

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté De Génie Electrique et d'Informatique
Département de Génie Biomédical



Mémoire de Fin d'Etudes de
MASTER ACADEMIQUE

Filière :

Génie Biomédical

Spécialité :

Instrumentation Médicale

Par

TAMAZIRT Nora

SAHRAOUI Nawal

Thème

Conception d'une Plateforme de Télémédecine
dédiée aux Traitements des Signaux
Physiologiques

Soutenu le : 29/06/2025

Devant le jury :

Présidente :	M. Atika HADDADOU	MCB	UMMTO
Promoteur :	Mr. M'hamed Saadi BACHIR	MCB	UMMTO
Examineur :	Mr. Takfarinas CHELLI	MAA	UMMTO

Année universitaire 2024/2025



Remerciements

Louange à Dieu, le Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail. Sans Sa guidance, rien de cela n'aurait été possible.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur Bachir, notre encadrant, pour son accompagnement précieux tout au long de ce projet. Sa disponibilité, ses conseils avisés, ainsi que sa pédagogie ont été des atouts essentiels dans la réalisation de ce mémoire. Nous lui sommes infiniment reconnaissants pour sa rigueur scientifique et son soutien constant.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail, pour leur temps précieux et pour leurs remarques constructives qui ont permis d'enrichir notre réflexion et d'améliorer la qualité de notre étude.

Que toutes les personnes ayant, de près ou de loin, contribué à la réussite de ce mémoire trouvent ici l'expression de notre reconnaissance. Leur soutien, leurs encouragements et leur présence ont été des sources de motivation importantes.

Enfin, nous remercions chaleureusement nos familles et nos proches pour leur soutien inébranlable, leur amour et leur confiance indéfectible qui ont été déterminants tout au long de notre parcours universitaire.

À tous, merci infiniment.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, piliers de ma vie et source de mon courage.

À ma maman, pour son amour infini, ses prières, son soutien inestimable et ses encouragements constants tout au long de mes études. Que Dieu te préserve et te comble de bonheur.

À mon papa, pour sa confiance, ses efforts et son appui tout au long de mon parcours.

À mon petit frère Younes, que j'aime profondément, en espérant être pour toi un exemple et un appui.

À toute ma famille, pour leur affection et leur présence bienveillante.

À Nora, ma très chère amie avant d'être mon binôme, pour son soutien, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

À mes proches et amis(es), pour leur soutien moral, leur amitié sincère et leur présence précieuse dans les moments difficiles comme les plus heureux.

Avec toute ma reconnaissance.

NAWAL

2025





Dédicace

Je souhaite dédier ce mémoire à toutes les personnes qui comptent profondément pour moi, celles qui m'ont entourée, soutenue et encouragée tout au long de ce parcours.

À mon père, merci d'avoir toujours été là pour me pousser à donner le meilleur de moi-même. Ton soutien et ta confiance ont été ma plus grande force.

À ma mère, ton amour, ta patience et ton appui au quotidien ont fait toute la différence. Tu as su me rassurer dans les moments de doute, et pour cela, je te suis infiniment reconnaissante.

À mon frère Rafik, merci pour tes conseils, ton écoute et ta bienveillance. Tu as toujours été une épaule sur laquelle je pouvais compter.

À ma petite sœur Souhila, ta bonne humeur et ton affection m'ont apporté beaucoup de légèreté. Tu es un vrai rayon de soleil dans ma vie.

À ma binôme et amie Nawal, merci pour ta patience, ton engagement sincère et ton esprit d'équipe tout au long de ce travail. Travailler avec toi a été une belle expérience, empreinte de respect et de complicité.

À toute ma famille, merci pour votre amour, votre confiance et vos prières.

Vous avez toujours cru en moi, même dans les moments les plus difficiles.

Avec toute ma gratitude.

