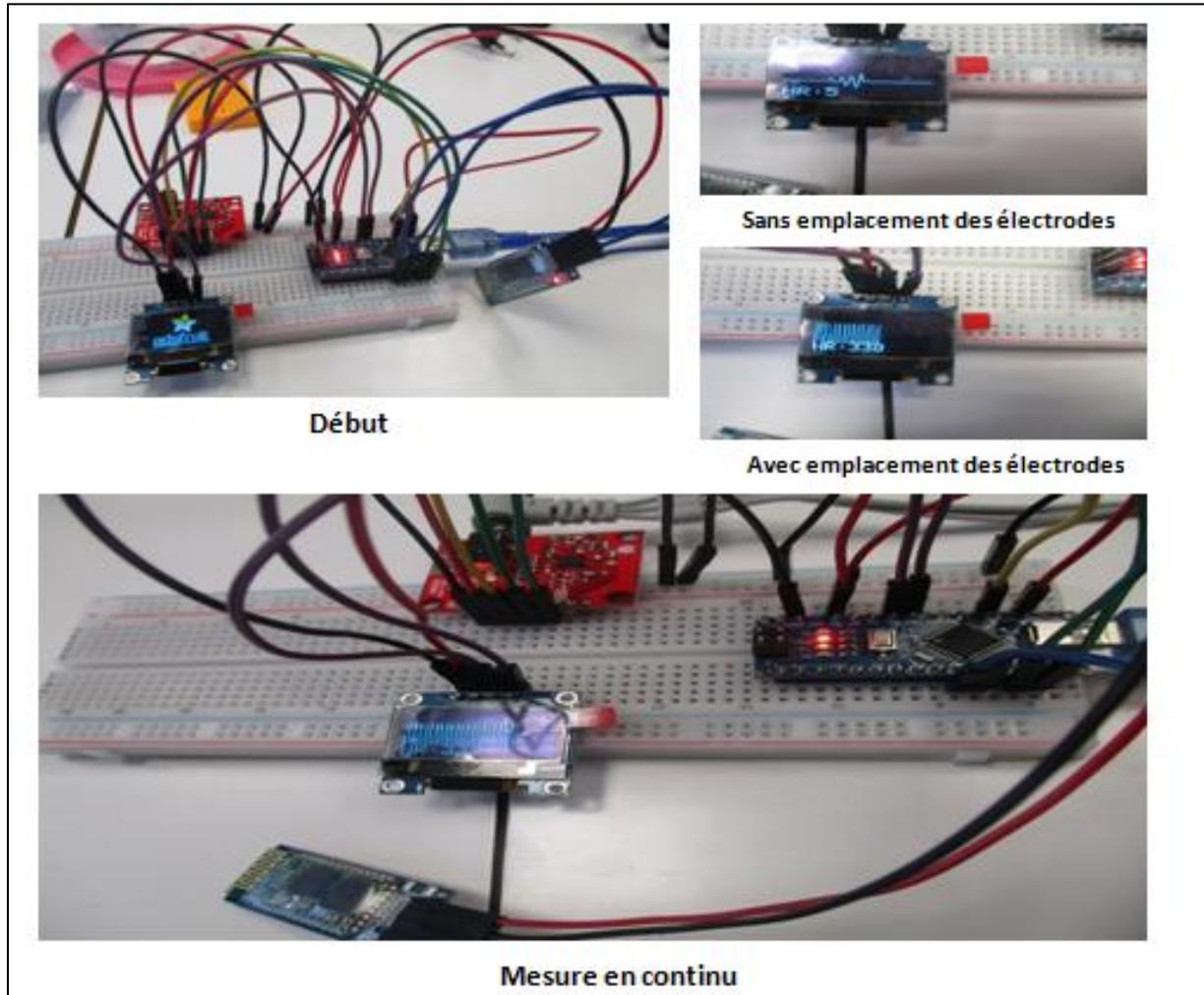


FIG. I.1 - Affichage de l'ECG sur l'écran du prototype proposé.

Ces performances sont liées aux composants choisis pour la conception de ce prototype. Chaque composant est caractérisé par des points favorables en termes de consommation de l'énergie, de durée de vie de la batterie et de rapidité de calcul. Ces records peuvent être résumés en quelques points essentiels :

- Le capteur principal de l'activité cardiaque a des capacités de lecture de la différence de voltage sur son entrée. Ce signal détecté est amplifié et de même filtré. Une conversation de l'analogique au numérique est ensuite établie au niveau du microprocesseur pour un traitement adéquat. Cependant, cette carte munie de seulement 3 électrodes peut parfois avoir une précision inférieure à celle d'un ECG à 12 dérivation, avec un plus grand nombre d'électrodes qui couvrent une large zone de la poitrine du patient [70]. L'emplacement de

ces électrodes joue donc un rôle très important en terme des performances obtenues. Le signal affiché a une précision très bonne seulement si l'emplacement est bien établi. Cette valeur est médiocre dans le cas contraire.

- La petite taille de 45x18x18mm du microcontrôleur de type ATmega328 (carte Nano) en plus de son poids limité à 5g facilite l'usage de ce prototype au quotidien [134]. L'habilité d'être alimenté à partir d'une source externe augmente la totalité de la durée du fonctionnement de l'appareil.
- L'interface graphique utilisée est munie d'un affichage de 126x64 pixels, doté d'une capacité d'interprétation des mesures en temps réel [135].
- La mémoire limitée à d'environ 32ko de la carte Nano utilisée est bien améliorée grâce à l'incorporation de la carte SD. La capacité en mémoire peut être alors de plus de 32GB, tous dépend de la SD ajoutée. Cette unité de stockage peut être augmentée, changée ou remplacée si nécessaire.
- La synchronisation de ce stockage par une RTC est un autre point d'avantage pour notre prototype. Cette horloge de petite taille, munie d'une batterie est une solution fiable aidant à l'enregistrement de l'historique des mesures détectées.
- La durée de vie de la batterie peut résister jusqu'à 12 jours, grâce à une pile compatible et rechargeable.

I.1.2 - Résultats des applications mobiles

Les résultats des applications mobiles proposées sont résumées à l'aide des discussions suivantes :

- Après un écran d'accueil pour permettre à l'utilisateur de choisir le profil approprié (Patient ou Médecin), l'application choisie commence par un écran principal d'identification (Voir FIG. I.2). Le stockage des ces paramètres est établi en temps réel sur le Smartphone (Voir FIG. I.3). Une gestion des données d'authentification est établie pour renforcer la sécurité des données partagées et administrer l'accès aux services proposés (Voir FIG. I.4).

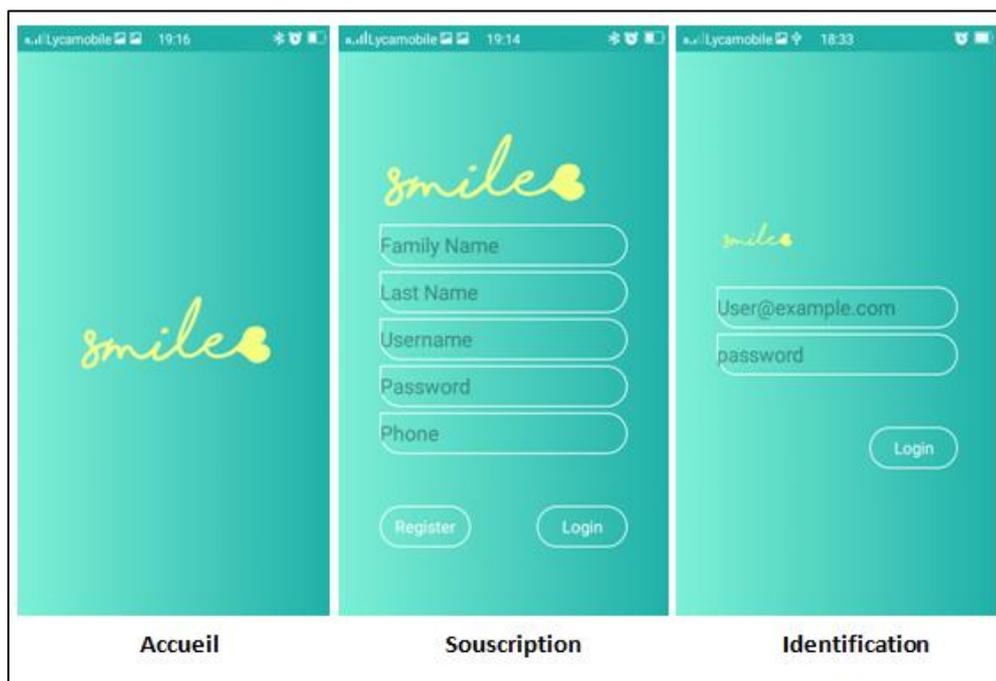


FIG. I.2 - Ecrans d'accueil de souscription et d'identification.

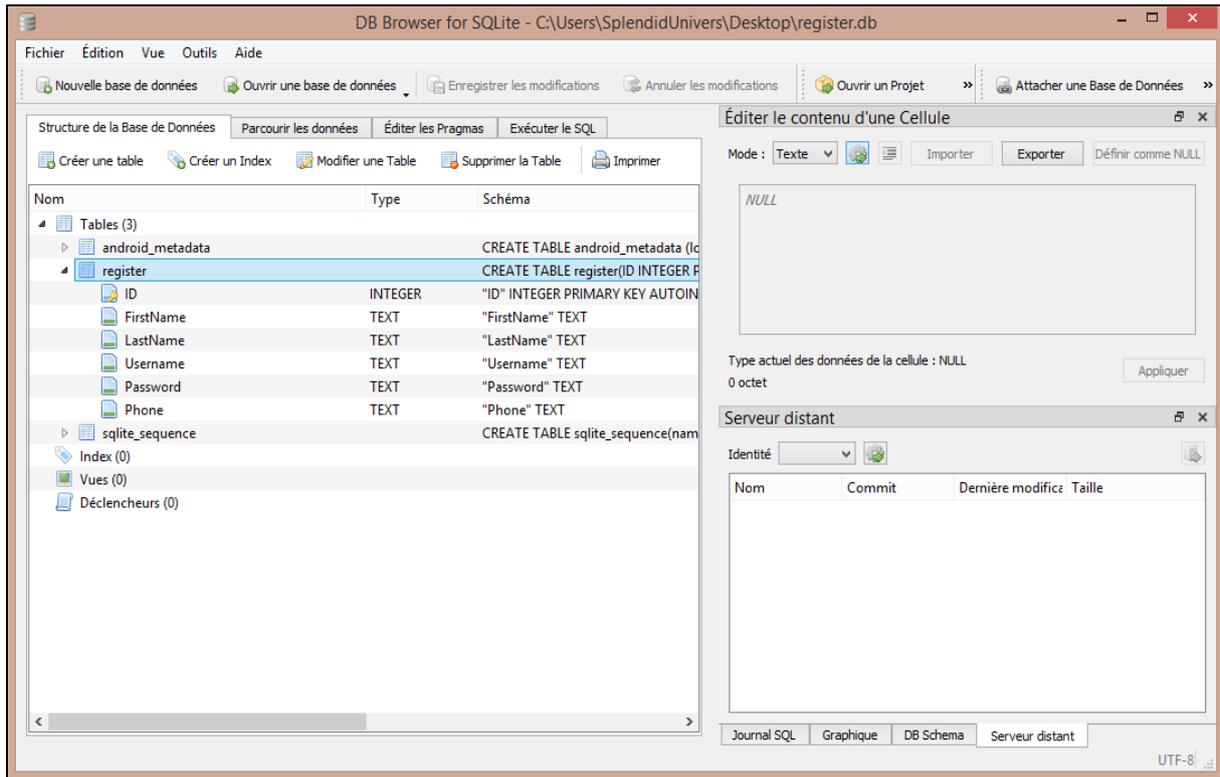


FIG. I.3 - Gestion des informations sur la base des données SQLite.

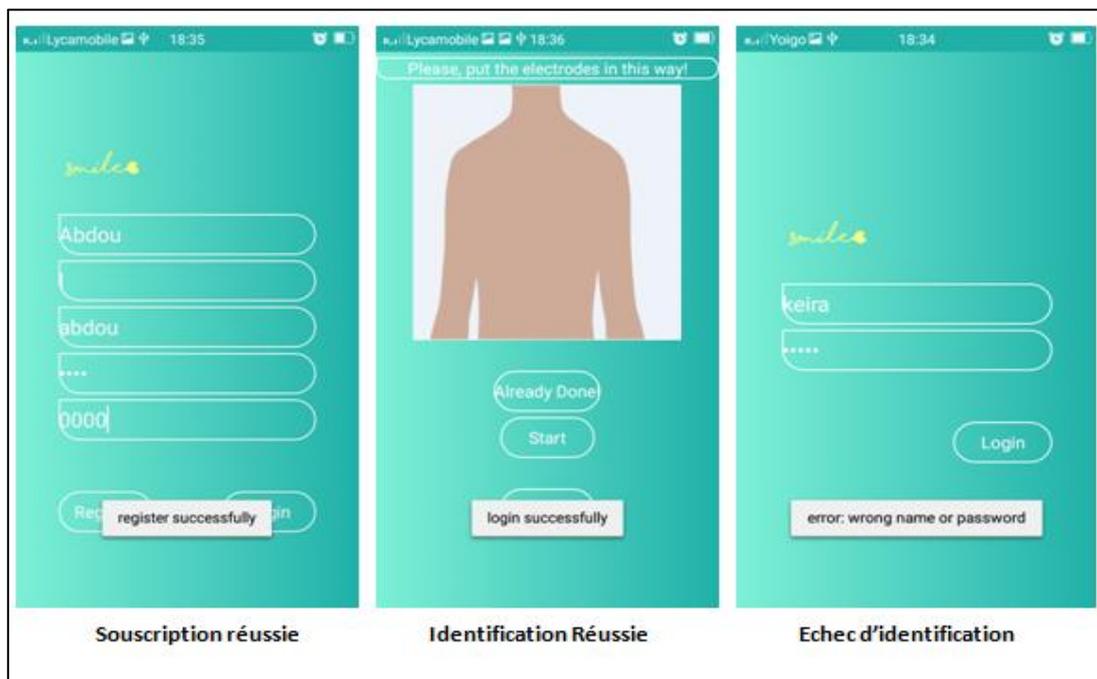


FIG. I.4 - Identification et authentification.

- Un écran d'animation pour aider l'utilisateur à placer les électrodes convenablement est composé de trois figures affichées successivement pour un délai de 3s, 6s et 9s (Voir FIG. I.5). Ces périodes d'affichage sont choisies plus au moins longues (par rapport à des fractions de secondes pour les étapes suivantes de l'application) afin de donner à l'utilisateur le temps

suffisant pour bien placer l'appareil de mesure en question, vu la difficulté constatée lors de cette première étape primordial au fonctionnement de la totalité du mécanisme proposé.