NORA



Table des matières

Remerciement	I
Dédicace	II
Table des matières	IV
Table des figures	IX
Liste des tableaux	XI
Liste des abréviations	XII

Introduction

Introduction générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : généralités

Introduction.....	3
I.1. Concepts généraux sur la télémédecine.....	3
I.1.1. Définition de la télémédecine	3
I.1.2. Historique de la télémédecine.....	4
I.1.3 Application et domaine d'utilisation de la télémédecine.....	4
I.1.4. Les avantages et les inconvénients de la télémédecine :	5
I.1.4.1 Les avantages de la télémédecine	5
I.1.4.2 Les inconvénients	6
I.2. Les signaux physiologiques.....	7
I.2.1 Définition des signaux physiologiques.....	7
I.2.2. Signal électrocardiogramme (ECG) :	7
I.2.3. Définition de l'électroencéphalogramme (EEG) :	10
I.2.3.1. Représentation graphique du signal EEG :	10
I.2.3.2. Interprétation de signal EEG :	11
I.2.4. Définition du signal PPG	13
I.2.4.1. La représentation graphique de signal SPO2 :.....	13

I.2.4.2 Interprétation du signal PPG.....	13
I.2.4.3. Caractéristiques des signaux physiologiques	14
I.2.4.4. Défis du traitement des signaux physiologiques	15
I.3. Intelligence Artificielle dans le Traitement des Signaux en Télémédecine	15
I.3.1 Introduction à l'IA et ses applications en médecine.....	15
I.3.2 Types d'algorithmes d'IA appliqués aux signaux physiologiques	15
I.3.2.1 Apprentissage supervisé	15
I.3.2.2 Apprentissage non supervisé	16
I.3.2.3 Apprentissage profond (Deep Learning)	16
I.3.3 Exemples d'utilisation de l'IA en télémédecine	16
I.3.3.1 Détection automatique des arythmies cardiaques via l'ECG	16
I.3.3.2 Prédiction des crises d'épilepsie via l'EEG	17
I.3.4 Défis et perspectives de l'IA en télémédecine.....	17
I.3.4.1 Défis de l'IA en télémédecine	17
I.3.4.2 Perspectives de l'IA en télémédecine.....	18
Conclusion	19

Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

II.1. Introduction :	20
II.2. Technologies et environnement de développement :	22
II.2.1. Langages utilisés	22
II.2.1.1. Langage PHP	22
II.2.1.2. Langage html	22
II.2.1.3. Langage CSS	23
II.2.1.4 Langage Javascript	23
II.2.2. Base de de données SQL et fichiers CSV	24
II.2.2.1. Définition d'une base de données SQL :.....	24
II.2.2.2 Rôle de la base de données dans la plateforme :	24
II.2.3. Définition des fichiers CSV	25
II.2.3.1. Rôle des fichiers CSV dans la plateforme :.....	25
II.2.4. Environnement de développement : XAMPP	25
II.2.4.1. Définition :	25

II.2.4.2. Rôle de XAMPP dans la plateforme	26
II.3. Préparation des Données Biomédicales	27
II.3.1. Description des signaux ECG, EEG et PPG.....	27
II.3.1.1. Définition et description des signaux	27
II.3.1.1.1. Signal ECG.....	27
II.3.1.1.2. Signal EEG	27
II.3.1.1.3. Signal PPG	28
II.3.2.1 Format des fichiers CSV	28
II.3.2.2. Structure des fichiers CSV utilisés	29
II.3.2.3. Importation des fichiers CSV dans la plateforme	29
II.3.3. Application des algorithmes de Marquardt et Levenberg	29
II.3.3.1. Définition et principe général.....	29
II.3.3.2. Application théorique dans la plateforme	30
II.3.3.3. État d'implémentation	30
II.4. Traitement de signal ECG :	31
II.4.1 Prétraitement du signal.....	32
II.4.2 Filtrage du signal	32
II.4.3 Détection des ondes PQRSST	32
II.4.4 Visualisation graphique	33
II.5. Traitement du signal EEG dans la plateforme.....	35
II.5.1. Prétraitement et filtrage du signal EEG.....	36
II.5.2. Détection des ondes cérébrales (alpha, bêta, thêta, delta)	36
II.5.3. Détection d'anomalies neurologiques avec IA simple	37
II.5.4. Visualisation du signal EEG.....	37
II.5.5. Lecture multivoies EEG	37
II.6. Traitement du Signal PPG	39
II.6.1. Prétraitement du signal.....	40
II.6.2. Filtrage du signal avec la méthode Levenberg–Marquardt	40
II.6.3. Fréquence du signal SpO ₂	41
II.6.4. Détection des pics du signal	41
II.6.5. Estimation de la saturation en oxygène (SpO ₂).....	41
II.6.6. Calcul du rythme cardiaque (BPM)	42
II.6.7 Affichage graphique du signal PPG	42