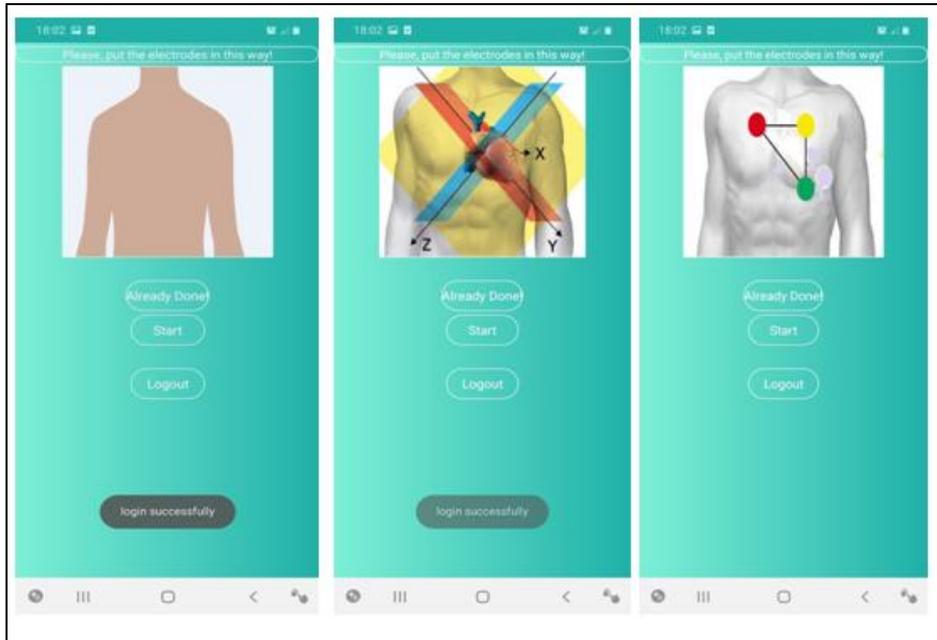


FIG. I.5 - Animations et guide pour un emplacement correct des électrodes.

- Dans le cas où les électrodes sont déjà bien placés, le patient peut accéder à l'étape suivante en cliquant sur le bouton "Already Done" (déjà fait). Ce bouton en plus du bouton "Start" ou (commencer) donne accès à l'étape suivante de l'établissement de la connexion entre le capteur et l'application (Voir FIG. I.6). Ce mécanisme de Bluetooth permet la recherche et le pairage du Smartphone avec le prototype proposé (Voir FIG. I.7).

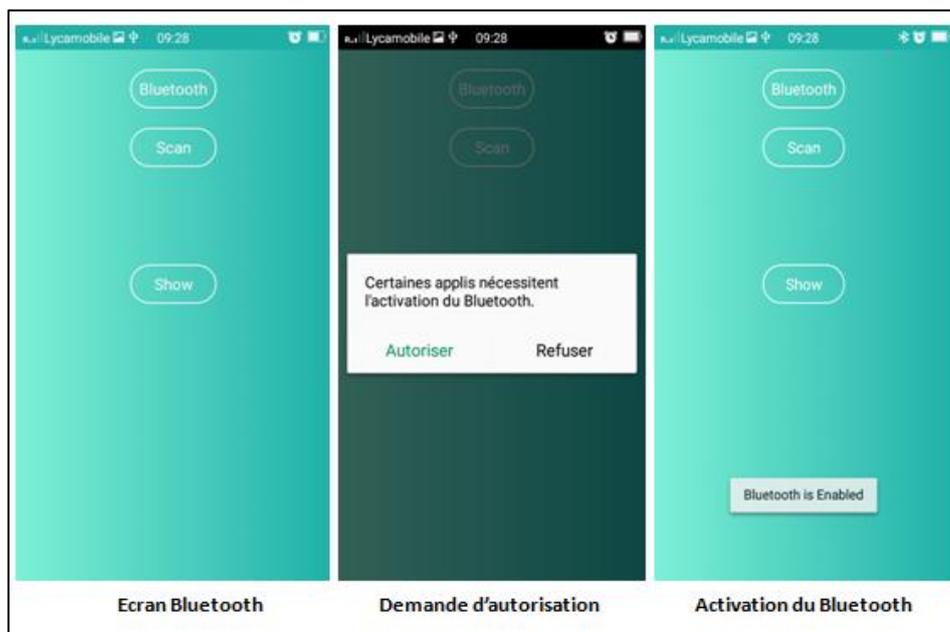


FIG. I.6 - Activation du Bluetooth.

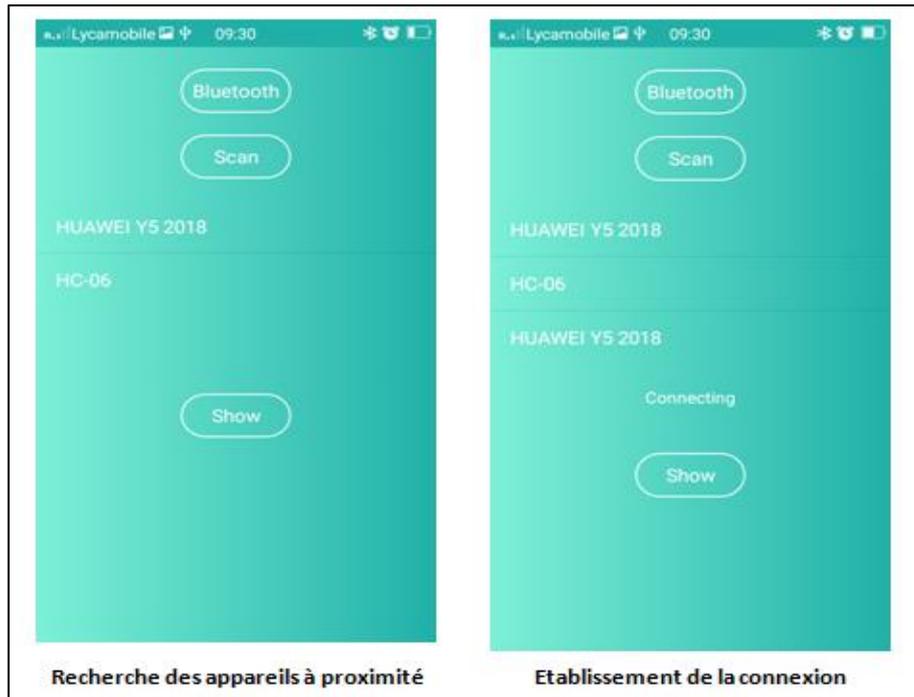


FIG. I.7 - Etablissement de la connexion entre l'application et le prototype (HC-06).

- L'ECG reçu est ensuite affiché sur le Smartphone en temps réel (même temps de son affichage sur l'appareil) (Voir **FIG. I.8**).



FIG. I.8 - Affichage du signal ECG.

- A la condition d'un emplacement des électrodes bien ajusté, le signal ECG affiché est bien précis. Une comparaison pratique est établie entre le signal donné par l'application proposée et celui donné par un appareil médical de haute résolution (Holter AFT-1000 et son logiciel QuickReader version 2.01). Les données sont collectées au près d'une personne saine. Les résultats sont pratiquement très similaires, la lecture est en continu et l'interprétation est au même temps de la lecture (Voir **FIG. I.9**).

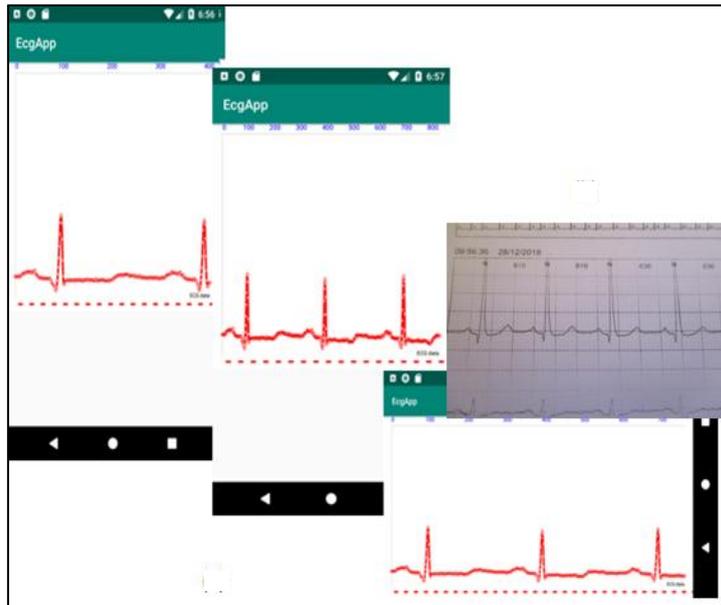


FIG. I.9 - Comparaison entre l'affichage de l'ECG par **SMILE** et celui par un Holter ECG.

- Au même temps de cet affichage, les données ECG sont envoyées via le Cloud, enregistrées sur la mémoire interne du Smartphone et également sur la carte SD de l'appareil. Une telle procédure de stockage sur trois endroits simultanément permet une bonne préservation des données médicales, en plus d'une grande accessibilité.
- Une analyse des données détectées est immédiatement effectuée par l'application mobile. Les résultats du modèle de classification sont affichés en pourcentage. Le pourcentage le plus élevé correspond à la classe ou l'anomalie la plus convenable (Voir Fig. I.10).

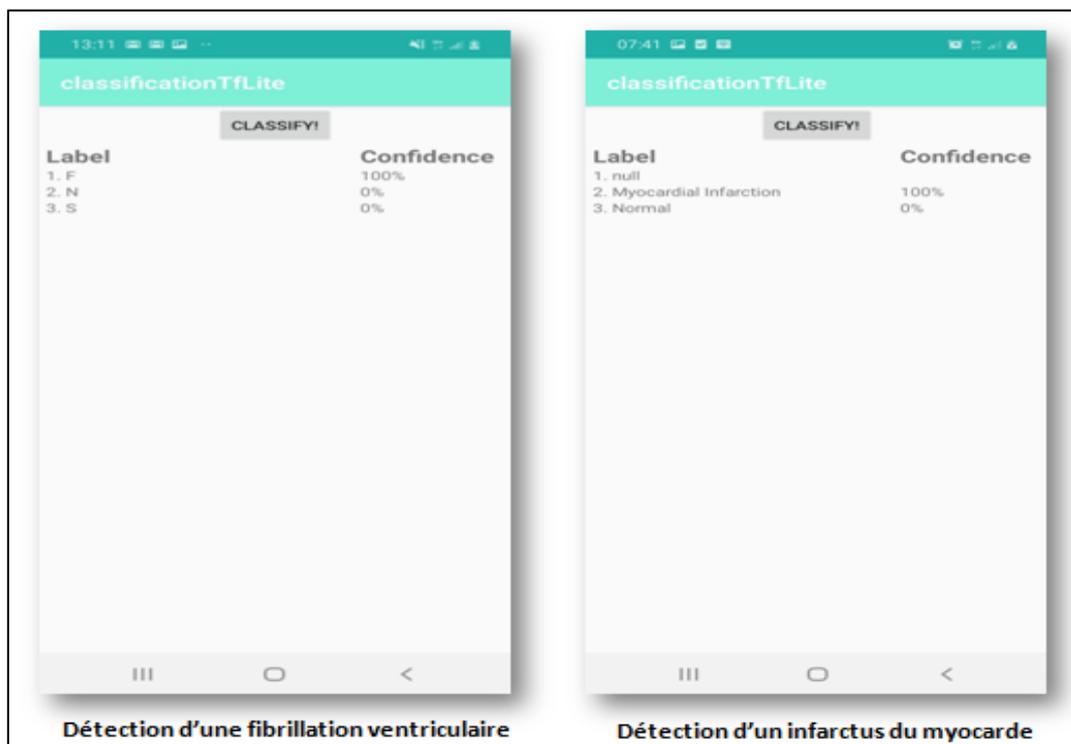


FIG. I.10 - Exemples de détection des anomalies par le modèle proposé, intégré à l'application mobile.

- A la place d'afficher les résultats de la façon précédente, des notifications sous forme des phrases bien écrites (suivant les recommandations des spécialistes) informent le patient sur son cas actuel, à l'aide d'un langage souple et facile.
- Ces résultats et diagnostics sont aussi envoyés au Cloud en temps réel pour être consultés et validés par le spécialiste.
- En cas d'une anomalie, les alertes SMS au médecin et au proche du patient sont aussi envoyées au même temps.

L'option de géo-localisation automatique ajoutée à notre système a prouvé sa grande efficacité. Cette dernière est bien vérifiée en terme du calcul de l'adresse du patient. Les adresses générées sont dans la majorité des cas justes et exactes. Le seul cas échéant est rencontré lors de calcul de l'adresse dans un lieu non déterminé par le GPS (non enregistré sur le GoogleMap). Pour ce cas très rarement rencontré, l'adresse contient seulement la commune et le pays et non pas le numéro exacte de la rue détecté dans la majorité des cas ordinaires. De même, Cette option a enregistré des records en terme du temps compté entre les différentes étapes du calcul, de la génération, de l'envoi et de la réception de l'adresse du patient. Ces résultats très intéressants sont en temps réel (Voir FIG. I.11).

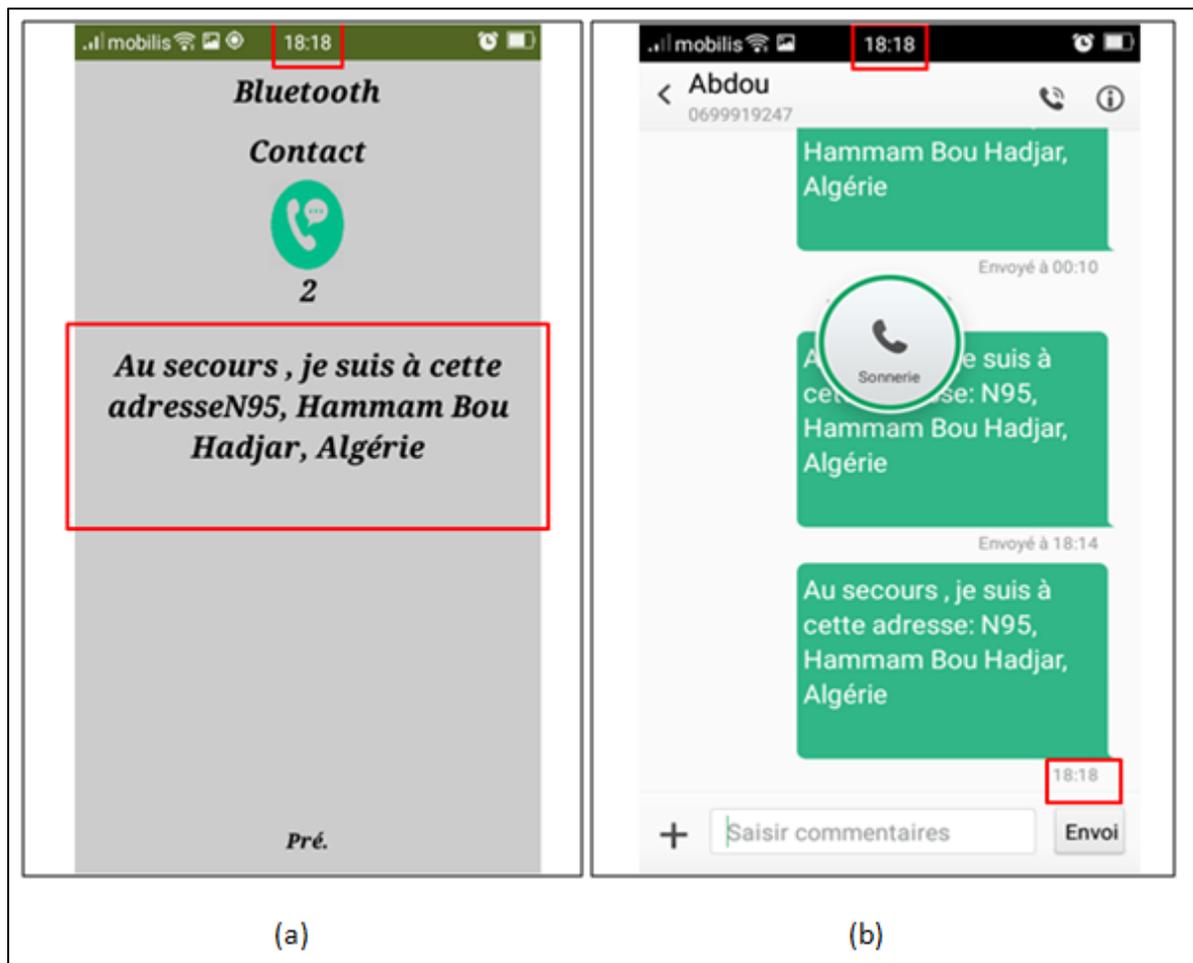


FIG. I.11 - Résultats de géo-localisation.