II.7. Détection d'anomalie :	43
II.8. Partage des Résultats sur le Réseau.....	43
II.8.2. Accès aux résultats via l'interface web	44
II.8.3. Sécurité et gestion des utilisateurs.....	44
Conclusion	45

Chapitre III : Résultats et Discussion

Introduction.....	46
III.1. Présentation Générale de la Plateforme de Télémédecine :	46
III.2. Résultats de la Préparation des Données Biomédicales	47
III.2.1. Importation et Format des Fichiers CSV	47
III.2.2. Application des algorithmes de Marquardt-Levenberg	48
III.2.3. Traitement intégré et invisible pour l'utilisateur.....	50
III.2.4. Intérêt de l'approche	50
III.3. Résultats du Traitement du Signal ECG	51
III.3.1. Filtrage du Signal ECG	51
III.3.2. Détection des Pics PQRST.....	52
III.3.3. Calcul du Rythme Cardiaque (BPM)	53
III.3.4. Détection d'Anomalies Cardiaques par IA	53
III.3.5. Affichage Graphique du Signal ECG.....	54
III.4. Résultats du Traitement du Signal EEG	55
III.4.1. Filtrage et Prétraitement du Signal EEG	55
III.4.2. Détection des Ondes Cérébrales.....	56
III.4.3. Détection d'Anomalies Neurologiques avec IA	57
III.4.4. Visualisation du Signal EEG.....	58
III.5. Résultats du Traitement du Signal PPG	59
III.5.1. Filtrage du Signal PPG.....	59
III.5.2. Détection des Pics et du Rythme Cardiaque	60
III.5.3. Estimation de la Saturation en Oxygène (SpO ₂)	62

III.5.4. Détection d'Anomalies avec Intelligence Artificielle	62
III.5.5. Affichage Graphique du Signal PPG	63
III.6. Partage des Résultats sur le Réseau	64
III.6.1. Mise en Place d'un Serveur Local avec XAMPP	64
III.6.2. Accès aux Résultats via Interface Web	65
III.6.3. Sécurité et Gestion des Utilisateurs	66
III.7. Analyse Comparative et Discussion	67
III.7.1. Comparaison avec d'autres outils	67
III.7.2. Discussion des points forts	69
III.8. Limites et Perspectives	70
III.8.1. Limites identifiées	70
III.8.2. Perspectives d'évolution	70
Conclusion	70

Conclusion:

Conclusion générale.....	71
Bibliographies	73

Table des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Télémédecine.....	04
Figure I.2 : l'enregistrement d'un signal électrocardiogramme (ECG).....	08
Figure I.3 : Signal ECG.....	08
Figure I.4 : Représentation graphique de signal EEG.....	11
Figure I.5 : Représentation graphique de signal PPG.....	14

ChapitreII :

Figure II.1 : Interface XAMPP – Modules Apache et MySQL.....	26
Figure II.2 : Le graphique de signal ECG.....	34
Figure II.3 : Le graphique de signal EEG.....	38
Figure II.4 : les graphiques de signal PPG.....	42

Chapitre III :

Figure III.1 : Page d'accueil de la plateforme.....	47
Figure III.2 : Interface d'importation d'un fichier CSV EEG avec message de confirmation.....	48
Figure III.3 : Signal ECG corrigé par l'algorithme de Levenberg-Marquardt intégré dans la plateforme.....	49
Figure III.4 : Affichage du signal ECG filtré après traitement passe-haut et passe-bas.....	50
Figure III.5 : Signal ECG annoté avec détection automatique des pics PQRST.....	51
Figure III.6 : Affichage du BPM et des mesures cardiaques calculées automatiquement.....	52
Figure III.7 : Diagnostic automatique du rythme cardiaque avec interprétation IA.....	53
Figure III.8 : Visualisation interactive du signal ECG avec marquage des points caractéristiques.....	53
Figure III.9 : Tracé EEG multi-bandes après traitement.....	54
Figure III.10 : Résultats EEG – Moyennes des ondes cérébrales et diagnostic.....	55
Figure III.11 : La détection automatique des anomalies.....	56
Figure III.12 : Affichage multi-canaux des ondes EEG (Alpha, Bêta, Thêta, Delta).....	57
Figure III.13 : Signal PPG rouge affiché après filtrage.....	58
Figure III.14 : Signal PPG rouge affiché après filtrage.....	59
Figure III.15 : Détection automatique des pics PPG (Rouge).....	60