(a) Calcul et affichage de la localisation du patient. (b) Réception du message par le proche.

- Néanmoins, le fait que le patient doit s'appuyer sur le bouton (en vert sur **FIG. I.11**) pour déclencher ce mécanisme de géo-localisation reste à améliorer pour donner plus d'intelligence à ces alertes. Ce mécanisme peut être automatiquement déclenché dans le cas d'une urgence détectée lors de la classification des données. De même, le message d'alerte envoyé contenant cette anomalie peut contenir de plus l'adresse pour faciliter l'accès immédiat aux urgences. Cependant, notre choix du premier mécanisme est jugé privilégié aux utilisateurs qui ne supportent pas le partage de leur adresse sans demander leur autorisation.

Les résultats exprimés dans les parties précédentes ont prouvé leur grande efficacité, précision, fiabilité et intelligence remarquable. L'harmonisation entre les différentes parties de la plateforme et l'exécution simultanée et en temps réel des mécanismes proposés engendre une très grande efficacité aux urgences et aux actes médicaux responsables à la survie des patients. Toutefois, nos imaginations ne s'arrêtent pas à ce point. Il nous reste beaucoup d'idées innovantes à concrétiser, notamment au niveau de la gestion des préférences des utilisateurs et la simplicité des étapes introduites pour faciliter de plus leur interaction avec **SMILE**.

I.2 - Validation

A ce niveau, notre solution est enfin complète, les services envisagés sont déjà établis, et les buts visés sont largement atteints. Toutefois, nos avis peuvent être subjectifs, favorisant nos travaux personnels. Pour cela et pour donner de l'objectivité à nos discussions, nos jugements et évaluations, une dernière étape de mesure de fiabilité de notre plateforme et de satisfaction des utilisateurs de nos services est indispensable. Dans ce but, des démarches de validation de **SMILE** par des méthodes innovantes sont utilisées dans la partie suivante.

I.2.1 - Validation technique

Cette étape de validation technique touche pratiquement les parties intégrées dans notre plateforme **SMILE** (les algorithmes de décision et les applications mobiles). Elle a pour but principal l'évaluation des performances techniques de ces parties (précision, taux d'erreur, délai d'exécution, fonctionnement, adaptation et interopérabilité).

I.2.1.1 - Validation du modèle de classification

Pour la validation technique des algorithmes de classification de notre solution, une comparaison entre les performances théoriques du modèle d'inspiration [132] (reproduit sur PC) et celles du modèle proposé (amélioré) durant son développement initial sur PC (avec les caractéristiques de CPU en plus de celles de l'environnement virtuel utilisé pour augmenter la capacité graphique) et son déploiement réel sur le Smartphone (caractéristiques du terminal mobile) est détaillée dans le tableau **TAB. I.1** (Voir **Chapitre I** de la **Deuxième Partie**). Le terme "*Precision*" ici a une formule différente de celle de "*Accuracy*" (Voir **Annexe A**).

	Precision (sur MIT-BIH)	Accuracy (sur PTB-DB)	Loss (sur MIT-BIH)	Loss (sur PTB-DB)
Modèle inspirant	96,4%	95,9%	2%	-
Modèle proposé sur PC	97,1%	99%	1,7%	1%
Modèle intégré dans le Mobile	97,1%	99,3%	1,7%	0,3%

TAB. I.1 – Comparaison entre les modèles de littérature et ceux proposés.

Cette comparaison a prouvé une bonne qualité des décisions générées par notre modèle de classification proposé. De même, cette performance encourageante est toujours maintenue lors du déploiement réel sur un Smartphone doté d'un système d'exploitation Android, d'une version supérieure ou égale à 5.0 (Lollipop, API 21). La possibilité d'avoir un tel fonctionnement sur d'autres systèmes d'exploitation est également très favorable grâce à la particularité "Cross-Platform" de ce modèle conçu sous Tensorflow [144] et converti en Tensorflow Lite pour une version plus légère de taille de seulement 231 Ko. Ce modèle est entraîné sur des données ayant des formats variés (".csv", ".txt", ".hea", et ".dat"), ce qui augmente la possibilité de son intégration et de même son interopérabilité avec une large gamme d'appareils et de systèmes médicaux.

I.2.1.2 - Validation des applications mobiles

A leur tour, les applications mobiles conçues sous Android Studio peuvent communiquer avec n'importe quel appareil ECG, à la seule condition qu'il soit doté d'un module Bluetooth. L'exécution des différentes fonctionnalités (transmission des données par Bluetooth, analyses et décisions médicales sur Smartphone, partage des mesures via le Cloud et envoi des SMS d'alertes) est établie en temps réel avec des délais très courts. Le stockage des applications dans l'espace interne de mobile est égale à 2,73 Mo. De plus, la version minimale de l'API choisie pour cette partie est API 21, ce qui offre une couverture de 94.1% des terminaux mobiles Android offerts sur le marché actuel [141]. La possibilité d'étendre ce pourcentage est également grande grâce à la méthode "AppCompatibility" de l'environnement de développement [141]. De même et grâce aux outils de compatibilité introduit par "Flutter" (le nouveau produit de Google) [146], ces applications mobiles auront la chance d'être émerger vers Apple sans codage additif.

I.2.2 - Validation clinique et certification

Cette phase de réglementation des solutions technologiques appliquées dans le domaine de la santé comporte tous genre de produits techniques, hardware ou software, ayant une définition approuvée d'un équipement médical [147]. Cette définition est vérifiée par le diagramme conditionnel posé par les autorités législatives mondiales reconnues comme celle nommée "Medicines and Healthcare products Regulatory Agency (MHRA)" [147] (Voir Fig. I.12).

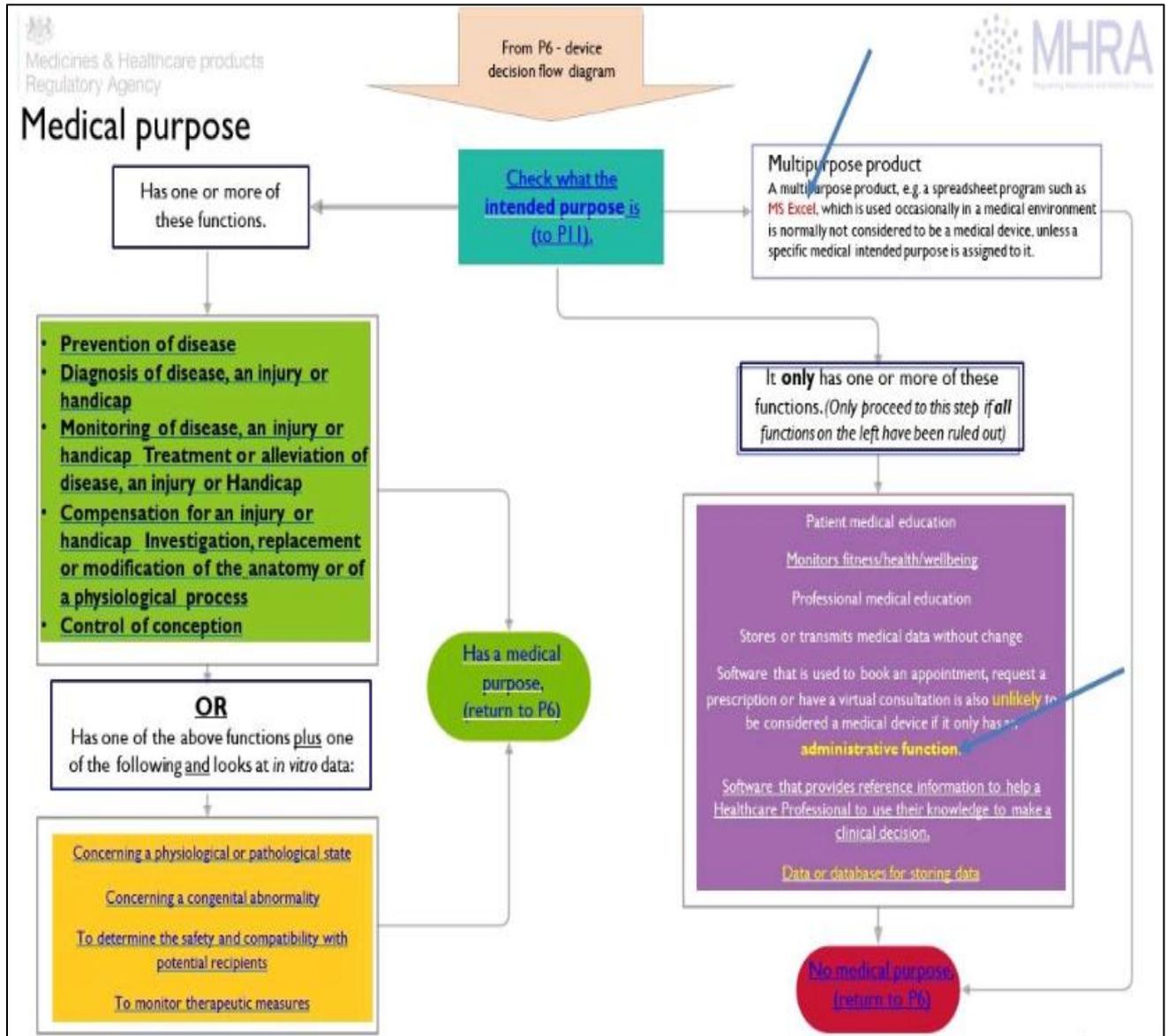


FIG. I.12 - Diagramme d'identification des logiciels médicaux posé par la MHRA [147].

Pour ces équipements, une étape d'évaluation de la qualité du produit est recommandé au près des commissions spécialisées, tel que celle nommée "Care Quality Commission (CQC)" [148]. Cette dernière a pour rôle principal la vérification et la validation des différents critères discutés dans le tableau TAB. I.2. Ce tableau mesure la présence de ces critères dans SMILE avec l'aide des experts de santé (avis du cardiologue) et explique les démarches suivies par cette plateforme pour les atteindre.

Critère	Validation pour SMILE	Comment?
Satisfaction	✓	-Design centré sur les patients. -Adaptation des services selon les préférences, les besoins et les profils des utilisateurs.
Stabilité	✓	-Bon fonctionnement de la majorité des options, reste quelques améliorations envisagées.

Base scientifique	✓	-Large étude bibliographique des domaines concernés. -Etat de l'art étendu des technologies intégrées.
Sûreté clinique	✓	-Très haute précision des décisions médicales. -Pas de risques sur la santé.
Confidentialité	✓	-Capture et transmission des données d'une façon privée (pour chaque utilisateur). -Utilisation des requêtes pour confirmer le consentement des utilisateurs durant chaque étape de traitement des données personnelles.
Sécurité	✓	-Authentification et Login. -stockage sur appareil et mobile personnels, en plus d'un troisième stockage sécurisé sur le Cloud. -Protocoles de communication sécurisés.
Accessibilité	✓	-Simplicité de l'usage pour les personnes âgées et/ou à connaissances technologiques limitées. -Adaptation des services aux exigences des personnes avec des problèmes de vision, handicapés ou défavorisés.
Informative	✓	-Illustrations graphiques pour faciliter l'usage de l'appareil médical. -Des instructions pour guider les utilisateurs. -Harmonisation entre les différentes parties de la plateforme.
Interopérabilité	✓	-Possibilité de l'intégration de logiciel de classification dans la majorité des appareils médicaux disponible actuellement et dans plusieurs systèmes d'exploitation Desktop et mobiles comme: Windows, Linux, Android et iOS. -Possibilité de l'insertion du prototype matériel et des applications mobiles ensemble ou séparément dans d'autres systèmes déjà produits.

TAB. I.2 – Validation des critères cliniques imposés par la CQC.

Une variété des normes IEEE, des certifications ISO [149] et des recommandations des professionnels de santé sont ensuite approuvées pour une validation clinique complète (Voir **Annexe C**). Cependant

ces étapes de réglementation et de normalisation sont encore en progression et ne sont pas encore adaptés dans plusieurs pays, y compris l'Algérie (Voir **FIG. I.13**).

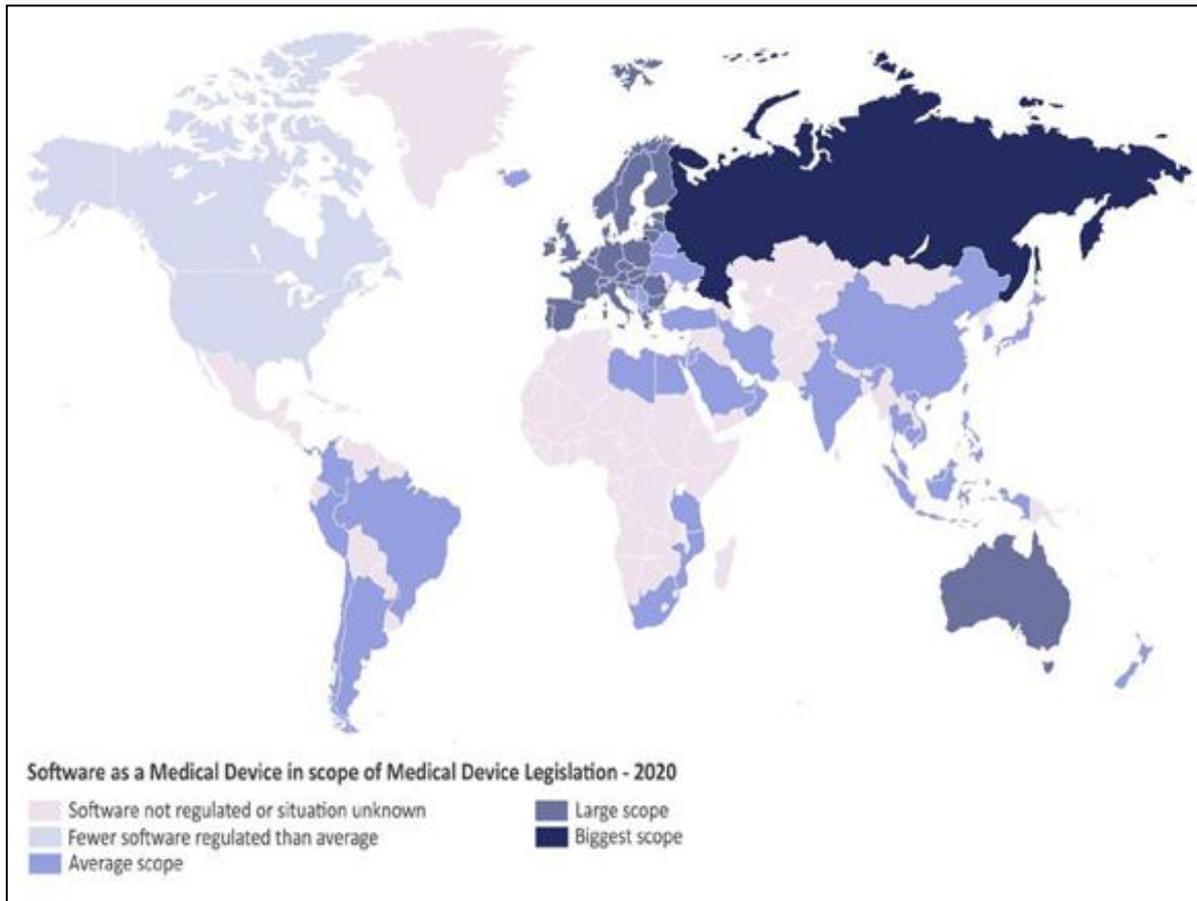


FIG. I.13 - Etat actuel de la législation des logiciels médicaux au monde [149].

De même, il faut noter que ces étapes importantes de validation sont spécialement conçues pour garantir une meilleure qualité des produits de santé destinés à être commercialisés (en contact direct avec les utilisateurs) [149]. Chose qui n'a pas le même degré d'importance pour notre solution destinée à la recherche scientifique. Toutefois, et d'après les résultats primaires favorables de ces validations, notre plateforme **SMILE** peut être considérée comme un appui solide et une inspiration forte à ce genre de produits commercialisables.

I.2.3 - Validation communautaire

Pour valider de plus la fiabilité de **SMILE**, un questionnaire public est mis en place, au près des communautés différentes [150]. Ce formulaire numérique d'un total de 17 questions est établi à l'aide de "GoogleForms" et distribué via les réseaux sociaux. Ces questions relèvent au début des informations personnelles des participants, comme la nationalité, l'âge, le rôle dans l'écosystème de santé publique (patient, professionnel de santé, ou proche d'un patient), sans prendre en considération l'identité pour préserver l'aspect anonyme des interlocuteurs. Il mesure par la suite le degré d'adoption et de familiarisation des participants avec les nouvelles tendances technologiques en général, leur déploiement au sein du secteur médical, des maladies chroniques et plus

précisément des maladies cardiovasculaires. Les nationalités des participants sont très variées, y compris l'Algérie avec le plus grand pourcentage de 18.8% (Voir **Fig. I.14**).

Copie de Formulaire sans titre (réponses)								
A	B	C	D	E	F	G	H	
1	Horodateur	What is your nationality?	What is your age? عمرك	Are you suffering from a c	Is it a cardiovascular dise	Are you a healthcare prof	If yes, please specify	هل أنت قريب من حالة مرض مزمن
	03/07/2020 11:01:27	Algerian	28	No/لا	No/لا	No/لا	/	نعم /Yes
4	06/07/2020 09:55:49	german	35	No/لا	No/لا	Yes/نعم	health economic	No/لا
5	06/07/2020 18:12:08	Canadian	55	Yes/نعم	No/لا	No/لا	n/a	نعم /Yes
6	06/07/2020 22:18:18	Nigeria	32	No/لا	No/لا	Yes/نعم	Occupational health and s	No/لا
7	08/07/2020 12:06:04	Bulgarian	22	No/لا	No/لا	No/لا	Nope	نعم /Yes
8	08/07/2020 15:26:51	India	20	No/لا	No/لا	No/لا	NA	No/لا
9	08/07/2020 19:48:39	Tunisian	40	No/لا	No/لا	Yes/نعم	PHYSICIAN	نعم /Yes
10	09/07/2020 21:13:22	Bulgarian	22	No/لا	No/لا	No/لا	Nope	نعم /Yes
11	13/07/2020 14:05:36	American	21	No/لا	No/لا	No/لا	n/a	نعم /Yes
12	13/07/2020 15:27:16	German	40	No/لا	No/لا	No/لا	Not a healthcare professi	No/لا
13	13/07/2020 16:32:27	Algerian	22	No/لا	No/لا	No/لا	N/A	نعم /Yes
14	13/07/2020 16:50:46	Algerian	23	No/لا	No/لا	No/لا	No	نعم /Yes
15	13/07/2020 21:58:14	Korean	26	No/لا	No/لا	No/لا	N/A	No/لا
16	14/07/2020 14:28:09	Indian	39	No/لا	No/لا	No/لا	no	No/لا
17	01/08/2020 01:15:15	United States	52	Yes/نعم	Yes/نعم	No/لا	N/A	نعم /Yes

FIG. I.14 - Fichier des informations liés au questionnaire délivré.

Ces participants expriment une grande adoption de ces nouvelles technologies (Voir **Fig. I.15**).

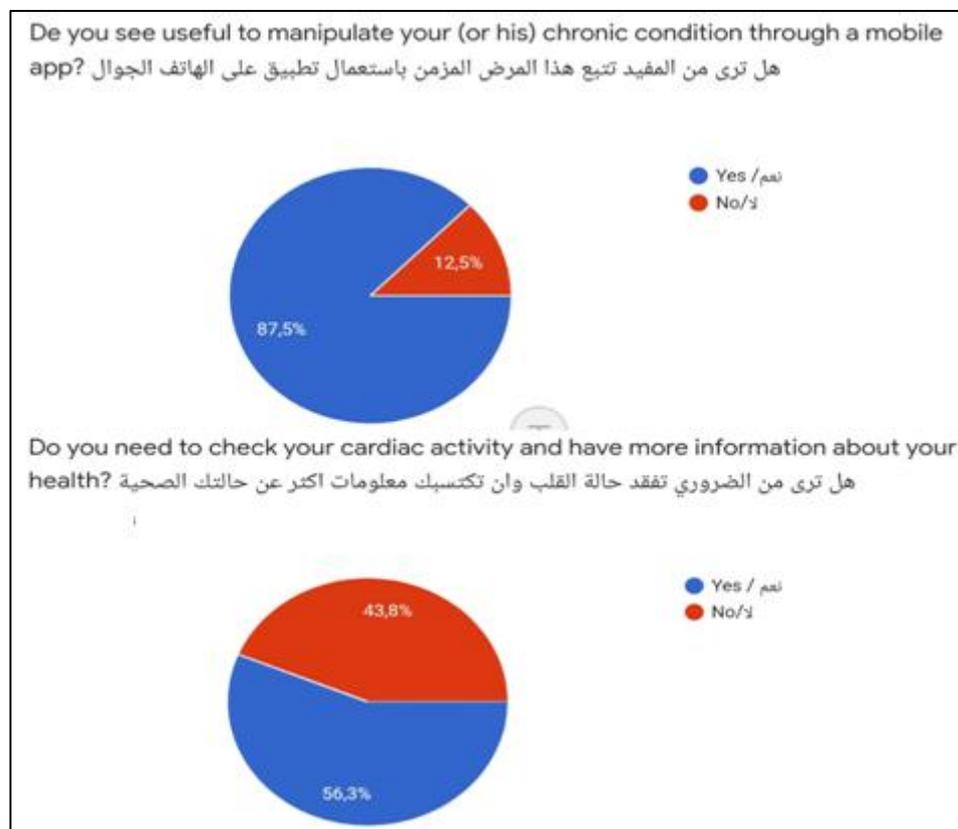


FIG. I.15 - Pourcentage d'adoption communautaire des technologies de M-health.

Ils trouvent que ces solutions M-health peuvent résoudre une large gamme de problèmes rencontrés actuellement (Voir FIG. I.16), surtout dans un temps d'une pandémie pareille à celle de ces jours. La nécessité de mettre en place des solutions digitales innovantes est le point commun des réponses de ces profils venant des origines différentes.

What are other difficulties you often encounter? ما هي الصعوبات التي تواجهك عادة؟

Mostly not being able to go to the doctor in time.

Not for chronic conditions, but for other problems when I need a doc, it is difficult to get appointment for getting tests done. They regarded my problem as not-a-matter-of-life-and-death, so can/should wait.

Several since having covid as we are long haulers and have continued to feel ran down. Although infected in early April we are both still battling issues we did not see prior to that time.

Availability of doctor to call

The problems not only during the pandemic but even outside the pandemic:

1. The distance the doctor if far from town
2. even with an appointment there is too much patients in waiting room which is not good for people with cardiac problems sometimes they have to wait for several hours
3. sometimes you only need to check up (renew the treatment) you don't need to go to see the doctor he only performs a quick check up but yet you have to go there and wait and at the end the patient is more tired because of his cardiac issues
4. difficulty to reach the doctor in case of emergency
5. And especially during the pandemic for elder people who suffer of cardiac issues and other chronic diseases it is dangerous for them to go outside and even waiting for hours in a waiting room with other patients

FIG. I.16 - Exemples des difficultés rencontrées par les participants.

D'une autre part et malgré cette acceptabilité remarquable, une inquiétude partielle est exprimée dans les réponses concernant le partage des données personnelles via le Cloud (Voir FIG. I.17 et FIG. I.18).

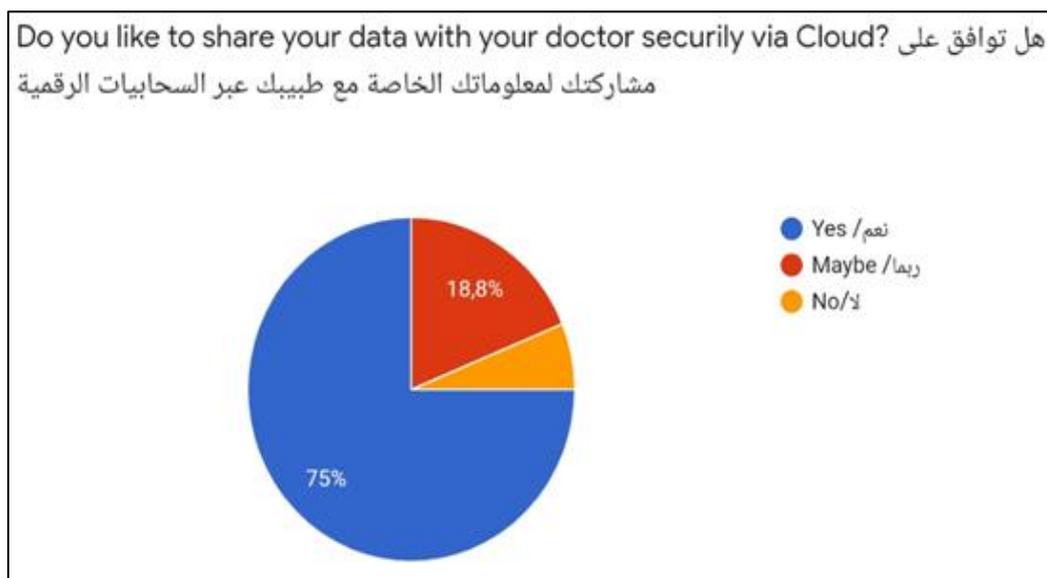


FIG. I.17 - Pourcentage d'adoption d'une technologie basée sur le Cloud.

We can always do better.
It's a very nice job, as Dr Atul said If medicine is to achieve more gain that Information Technology will go along way in impacting on it, importantly quality and Safety of the patient.
Thanks for the opportunity given to be part of your study.

For the advanced technoogy as long as it is not invasive it is i think it will be a great advance
And for the data sharing there must be ethical procedures
and patiants need to know what they are sharing through the cloud + the security it is important

FIG. I.18 - Exemples des inquiétudes sur le partage des données via le Cloud.

Cette étude encourageante reste toujours maintenue pour mesurer cette adoption en continuité et en parallèle aux nouveautés technologiques. Ses résultats sont salutaires, reflétant la grande adoption des solution M-health dans les communautés différentes. Ils sont de même informatifs, donnant des idées claires sur les exigences et les besoins réels des patients et des individus en général.

Cette étude a validé nos hypothèses de départ sur le rôle de la simplicité, de l'efficacité technique et clinique, de l'adaptation, de l'interopérabilité, et de la sensibilité des données aux normes de sécurité dans la production d'une solution M-health fiable et plus admirable.

I.3 - Conclusion

Les résultats finals produits par notre plateforme **SMILE** sont très avantageux, performants et harmonieux. De même, la majorité des critères indispensables à une validation complète sont vérifiés. Quelques autres idées mélioratives et également des perspectives sont présentées dans le chapitre suivant.

Chapitre II

Perfectionnement, améliorations et perspectives

SOMMAIRE

I.1 – Améliorations

I.2 – Perspectives

I.3 – Conclusion

Plusieurs améliorations sont proposées durant ce chapitre. Des technologies très avancées dites de "Gamification" sont exploitées pour donner naissance à une version plus innovante de **SMILE**. Un prototype primaire d'un assistant intelligent sous forme d'un Chatbot est également fourni. De nombreuses perspectives sont ainsi exposées pour offrir un coup d'inspiration aux nouvelles études maintenues dans ce domaine.

II.1 - Améliorations

D'après les évaluations précédentes et malgré toutes les performances encourageantes, notre solution **SMILE** peut être encore plus améliorée pour mieux répondre aux besoins exigeants de la communauté des patients chroniques et du personnel soignant. Le premier point radical réside sur la difficulté mesurée lors de l'emplacement des électrodes par les patients ou par des personnes non-formés au préalable. Cette difficulté influence la précision du capteur médical, et par conséquent les données manipulées par la totalité de la plateforme. Le deuxième point important représente les difficultés connues par les patients âgés, souffrant des autres maladies chroniques, des autres insuffisances, des problèmes de vision, ou n'ayant pas les capacités intellectuelles suffisantes pour manipuler ce genre de technologies très avancées. Pour cela et afin de perfectionner encore plus notre solution, deux approches majeures sont proposées. La première réside sur la méthode appelée "Gamification" et la deuxième s'articule autour des assistants intelligents "Chatbots". Ces deux méthodes répondent à ces deux problèmes majeurs respectivement.

II.1.1 - Technique de "Gamification"

Cette méthode est inspirée du terme anglais "Game", ce qui signifie la réalisation des jeux, communément connus par le terme "jeux sérieux" [151]. L'objet principal de cette technique est de rendre les choses plus ludiques, pour quelles soit plus proches aux utilisateurs, en incitant leurs émotions d'engagement et d'amusement [151].