Table des figures

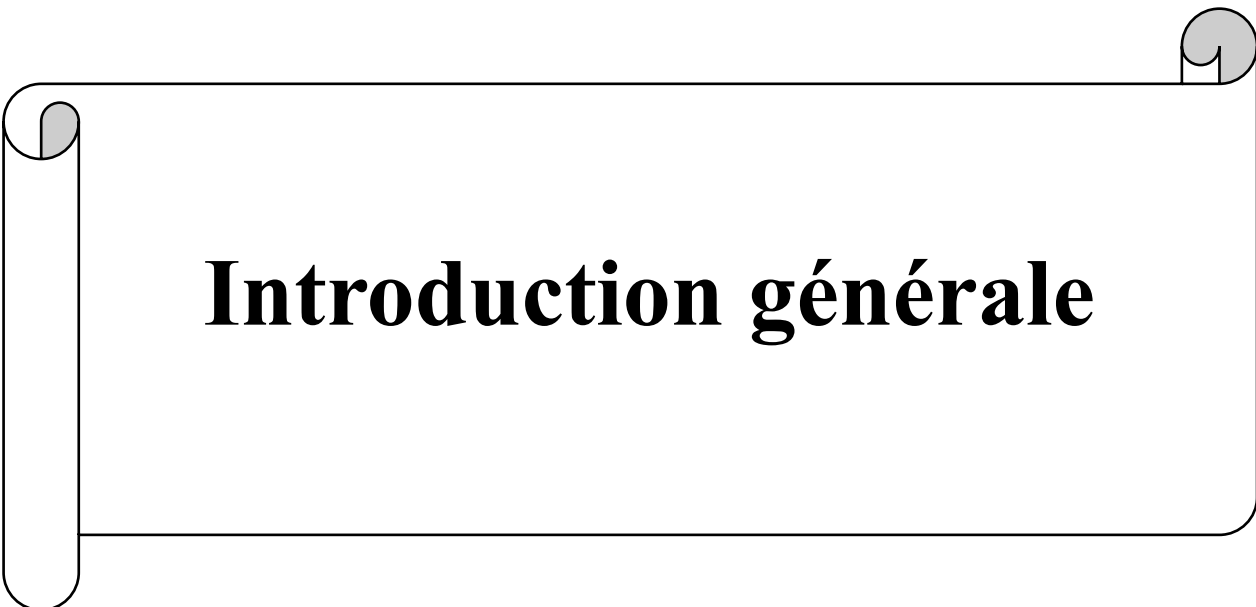
Figure III.16 : Détection automatique des pics PPG (Infrarouge).....	60
Figure III.17 : Estimation de la SpO ₂ avec affichage du seuil critique.....	61
Figure III.18 : Diagnostic automatique généré à partir des valeurs de BPM et SpO ₂	62
Figure III.19 : Affichage graphique interactif des signaux PPG et de la SpO ₂	63
Figure III.20 : Console XAMPP avec services Apache et MySQL actifs.....	64
Figure III.21 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal ECG.....	64
Figure III.22 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal EEG.....	65
Figure III.23 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal PPG.....	65
Figure III.24 : Formulaire de connexion.....	66
Figure III.25: Vue d'ensemble de la plateforme avec les modules ECG, EEG et SPO ₂ accessibles via le menu principal.....	70

Liste des tableaux :

Tab I.1 : Bandes de fréquences cérébrales.....	12
Tab II.1: Fichiers CSV utilisés.....	29
Tab III.1 : Tableau comparatif entre notre plateforme et d'autres outils de traitement de signaux.....	67

Liste des abréviations

- **ECG** : Électrocardiogramme
- **EEG** : Electroencéphalogramme
- **PPG** : Photopléthysmogramme
- **SpO₂** : Saturation pulsée en oxygène
- **BPM** : Battements par minute
- **IA** : Intelligence artificielle
- **CSV** : Comma Separated Values (fichier de valeurs séparées par des virgules)
- **HTML** : HyperText Markup Language
- **CSS** : Cascading Style Sheets
- **JS** : JavaScript
- **PHP** : Hypertext Preprocessor
- **SQL** : Structured Query Language
- **XAMPP** : Ensemble d'outils incluant Apache, MySQL, PHP et Perl
- **CHAP** : Challenge Handshake Authentication Protocol
- **ANN** : Artificial Neural Network (Réseau de neurones artificiels)
- **SVM** : Support Vector Machine
- **CNN** : Convolutional Neural Network
- **RNN** : Recurrent Neural Network
- **LSTM** : Long Short-Term Memory
- **GUI** : Graphical User Interface (Interface graphique utilisateur)