En pratique, cette technique consiste à transformer une scène réelle sous forme d'un jeu, pour des fins d'apprentissage (comme par exemple : les jeux sérieux indiquant aux étudiants les étapes à suivre pour la réalisation d'un projet pratique), ou bien pour des fins de Marketing, de sport ou encore de santé [151].

Dans notre cas, nous allons essayer de réaliser une autre version de **SMILE**. cette version sera plus ludique, proposant des scènes de jeux spécifiques. Notre but principal est d'augmenter le degré de satisfaction des utilisateurs avec une facilité d'usage plus augmentée. Cela peut être mesurer par l'analyse des Feedbacks générés à la fin des interactions des utilisateurs avec nos jeux sérieux.

II.1.1.1 - Approche pour seniors

Cette version de l'application principale Patient facilite l'emplacement des électrodes par l'intégration des composants interactifs à son écran principal. Tout d'abord et après avoir accéder à l'application via l'identification, le patient (ou son proche, dans les cas les plus sévères) doit suivre les étapes nécessaires à ce mécanisme. Chaque électrode est représenté par un bouton de même couleur originale (rouge, vert et jaune) (Voir **Fig. II.1**). Si l'emplacement des électrodes est correct, les boutons vont être allumés, le score (calibre) va être augmenté et le patient commence à recevoir ses propres données ECG. Cette scène est réalisée logiquement en arrière plan par la mesure des données reçues de l'appareil. Si ces dernières sont négatives ou égales à zéro, l'emplacement est inversé ou erroné, respectivement. De la même façon, si ces données sont positives, le patient est jugé réussi et peut passer aux autres niveaux du jeu. Cette approche interactive ne s'arrête pas à ce niveau, à chaque fois le patient suit une notification, en cochant la cage adjacente au texte introduit, son score s'accroît. Par conséquent, il se retrouve avec un esprit de challenge, plus confortable, en acceptant cette technologie et en admirant l'expérience introduite par cette plateforme. Ces facteurs amusants affectent l'état psychologique du patient, et peuvent par conséquent contribuer à faciliter sa prise en charge et de même à accélérer son rétablissement [151].

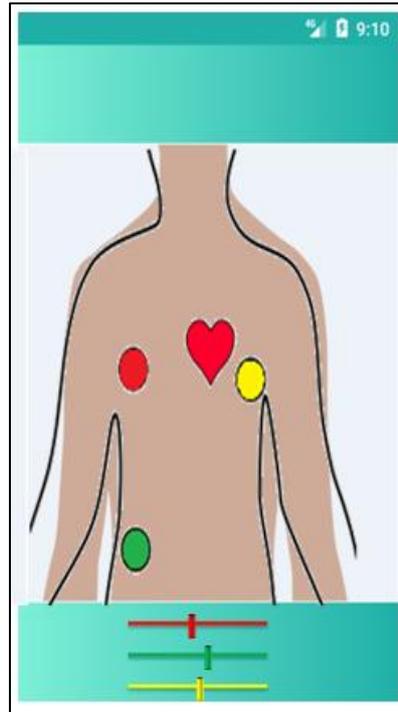


FIG. II.1 - Prototype initial de Gamification de l'emplacement des électrodes.

II.1.1.2 - Approche pour juniors

La deuxième version ludique de notre application principale est beaucoup plus animée pour inciter encore plus les utilisateurs, en proposant un jeu en 2D très amusant. Ce jeu est composé d'une scène constituée de deux principaux acteurs : un oiseau et un chat (Voir FIG. II.2). L'oiseau se trouve initialement sur un rameau. Une clé est placée au milieu de cette scène. A chaque fois l'utilisateur se rapproche à placer les électrodes correctement, cette clé se rapproche de la cage pour libérer l'oiseau. Elle se rapproche également du chat dans le cas contraire (emplacement erroné).



FIG. II.2 - Prototype initial de la scène du jeu proposé.

Si l'emplacement est très bien établi, la cage s'ouvre et l'oiseau se libère finalement pour symboliser la victoire de l'utilisateur et son passage aux autres étapes de l'application. Si le délai dédié à cet emplacement est terminé sans aboutir à la cage, le chat récupère la clé pour chasser l'oiseau. C'est donc la défaite de l'utilisateur et la réinitialisation de cette scène ludique.

Cette version du jeu en cours d'amélioration (Voir **Fig. II.3**) est proposée spécialement pour les patients moins âgés, enfants ou adolescents. Elle peut les encourager à oublier leurs douleurs, à admirer de plus leur expérience thérapeutique et à s'engager remarquablement à leur propre prise en charge médicale [151].

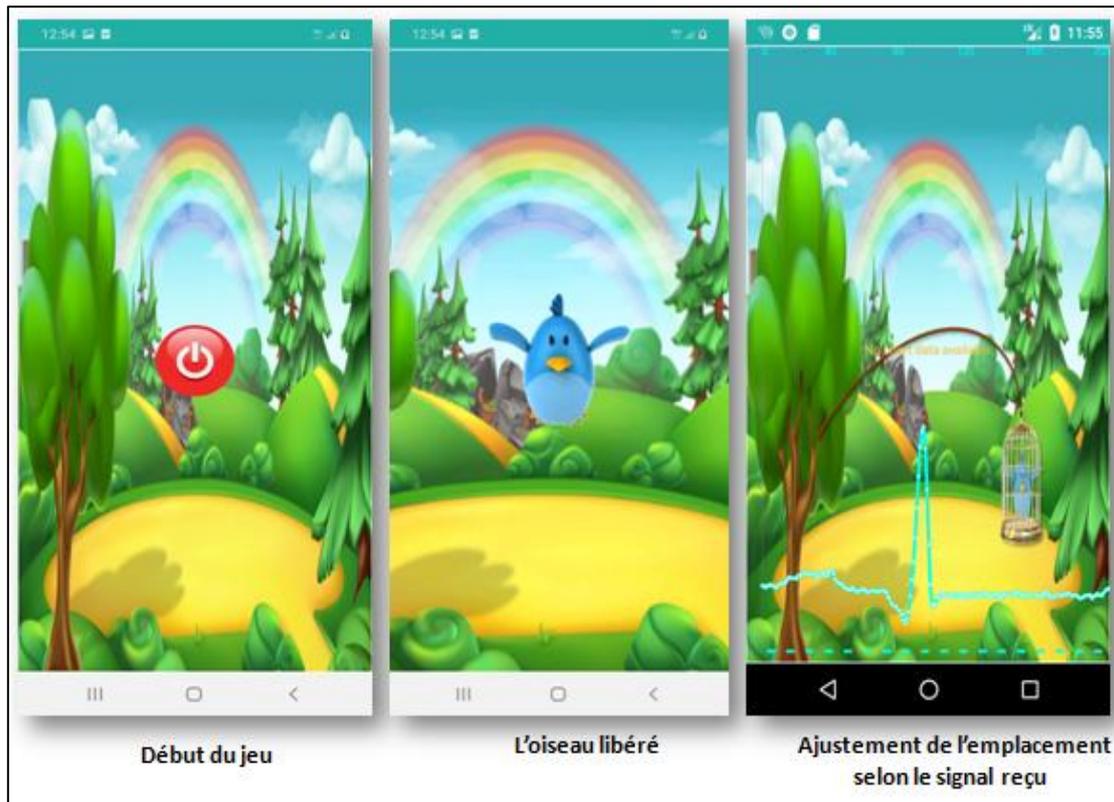


FIG. II.3 - Ecrans initiaux du jeu proposé.

II.1.2 - Assistance vocale intelligente

Pour faciliter encore plus l'usage des fonctionnalités proposées par **SMILE**, une amélioration de l'interface des applications mobiles est établie. Cette amélioration est composée des options avancées de lecture vocale des notifications et d'assistance intelligente pour aider les personnes âgées, trouvant des difficultés à manipuler le Smartphone manuellement. Ces personnes peuvent avoir des difficultés linguistiques, intellectuelles, ou encore des problèmes de vision. La voix est donc la solution la plus optimale, vu qu'elle est plus proche que l'interaction visuelle pour certains patients. Par conséquent, l'intégration des options similaires réduit remarquablement la complexité de l'accès aux services fournis [152].

Cette assistance vocale est basée principalement sur des algorithmes intelligents de traitement et de manipulation des données présentées sous forme des textes en langage humain. Ces algorithmes connus par "Natural Language Processing" ou "NLP" [152] sont détaillés dans les sections suivantes décrivant ces options vocales intégrées.

II.1.2.1 - Notifications vocales

Les mécanismes de base de la lecture vocale des textes écrits sur l'écran d'une application mobile sont possibles sous Android Studio à l'aide de la classe "TextToSpeech" [141]. La détection et le choix de la langue utilisée est également disponible via des fonctions spécifiques. La méthode "speak" est ensuite responsable de la lecture du texte en question [141]. Ces outils et autres sont offerts par Android pour permettre une intégration réalisable de ces fonctionnalités avancées.

Notre démarche d'implémentation de ces mécanismes est consacrée à la lecture des notifications et des alertes générées par notre algorithme de base ; y compris celles destinées aux patients sous forme des "Pop-up Notifications" et celles envoyées aux médecins sous forme des SMS.

II.1.2.2 - Téléassistance par "Chatbot "

Notre but essentiel est d'enrichir notre système par un mécanisme conversationnel permanent, permettant de faciliter l'accessibilité aux services proposés par **SMILE**. A l'aide uniquement de sa voix, le patient peut dans ce cas de suivre son état de santé, contacter son thérapeute, connaître ce qu'il doit faire et déclencher des alertes en cas d'urgence. Ces opérations intelligentes sont basées sur des algorithmes de NLP sur Python pour l'entraînement de l'assistant intelligent connu par le terme Chatbot [153]. L'intégration de ce dernier à l'environnement de développement s'établit par le biais de la bibliothèque "Dialogflow", dédiée spécialement aux applications conversationnelles []. La manipulation de ces données est réalisée via "Google Cloud Platform (GCP)" [154]. Ces opérations sont encore en phase d'implémentation vu que cette amélioration n'a pas été ajoutée que récemment à notre solution **SMILE**.

II.2 - Perspectives

L'innovation technologique dans le domaine de la santé est en progression continue émergeant des capacités de plus en plus avancées, intelligentes et puissantes. L'onglet des créations matérielles et de même logicielles ne peut pas connaître des limites dans ce monde évolutif. A son tour, notre solution **SMILE** offre une possibilité de croissance pertinente.

Sur le plan technique, la simplification du circuit proposé permet une miniaturisation de l'appareil de mesure lui même, en plus d'une facilité d'usage encore plus favorable. De même, les applications mobiles peuvent subir une autre démarche d'amélioration en intégrant l'outil de programmation innovant connu par Flutter. Ce nouveau environnement offert par Google permet une compatibilité des produits développés sous Android avec le système iOS [146]. Cette mentalité dite "Cross-platform" peut contribuer à l'inclusion des utilisateurs des deux firmes simultanément et par conséquent augmenter le taux d'accessibilité et de délivrance des services proposés.

Les options intelligentes représentent aussi une autre piste importante pour les nouvelles créations. Une des améliorations envisageables dans ce domaine est la conception d'un assistant médicale ayant la capacité d'interagir avec le patient en arabe. Cette option peut faciliter remarquablement le déploiement de la plateforme par notre communauté Algérienne et Arabe en général.

Une autre perspective intéressante réside sur la volonté d'enrichir notre plateforme **SMILE** par d'autres algorithmes de classification des autres pathologies chroniques. Cette amélioration est indispensable vu la forte possibilité qu'un patient souffrant des problèmes cardiovasculaires peut avoir d'autres maladies chroniques comme le diabète, les maladies neurocognitives, etc.

Cette liste optimiste des perspectives est encore ouverte aux nouvelles idées inspirées par les révolutions technologiques continues.

II.3 - Conclusion

Les avancées technologiques de l'AI et de Gamification offrent une nouvelle vision aux applications médicales. Elles donnent naissance à une nouvelle ère des services médicaux personnalisés et centrés autour du patient, ces besoins et ces différents exigences physiques, mentales et contextuelles. Cette vision innovante représente une inspiration pour améliorer de plus les services proposées par **SMILE**.

Durant cette dernière partie, notre solution **SMILE** a prouvé un degré très élevé de fiabilité médicale, de bon fonctionnement technique, de sûreté clinique et d'adoption communautaire.

Après ces achèvements favorables, notre œuvre abouti à sa clôture, en donnant naissance aux idées créatives et à un nombre important de perspectives ; ayant pour objectif principal l'amélioration de la qualité de vie des patients chroniques.

Références

- [70] Medgeeks, D. Champigny, "How to Read an ECG - Medgeeks", 2020.
<https://medgeeks.co/articles/how-to-read-an-ecg>
- [134] www.arduino.cc, "Arduino - Home", 2020.
<https://www.arduino.cc/>
- [132] M. Kachuee, S. Fazeli and M. Sarrafzadeh, "ECG Heartbeat Classification: A Deep Transferable Representation," *2018 IEEE International Conference on Healthcare Informatics (ICHI)*, New York, NY, pp. 443-444, 2018.
DOI: 10.1109/ICHI.2018.00092.
- [135] cdn-shop.adafruit.com, datasheet, "SSD1306", 2008.
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
- [141] www.android.com, developers "Building anything on Android", 2020.
<https://developer.android.com/>
- [144] www.tensorflow.org, "Avec Tensorflow", 2020.
<https://www.tensorflow.org/?hl=fr>
- [146] www.flutter.dev, "Flutter - Develop Your App With Flutter", 2020.
https://flutter.dev/?gclid=Cj0KCQjwzbv7BRDIARIsAM-A6-OyPTgQDory3kWi_mb0lvBpAe9QC0tSuPs3ISwgbjo7NGJODoQQZXwlaAI-JEALw_wcB&gclsrc=aw.ds
- [147] www.gov.uk, "Medical devices: software applications (apps)", 2004-2020.
<https://www.gov.uk/government/publications/medical-devices-software-applications-apps>
- [148] www.cqc.org.uk, "Care Quality Commission", 2020.
<https://www.cqc.org.uk/>
- [149] www.cocir.org, "COCIR Analysis on AI in medical Device Legislation - September 2020", 2020.
<https://www.cocir.org/media-centre/publications/article/cocir-analysis-on-ai-in-medical-device-legislation-september-2020.html>
- [150] [google.forms](https://forms.google.com), "Adoption of mobile health applications for chronic diseases", 2020.
<https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLScrHskZPTTa6Uk6UZI8zJclfyfNmB3p-gS13jrl-ESWiv4PeQ/viewform>
- [151] S. Tsikinas, S. Xinogalos, "Studying the effects of computer serious games on people with intellectual disabilities or autism spectrum disorder: A systematic literature review", *Journal of Computer Assisted Learning*, vol. 35, no. 1, Sept. 2018.
<https://doi.org/10.1111/jcal.12311>
- [152] K. Yousaf, Z. Mehmood, T. Saba, A. Rehman, M. Rashid, M. Altaf and Z. Shuguang, "A Novel Technique for Speech Recognition and Visualization Based Mobile Application to Support Two-Way Communication between Deaf-Mute and Normal Peoples", *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, Article ID 1013234, 12 pages, 2018.
<https://doi.org/10.1155/2018/1013234>
- [153] R. Kondapi, R. K. Katta, S. Potluri, A. Bathula, S. K. Basha, "Pacifiurr: An android chatbot application for human interaction". *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 7, pp. 101-104, Jan. 2019.
https://www.researchgate.net/publication/332625323_Pacifiurr_An_android_chatbot_application_for_human_interaction
- [154] cloud.google.com, "Documentation Dialogflow : Google Cloud", 2020.
<https://cloud.google.com/dialogflow/docs?hl=fr>

Conclusion Générale

Les capacités énormes des nouvelles technologies émergentes, transmettant les Big Data venant des sources variées et formant des réseaux à très grande échelle (comme celui de l' IoT) ont tous subi une amélioration à fort potentiel par un facteur commun connu par l'AI. Ce facteur radical donne de la saveur d'intelligence à tous domaines confondus.