A decorative scroll frame with a black outline. The left side is a vertical scroll with a grey inner circle at the top. The right side is a vertical scroll with a grey inner circle at the top. The top and bottom edges are horizontal lines with rounded ends.

Introduction générale

Introduction Générale

Dans un monde de plus en plus caractérisé par l'intégration des technologies numériques dans divers domaines, la médecine n'échappe pas à cette tendance. L'analyse des signaux biomédicaux, tels que l'électrocardiogramme (ECG), l'électroencéphalogramme (EEG) et le photopléthysmogramme (PPG), est devenue un élément fondamental pour le diagnostic médical, le monitoring des patients et la gestion des maladies chroniques ou aiguës. Ces instruments facilitent l'exploration des mécanismes physiologiques fondamentaux de la respiration, du rythme cardiaque, de l'oxygénation sanguine et de l'activité cérébrale, tout en offrant des données précises sur l'état de santé global d'un individu.

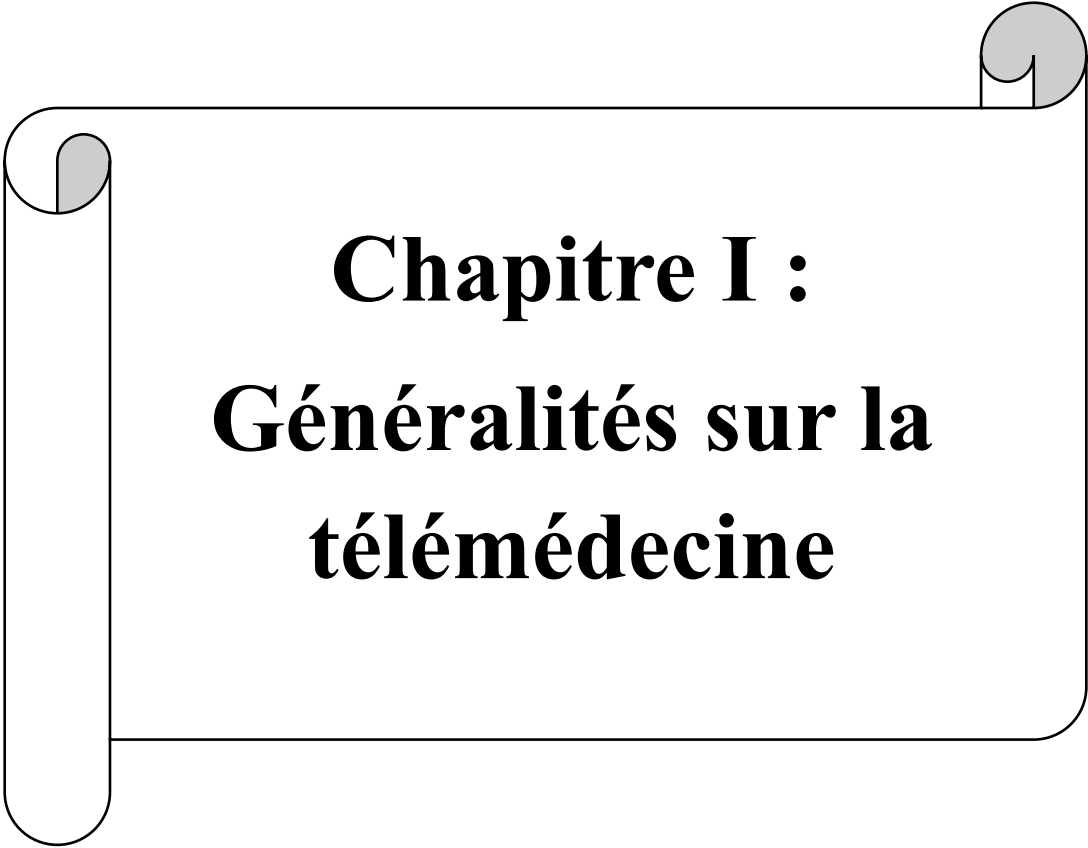
Les progrès technologiques récents ont engendré les solutions novatrices intégrant le traitement numérique des signaux, l'intelligence artificielle et des interfaces online interactives. Dans ce cadre, notre projet consiste à développer une plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux, accessible par une interface web simple et sécurisée. Cette plateforme a pour objectif de simplifier l'interprétation clinique des données physiologiques et d'automatiser certaines analyses essentielles, telles que la détection des anomalies cardiaques, neurologiques ou respiratoires. Ainsi, une problématique centrale se pose : comment concevoir une plateforme web intelligente, capable d'analyser automatiquement les signaux biomédicaux tels que l'ECG, l'EEG et le PPG, afin d'assister les professionnels de santé dans l'interprétation des données physiologiques et la détection précoce des anomalies médicales ?