A son tour, le domaine médical est fortement influencé par ces tendances technologiques, donnant naissance à une large variété d'applications médicales, allant de la E-health à la M-health. Cette application massive touche pratiquement la majorité des disciplines ; y compris la cardiologie, la radiologie, la neurologie ou encore la médecine des urgences.

Cependant, cette variété remarquable des solutions offertes restent dans la majorité des cas insuffisantes. Cette carence est causée généralement par un dilemme de "Simplicité Vs. Fonctionnalité". Ce qui force les développeurs des solutions de choisir entre doter leurs produits par des fonctionnalités techniques riches et innovantes mais difficiles à gérer par les patients, les personnes âgées et les personnes à niveau inférieur de capacités cognitives ou techniques. Dans le cas contraire, simplifier les interfaces d'interaction donne naissance à des limites techniques, des traitements basiques ou également des défaillances majeures de sécurité, d'interopérabilité ou d'adaptation.

Dans un autre côté, les maladies chroniques et surtout cardiovasculaires exigent des critères de surveillance et de suivi en continu, adaptés aux différents besoins des patients et livrés en temps réel pour pouvoir sauver les vies de ces patients en cas d'une urgence susceptible.

Pour cela une solution basée principalement sur les besoins quotidiens de cette catégorie de patients, adaptée aux différents contextes et dotée des technologies innovantes, tout en offrant des fonctionnalités simples à gérer, une grande autonomie et une accessibilité incomparable sera une solution plus optimale et également très favorable.

C'est bien le cas de notre solution proposée **SMILE**, qui représente une plateforme centrée sur le patient chronique souffrant des troubles cardiovasculaires. Elle est composée d'une partie matérielle dotée d'un ECG mobile innovant, permettant la détection et le transfert des données en temps réel à une autre partie logicielle, composée principalement d'une application mobile adaptée aux besoins de ce patient. Cette application est sécurisée, facile à utiliser, très accessible et responsable de la lecture, du traitement intelligent, de la classification des données de l'ECG, de la détection d'un nombre important des anomalies cardiaques et de l'interprétation de ces résultats pertinents à l'aide d'une interface graphique animée, en plus des notifications personnalisées.

En cas d'une anomalie, des alertes automatiques sont envoyées en temps réel au médecin. Ce dernier peut à son tour accéder aux données de son patient par le biais d'une deuxième application mobile. Ce partage des données immédiat et sécurisé via le Cloud a pour but principal de renforcer les décisions algorithmiques initiales par un avis professionnel, qui peut d'une façon plus effective analyser l'ECG du patient, produire la meilleure décision médicale et par conséquent rapidement interagir aux différents cas critiques possiblement rencontrés.

Malgré ces résultats très favorables et encourageants, le domaine de la technologie reste toujours ouvert aux nouvelles perspectives. Dans ce même contexte, des améliorations innovantes de Gamification et de AI sont ajoutées en continu à notre solution **SMILE** pour faciliter son utilisation et de même pouvoir répondre aux différentes problématiques convenablement.

Cette thèse est donc un travail pluridisciplinaire, qui a pour but principal l'amélioration de la QoL des patients chroniques, en déployant les différentes avancées technologiques. Ce déploiement est maintenu d'une façon plus avantageuse, simple, éthique et sécurisée, tout en évitant le côté négatif possiblement engendré par ces technologies et notamment l'AI.

Pour conclure cette œuvre, il est indispensable de noter que la technologie n'est qu'un outil et c'est à nous de choisir la meilleure façon de l'utiliser. Pour cela, il n'y a pas mieux que la déployer pour produire quelque chose de bénéfique à nous même et nos sociétés.

Annexe A

Généralités sur les réseaux de neurones

SOMMAIRE

- A.1 – Evolution des réseaux de neurones
 - A.2 – Architectures principales des réseaux de neurones
 - A.3 – Fonctions mathématiques
-

Cet annexe représente une liste des réseaux de neurones en plus des fonctions mathématiques principales utilisées lors du développement des algorithmes de classification de cette thèse.

A.1 - Evolution des réseaux de neurones

L'exploitation croissante des capacités analytiques des réseaux de neurones a grandement poussé l'évolution rapide de ces derniers et plus précisément le domaine de DL, au cours de ces dernières années [158] (Voir Fig. A.1).

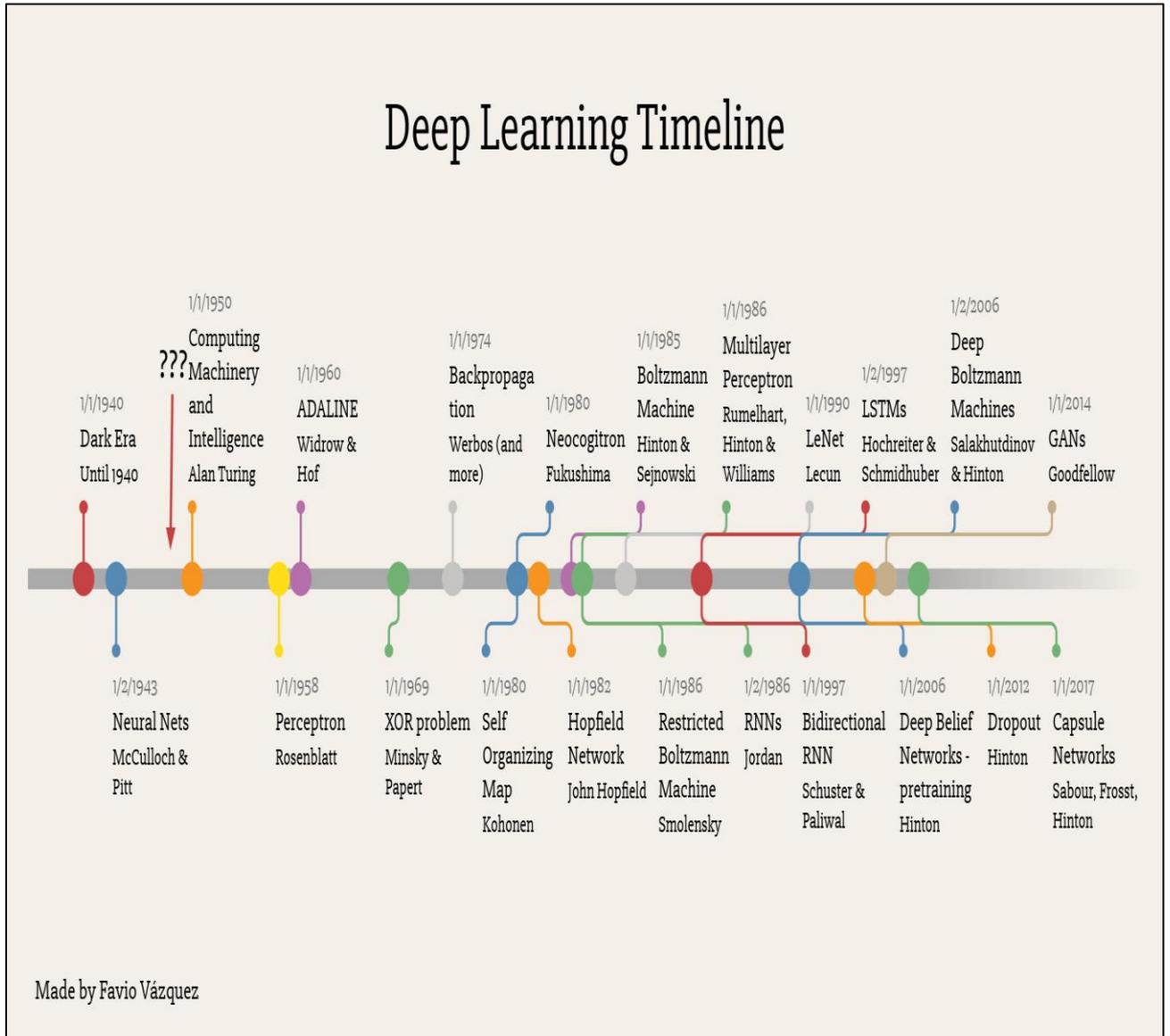


FIG. A.1 - Evolution historique des réseaux de DL [158].

A.2 - Architectures principales des réseaux de neurones

Ces réseaux de base symbolisant le fondement des technologies de ML et de DL représentent une variété d'architectures et de modèles destinée à un nombre important des applications technologiques diverses [155] (Voir Fig. A.2).

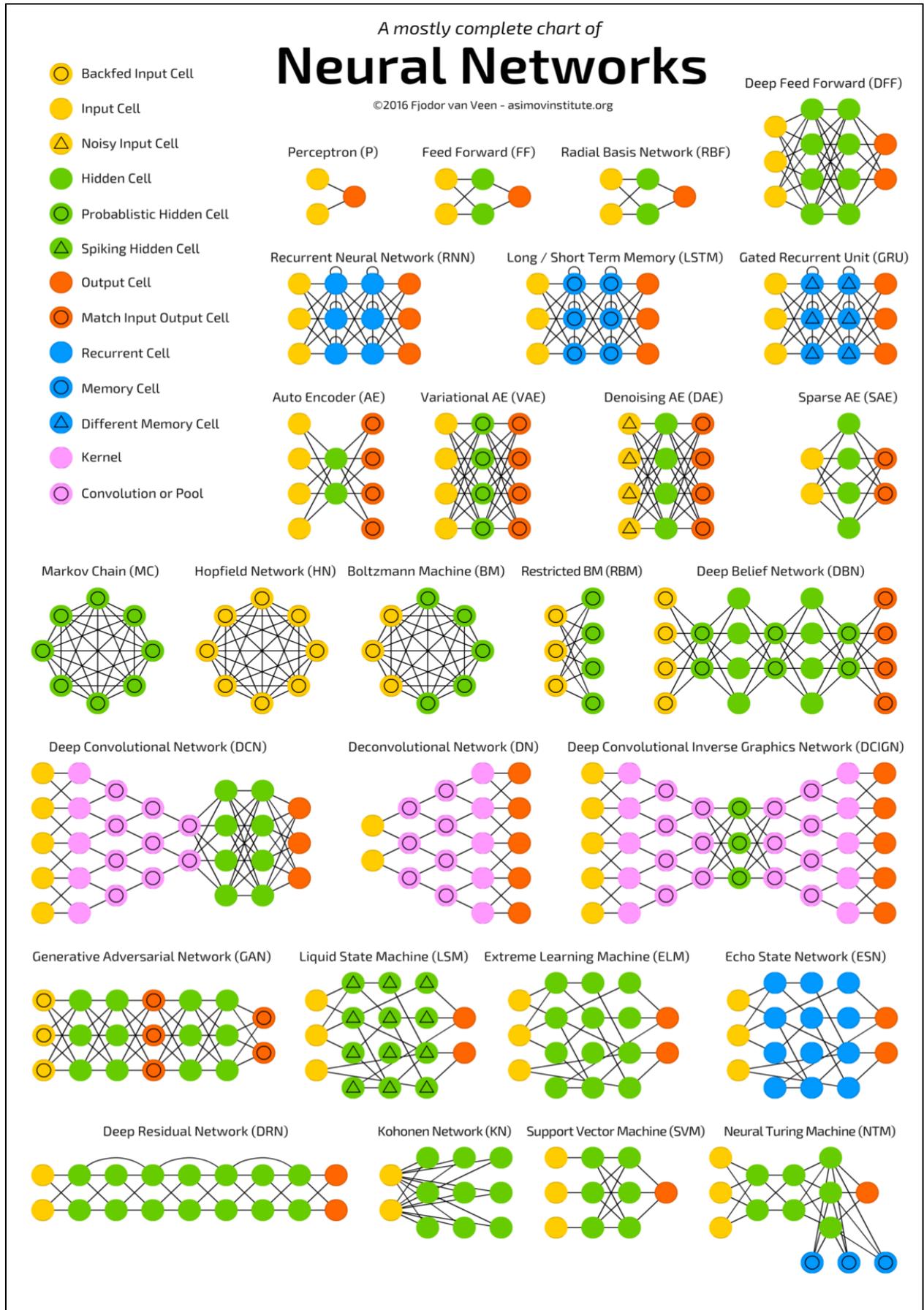


FIG. A.2 - Résumé des architectures principales des réseaux de neurones [155].

A.3 - Fonctions mathématiques

Ce domaine de DL exploite une variété des fonctions mathématiques. Quelques fonctions ont été nécessaire au développement de nos modèles de classification proposés (Voir Fig. A.3 et Fig. A.4).

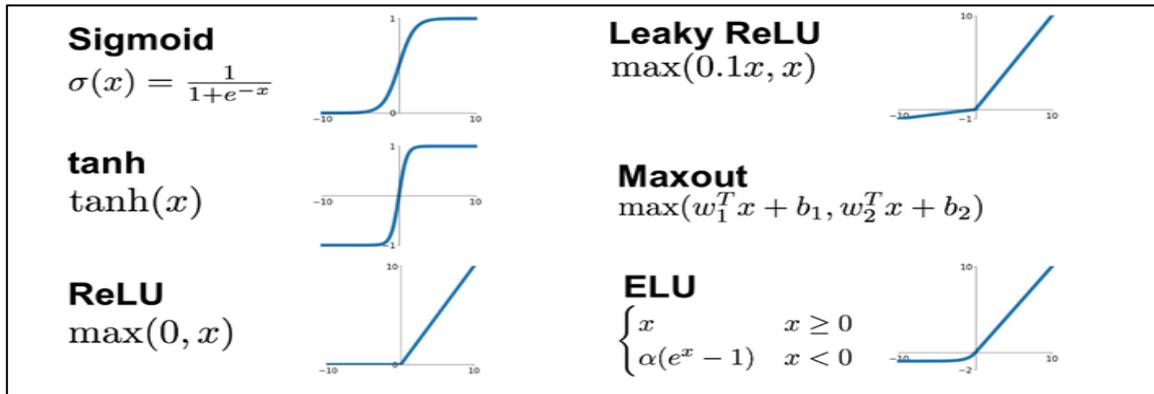


FIG. A.3 - Fonctions d'activation utilisées dans les réseaux DL [156].