Ce projet se structure autour de trois chapitres principaux :

Dans le premier chapitre, nous avons exploré les bases physiologiques des signaux biomédicaux utilisés dans ce projet, Il traite du signal ECG, en lien avec l'activité électrique du cœur et son utilité dans le diagnostic des troubles cardiaques. Il aborde ensuite le signal EEG, reflet de l'activité cérébrale, en détaillant ses bandes de fréquence et ses applications neurologiques. Enfin, il décrit le signal PPG, utilisé pour mesurer la fréquence cardiaque et la saturation en oxygène à partir des variations du volume sanguin périphérique.

Le deuxième chapitre expose la conception et la mise en œuvre de la plateforme web, soulignant les choix technologiques (HTML, CSS, JavaScript, PHP, MySQL), l'environnement de développement local (XAMPP), l'intégration des algorithmes de traitement des signaux (tel que celui de Levenberg-Marquardt), ainsi que les étapes essentielles de préparation des données biomédicales.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus suite à l'implémentation de la plateforme, incluant la visualisation interactive des signaux ECG, EEG et PPG, la détection automatique des anomalies par un module d'intelligence artificielle élémentaire, ainsi que la sauvegarde et le partage des résultats avec une base de données locale.



Chapitre I :

Généralités sur la télémédecine

Introduction

Dans un contexte de santé en pleine évolution, marqué par une demande croissante en soins accessibles et efficaces, l'intégration des technologies numériques dans le domaine médical devient une nécessité stratégique. Ce chapitre introductif pose les fondements théoriques du projet en s'appuyant sur trois axes majeurs : la télémédecine, les signaux physiologiques et l'intelligence artificielle appliquée à la santé.

Dans un premier temps, nous aborderons le concept de télémédecine, en présentant sa définition, son évolution historique, ainsi que ses différents domaines d'application. Nous reviendrons également sur ses bénéfices et ses limites dans le contexte des soins à distance.

Ensuite, une attention particulière sera portée aux signaux physiologiques utilisés dans ce travail, à savoir : le signal ECG (électrocardiogramme), le signal EEG (électroencéphalogramme) et le signal PPG (photopléthysmogramme). Chaque signal sera défini, représenté graphiquement et brièvement interprété dans un cadre médical.

Enfin, ce chapitre s'intéressera au rôle de l'intelligence artificielle dans l'analyse automatique des signaux biomédicaux. Les principaux types d'algorithmes y seront présentés, ainsi que des exemples d'application dans le domaine de la santé connectée.

Cette base théorique servira de socle pour aborder les étapes de conception et de traitement développées dans les chapitres suivants.

I.1. Concepts généraux sur la télémédecine

I.1.1. Définition de la télémédecine

La télémédecine désigne l'ensemble des pratiques médicales réalisées à distance grâce aux technologies de l'information et de la communication. Elle permet aux professionnels de santé d'interagir entre eux ou avec leurs patients, facilitant ainsi une prise en charge efficace sans nécessité de présence physique. Toujours encadrée par un personnel médical qualifié, elle peut également mobiliser d'autres spécialistes en fonction des besoins du patient.

Loin de vouloir remplacer les soins classiques, la télémédecine vise à les compléter pour faire face aux enjeux actuels du système de santé. Elle joue un rôle essentiel dans l'élaboration de nouvelles solutions organisationnelles. Pour être pleinement efficace, elle doit s'inscrire dans

un projet médical cohérent, adapté aux attentes des professionnels de santé et aux besoins spécifiques de la population. C'est dans cette logique qu'elle s'intègre durablement au parcours de soins [1].



Figure I.1 : Télémédecine.

I.1.2. Historique de la télémédecine

La télémédecine, pratique consistant à fournir des soins médicaux à distance grâce aux technologies de l'information et de la communication, a évolué au fil des décennies :

- ✓ Dans les années 1960, aux États-Unis, des programmes de téléconsultation et de télé-éducation ont été mis en place et interconnectés, notamment autour du Nebraska Psychiatric Institute [2].
- ✓ Dans les années 1990, des consultations médicales à distance ont été mises en œuvre entre plusieurs établissements hospitaliers à travers le monde.
- ✓ En 2001, une téléchirurgie HPST (Hôpital, Patients, Santé et Territoires), qui a défini et encadré cinq actes de télémédecine : télé-expertise, téléconsultation, télésurveillance, téléassistance et régulation [3].

I.1.3 Application et domaine d'utilisation de la télémédecine

La télémédecine se décline en plusieurs types d'applications, selon les objectifs visés. Chaque forme répond à des besoins spécifiques dans le parcours de soins.

La téléconsultation

Il s'agit d'une consultation médicale réalisée à distance entre un patient et un professionnel de santé. Le patient entre en contact, souvent par téléphone ou via une plateforme dédiée, avec un centre médical où un médecin évalue la gravité de la situation et oriente le patient vers la prise en charge appropriée.

La téléassistance

Cette pratique consiste à assister, à distance, un professionnel de santé médecin ou secouriste en cours d'intervention. Elle peut être utilisée lors d'un acte médical ou chirurgical, notamment en situation d'urgence, lorsqu'un médecin guide une personne en attendant l'arrivée d'un autre professionnel.

La téléexpertise

Traditionnellement limitée à la demande d'un second avis entre spécialistes, la téléexpertise désigne aujourd'hui tout échange médical entre deux ou plusieurs professionnels visant à établir un diagnostic, en l'absence du patient. Elle permet une prise de décision partagée sur la base des informations disponibles.

La télésurveillance

Ce type d'application repose sur la transmission à distance des données cliniques d'un patient. Ces données sont analysées par des professionnels de santé, qui réalisent ensuite une évaluation médicale et répondent en fonction des résultats observés [4].

I.1.4. Les avantages et les inconvénients de la télémédecine :

La télémédecine, qui consiste à dispenser des soins médicaux à distance en utilisant les technologies de l'information et de la communication, offre à la fois des opportunités et présente certaines limites.

I.1.4.1 Les avantages de la télémédecine

Un accès plus facile aux soins

Quand on vit loin d'un centre de santé ou dans un endroit isolé, voir un médecin peut devenir compliqué. La télémédecine vient résoudre ce problème en rendant les consultations accessibles depuis chez soi, ce qui réduit pas mal les inégalités entre les régions.

Moins de trajets, plus de confort

Il n'est plus nécessaire de faire des kilomètres ou d'attendre des heures pour une consultation. Depuis un téléphone ou un ordinateur, on peut parler à un médecin. C'est

particulièrement pratique, surtout pour ceux qui rencontrent des difficultés à se déplacer ou un emploi du temps chargé.

Suivre une maladie chronique devient plus simple

Les personnes atteintes de maladies qui demandent un suivi régulier peuvent désormais le faire à distance. Le médecin peut voir l'évolution, ajuster le traitement rapidement, et le patient se sent mieux accompagné au quotidien.

Une vraie économie pour tout le monde

En évitant certaines hospitalisations ou consultations inutiles aux urgences, la télémédecine permet de limiter les dépenses. Moins de frais pour le patient, et moins de pression sur le système de santé.

Moins de risques de tomber malade en allant consulter

En limitant les déplacements et les passages dans les lieux bondés comme les salles d'attente, on réduit aussi les risques de contamination. C'est un vrai plus, surtout en période d'épidémie [5].

I.1.4.2 Les inconvénients

Absence d'un examen physique direct : Certains diagnostics demandent une consultation en face à face, avec un examen direct du patient. À distance, ce n'est pas toujours possible, ce qui peut parfois limiter la précision du diagnostic.