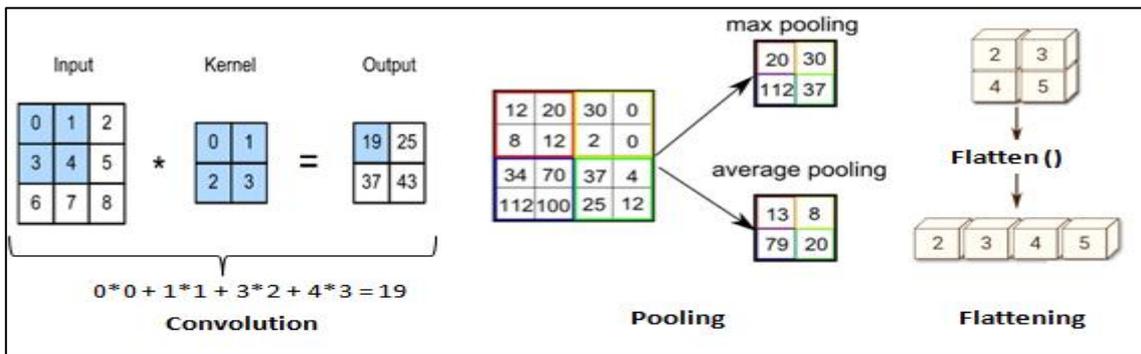


FIG. A.4 -Explications graphiques de Convolution, Pooling et Flattening [157].

A.3.1 - Calcul des performances:

Les différents paramètres utilisés dans cette étude pour mesurer les performances des modèles générés sont résumés dans Fig. A.5.

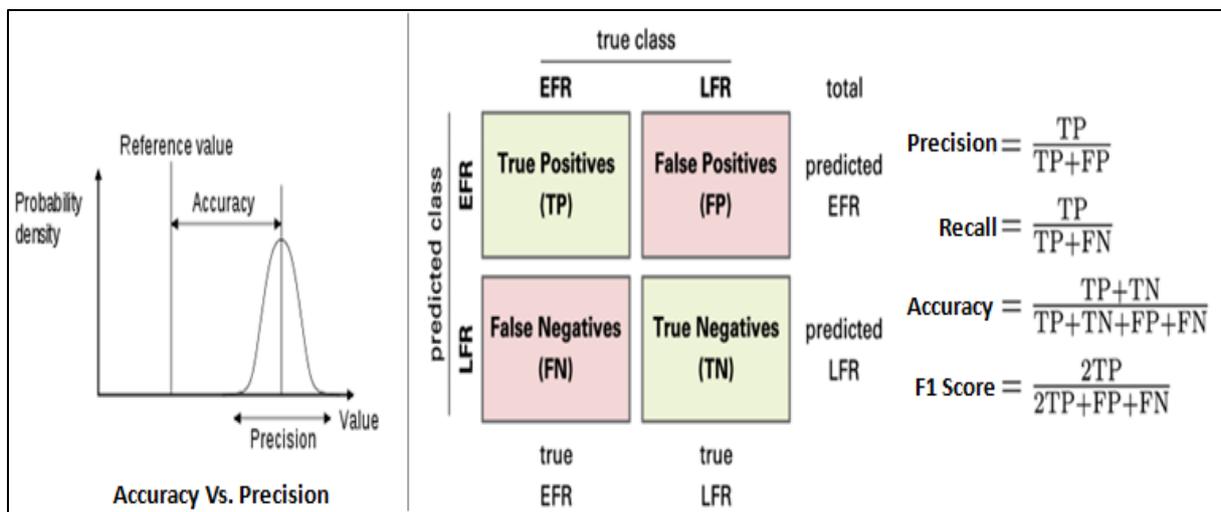


FIG. A.5 -Paramètres d'évaluation des performances.

Ces paramètres sont calculés tel que:

- "True Positif (TP)" : Les anomalies correctement détectées.
- "True Negatif (TN)" : Les cas normaux correctement détectés.
- "False Positif (FP)" : Les cas normaux classifiés comme anomalies (faussement détectés).
- "False Negatif (FN)" : Les anomalies classifiées comme des cas normaux (faussement détectées).

Annexe B

Caractéristiques des composants du prototype proposé

SOMMAIRE

- B.1 – Composants électroniques**
 - B.2 – Protocoles de communication**
-

Cet annexe fournit plus de détails techniques sur les composants et les protocoles intégrés à la réalisation du prototype proposé.

B.1 - Composants électroniques

Les principaux caractéristiques des composants électroniques utilisés lors du développement du prototype de l'ECG mobile proposé peuvent être résumés dans quelques illustrations schématiques (Voir FIG. B.1, FIG. B.2, FIG. B.3, FIG. B.4 et FIG. B.5).

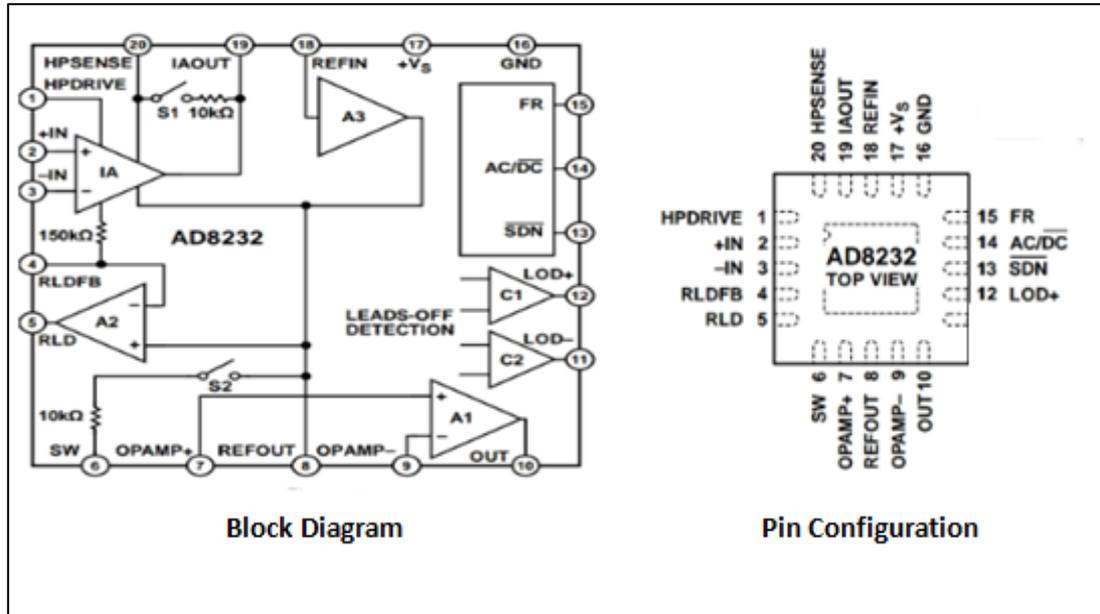


FIG. B.1 - Diagrammes du capteur de l'activité cardiaque AD8232 [85].

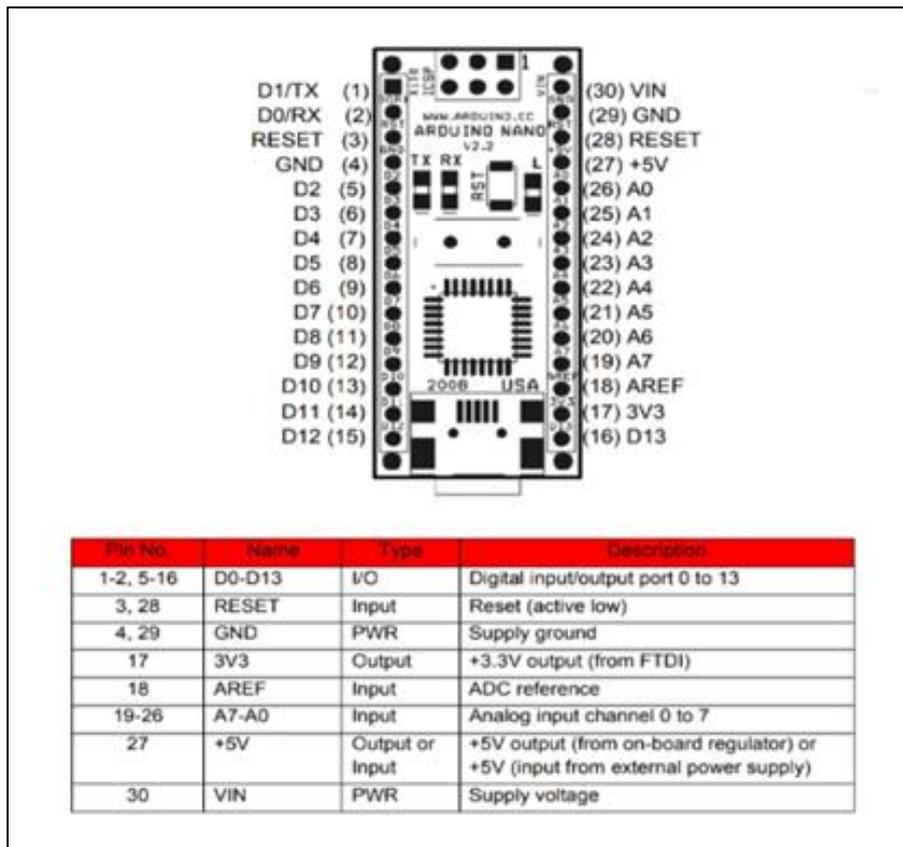


FIG. B.2 - Caractéristiques de la carte Arduino Nano [134].

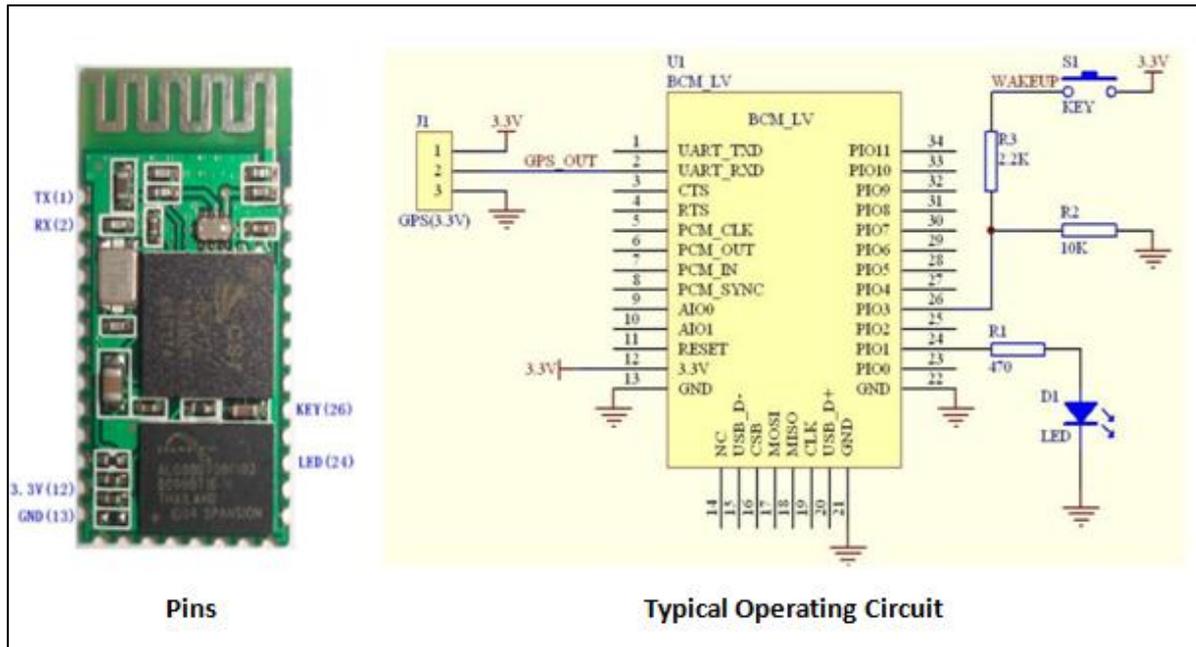


FIG. B.3 - Branchement du Bluetooth HC-06 [136].

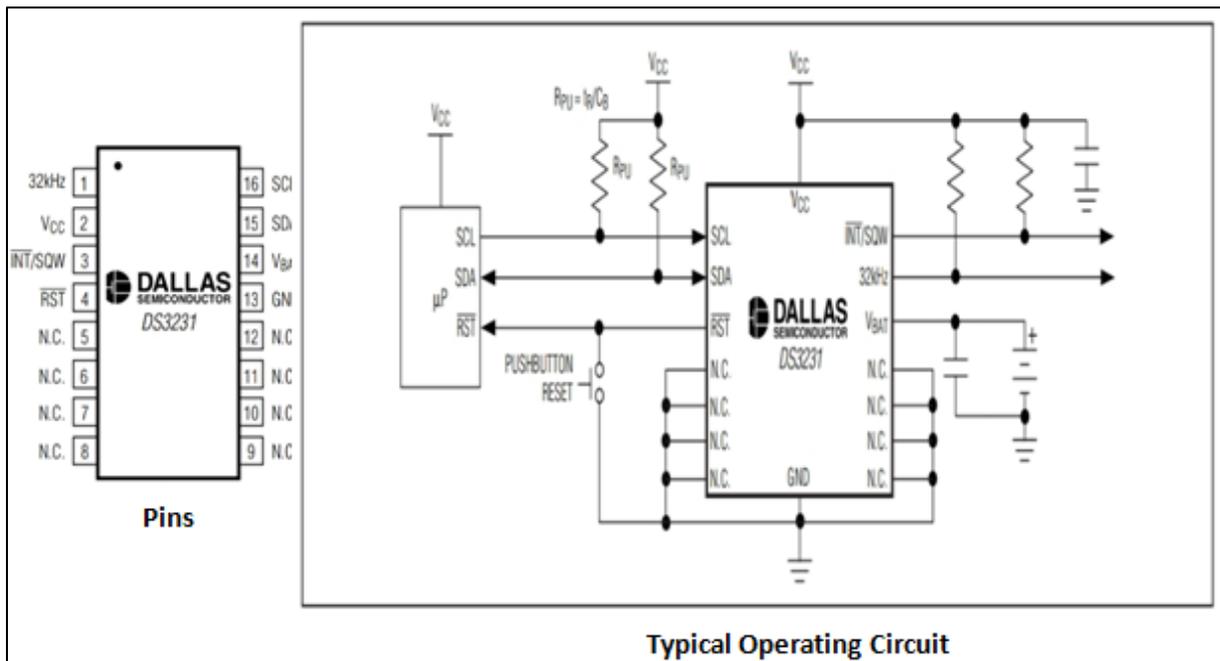


FIG. B.4 - Branchement de l'horloge DS3231 [137].

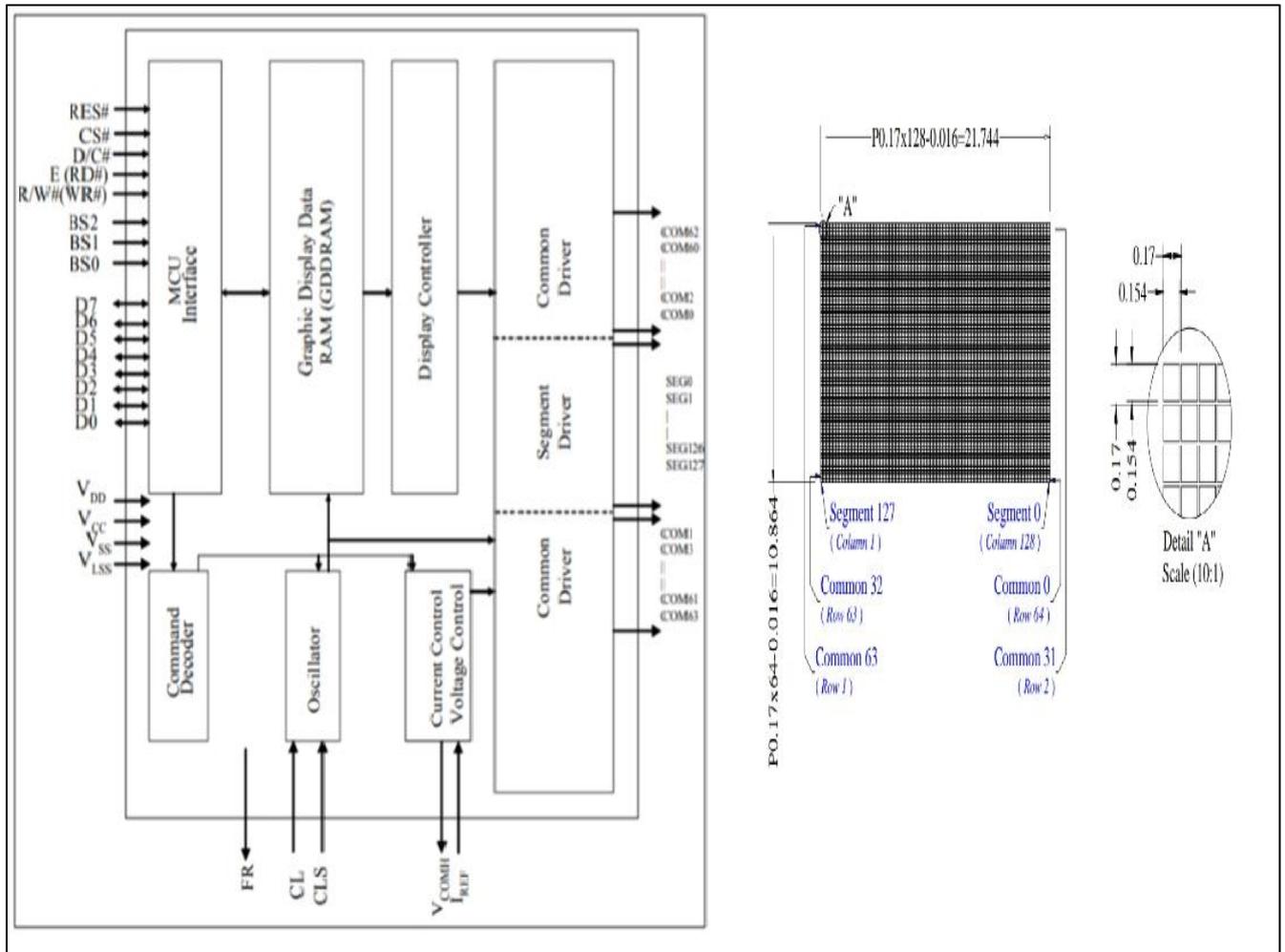


FIG. B.5 - Diagramme de blocks et écran OLED (SSD1306) [135].

B.2 - Protocoles

Les deux protocoles I2C (de bus) et SPI (en full-duplex) caractérisent la communication entre les cartes électroniques utilisées (Voir Fig. B.5). Ce mélange de ces deux normes dépend des composants électroniques utilisés.

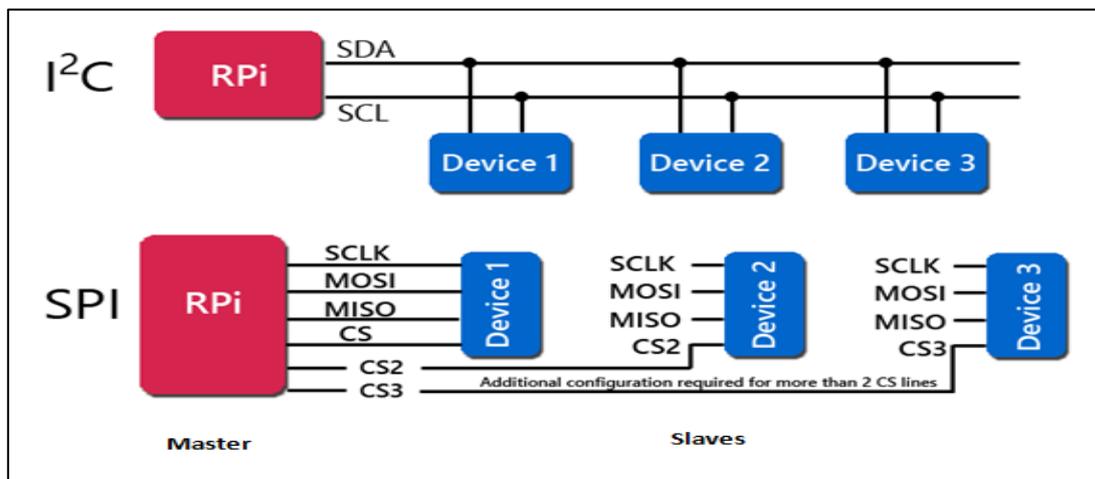


FIG. B.6 - Modes I2C et SPI [86].

Annexe C

Réglementation de la santé digitale

SOMMAIRE

C.1 – Normes et réglementation

Vu leur importance radicale, ce troisième annexe expose des listes des normes établies, ou en cours de préparation pour normaliser les applications des TIC, de AI et de ML en santé.

C.1 - Normes et réglementation

Vu la croissance remarquable des applications des TIC et de AI dans le domaine de la santé, une normalisation à l'échelle internationale est très indispensable pour ne pas engendrer des risques sur la santé des individus, des inégalités de services médicaux fournis ou de même des exploitations incorrectes, excessives ou parfois abusives des données personnelles [147], [148], [149].

La plupart de ces projets de normalisation est déjà installée ou parfois en cours de réalisation (Voir **Fig. C.1** et **Fig. B.2**) [149]. Parmi ces projets, celle nommée **IEC 80001** est destinée aux risques probablement engendrés par les réseaux de télécommunication à ce domaine sensible [149].

- ▶ ISO/IEC 20546 Information technology — Big data — Overview and vocabulary
- ▶ ISO/IEC TR 20547-1 Information technology — Big data reference architecture — Part 1: Framework and application process
- ▶ ISO/IEC TR 20547-2 Information technology — Big data reference architecture — Part 2: Use cases and derived requirements
- ▶ ISO/IEC 20547-3 Information technology — Big data reference architecture — Part 3: Reference architecture
- ▶ ISO/IEC TR 20547-5 Information technology — Big data reference architecture — Part 5: Standards roadmap
- ▶ ISO/IEC 22989 Artificial Intelligence – Concepts and terminology
- ▶ ISO/IEC 23053 Framework for Artificial Intelligence (AI) Systems: Using Machine Learning (ML)
- ▶ ISO/AWI TR 23347 Statistics — Big Data Analytics — Data Science Life Cycle
- ▶ ISO/AWI TR 23348 Statistics — Big Data Analytics — Model Validation
- ▶ ISO/IEC 23894 Information Technology – Artificial Intelligence – Risk Management
- ▶ ISO/IEC TR 24027 Information Technology – Artificial Intelligence – Bias in AI systems and AI aided decision making
- ▶ ISO/IEC TR 24028 Information Technology – Artificial Intelligence – Overview of trustworthiness in Artificial Intelligence
- ▶ ISO/IEC TR 24029-1 Artificial Intelligence (AI) – Assessment of the robustness of neural networks – Part 1: Overview
- ▶ ISO/IEC 24029-2 Artificial Intelligence (AI) – Assessment of the robustness of neural networks – Part 2: Formal methods methodology
- ▶ ISO/IEC TR 24030 Information technology – Artificial Intelligence – Use cases
- ▶ ISO/IEC TR 24368 Information Technology – Overview of ethical and societal concerns
- ▶ ISO/IEC TR 24372 Information Technology – Artificial Intelligence – Overview of computational approaches for AI systems
- ▶ ISO/IEC 24668 Information Technology – Artificial Intelligence – Process management framework for Big data analytics
- ▶ ISO/IEC 38507 Information Technology – Governance of IT – Governance implications of the use of artificial intelligence by organizations

FIG. C.1 - Liste des projets de normalisation déjà commencés.

- ▶ P7001 - Transparency of Autonomous Systems
- ▶ P7002 - Data Privacy Process
- ▶ P7003 - Algorithmic Bias Considerations
- ▶ P7009 - Standard for Fail-Safe Design of Autonomous and Semi-Autonomous Systems
- ▶ P7010 - Wellbeing Metrics Standard for Ethical Artificial Intelligence and Autonomous Systems
- ▶ P7011 - Standard for the Process of Identifying and Rating the Trustworthiness of News Sources
- ▶ P7014 - Standard for Ethical considerations in Emulated Empathy in Autonomous and Intelligent Systems
- ▶ P2049.1 Standard for Human Augmentation: Taxonomy and Definitions
- ▶ P2049.2 Standard for Human Augmentation: Privacy and Security
- ▶ P2049.3 Standard for Human Augmentation: Identity
- ▶ P2049.4 Standard for Human Augmentation: Methodologies and Processes for Ethical Considerations
- ▶ P2801 Recommended Practice for the Quality Management of Datasets for Medical Artificial Intelligence
- ▶ P2802 Standard for the Performance and Safety Evaluation of Artificial Intelligence Based Medical Device: Terminology
- ▶ P2817 Guide for Verification of Autonomous Systems
- ▶ P3333.1.3 Standard for the Deep Learning-Based Assessment of Visual Experience Based on Human Factors
- ▶ P3652.1 Guide for Architectural Framework and Application of Federated Machine Learning

FIG. C.2 - Standards IEEE de AI.

Annexe D

Production Scientifique

SOMMAIRE

D.1 – Liste des publications et des communications

D.2 – Publication internationale

Ce dernier annexe regroupe les travaux scientifiques nés de cette thèse.

D.1 - Liste des publications et des communications

D.1.1 - Publication Internationale

- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui and Hicham Slimani. *"An intelligent m-Health Platform for Chronic Diseases: Design and Conception"*. Eurasian Journal of Analytical Chemistry, Vol. 13, No. 3 (2018).
ISSN : 1306-3057.
<http://www.eurasianjournals.com/An-intelligent-m-Health-Platform-for-Chronic-Diseases-Design-and-Conception,108860,0,2.html>

D.1.2 - Communications Internationales

- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui and Hicham Slimani. *"An intelligent m-Health Platform for Chronic Diseases: Design and Conception"*. Proceedings of IIRAJ, International Conference on Contemporary issues in Science, Engineering & Management (18th ICCI-SEM 2019) Dubai, UAE, 08 - 09 March 2019.
ISBN : 978-93-86163-56-1.
<https://www.icci-sem.com/archive-details/uae/18th-icci-sem>
- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui et Hicham Slimani. *"Mobile Health : Innovations et Services"*. 7^{ème} Forum International en Santé, Algérie, 2017 May 12-14.
- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui et Hicham Slimani. *"Chronic Mobile Health Platform"*. École de Printemps sur la Réalité Virtuelle, la Réalité Augmentée, l'Interaction Homme-Machine et l'Internet des Objets (IVAR School), Algérie, 2019 Mars 18-21.
- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui et Hicham Slimani. *"Rôle de la Mobile Health dans la Médecine des Urgences"*. 9^{ème} Forum International en Santé, Algérie, 2019 Jun 28-30.

D.1.3 - Communication Nationales

- Kheira Lakhdari et Rachid Merzougui. *"Conception et Développement d'un Assistant Mobile Intelligent pour le Suivi des Maladies Chroniques"*. Journée sur les Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (JSTIC), Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2018 Jun 25.
- Kheira Lakhdari, Rachid Merzougui et Hicham Slimani. *"Conception et Développement d'un Assistant Mobile Intelligent pour le Suivi des Maladies Chroniques"*. Journée sur les Systèmes et Technologies de l'Information et de la Communication (JSTIC), Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, Algérie, 2019 Jun 26.

Références

- [85] Analog Devices, Inc, "AD8232 Datasheet and Product Info : Analog Devices", 1995-2020.
<http://www.analog.com/AD8232>.
- [86] R. Rosario, "The OpenHolter Project: D.I.Y. Cardiometry with Arduino and Django", *DjangoCon Europe 2017*, Apr. 2017.
<https://speakerdeck.com/siloraptor/openholter-project-d-dot-i-y-electrocardiography-using-arduino-and-django>
- [134] www.arduino.cc, "Arduino - Home", 2020.
<https://www.arduino.cc/>
- [135] cdn-shop.adafruit.com, datasheet, "SSD1306", 2008.
<https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>
- [136] www.alldatasheet.com, "Hc-06 datasheet".
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Hc-06%20datasheet&gclid=Cj0KCQjwzvbv7BRDIARIsAM-A6-195TDggzgx0RUGIS5NG9gVHIAqj1ATne5VkLSYzGo7BAhN6q-0p0aAlbBEALw_wcB
- [137] www.alldatasheet.com, "Ds3231 Datasheet PDF".
https://www.alldatasheet.com/view.jsp?Searchword=Ds3231&gclid=Cj0KCQjwzvbv7BRDIARIsAM-A6-0pTzA4c-4J-U4lf13Y4j4SXD3HnZJHfHV0h1fosASNJF3EYGGHjC0aAhWTEALw_wcB
- [147] www.gov.uk, "Medical devices: software applications (apps)", 2004-2020.
<https://www.gov.uk/government/publications/medical-devices-software-applications-apps>
- [148] www.cqc.org.uk, "Care Quality Commission", 2020.
<https://www.cqc.org.uk/>
- [149] www.cocir.org, "COCIR Analysis on AI in medical Device Legislation - September 2020", 2020.
<https://www.cocir.org/media-centre/publications/article/cocir-analysis-on-ai-in-medical-device-legislation-september-2020.html>
- [155] towardsdatascience.com, "The mostly complete chart of Neural Networks, explained", 2017.
<https://towardsdatascience.com/the-mostly-complete-chart-of-neural-networks-explained-3fb6f2367464>
- [156] medium.com, "Understanding Activation Functions in Neural Networks", 2017.
<https://medium.com/the-theory-of-everything/understanding-activation-functions-in-neural-networks-9491262884e0>
- [157] C. Cao *et al.*, "Deep Learning and Its Applications in Biomedicine", *Genomics Proteomics Bioinformatics*, vol. 16, no. 1, pp. 17-32, Feb. 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.gpb.2017.07.003>
- [158] bbvadata.com, "A weird Introduction to Deep Learning", 2018.
<https://www.bbvadata.com/a-weird-introduction-to-deep-learning/>