Difficultés techniques et accès limité : Tout le monde n'a pas une bonne connexion Internet, ou ne sait pas bien se servir des outils numériques. Cela peut empêcher certaines personnes d'en profiter pleinement.

Risques liés à la confidentialité Partager des données médicales en ligne : soulève des questions sur la sécurité des informations. Il est essentiel que les plateformes respectent la vie privée des patients.

Problèmes de remboursement et de loi Selon les pays ou les systèmes de santé : les actes réalisés en télémédecine ne sont pas toujours remboursés comme les consultations classiques. De plus, la réglementation peut encore être floue ou en cours d'évolution.

Une relation parfois moins humaine Sans contact direct : la relation entre le médecin et le patient peut sembler plus froide ou impersonnelle, ce qui peut rendre la communication moins fluide pour certains [6].

I.2. Les signaux physiologiques

I.2.1 Définition des signaux physiologiques

Les signaux physiologiques sont des traces que laisse le fonctionnement de notre corps. Ce sont des réactions naturelles produites par nos organes comme le cœur, le cerveau ou encore les muscles lorsqu'ils sont en activité. Grâce à des capteurs adaptés, ces signaux peuvent être enregistrés puis analysés. Cela permet, par exemple, de surveiller l'état de santé d'une personne, de repérer des anomalies, ou encore d'ajuster un traitement en fonction des besoins du patient [7].

I.2.2. Signal électrocardiogramme (ECG) :

Un signal électrocardiogramme (ECG) est l'enregistrement graphique de l'activité électrique du cœur au cours de chaque cycle cardiaque. Il est obtenu en plaçant des électrodes sur la peau, généralement sur la poitrine, les bras et les jambes, qui détectent les impulsions électriques générées par le cœur. Ces signaux sont ensuite enregistrés par un appareil appelé électrocardiogramme [8].

Le signal ECG est un outil fondamental en médecine pour :

- ✓ Mesurer la fréquence et la régularité cardiaque,
- ✓ Détecter des troubles du rythme (arythmies),
- ✓ Identifier des signes d'infarctus ou d'ischémie,
- ✓ Évaluer la conduction électrique du cœur.

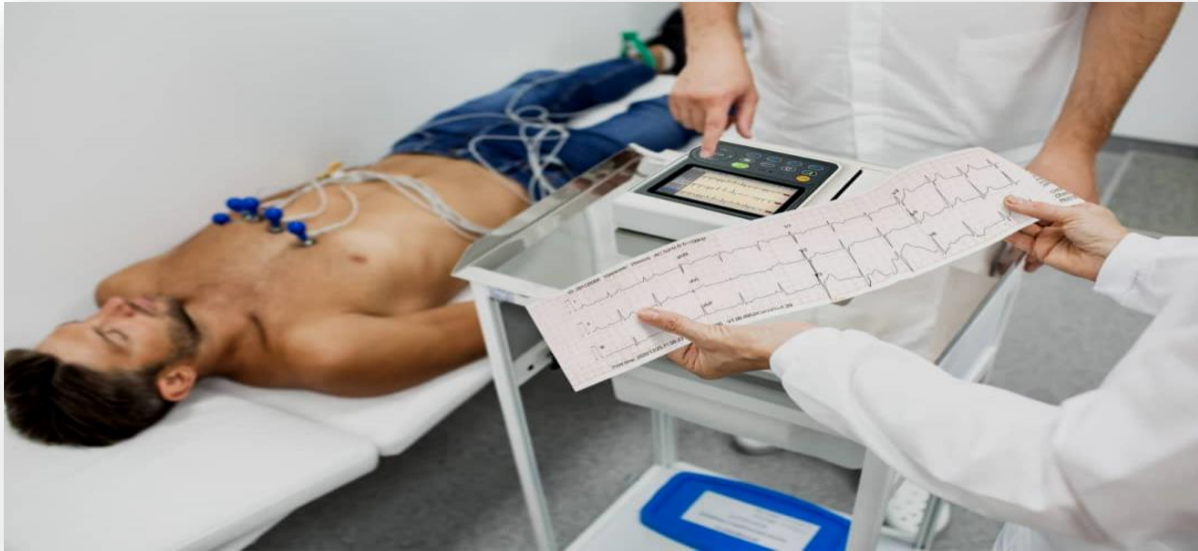


Figure I.2 : l'enregistrement d'un signal électrocardiogramme (ECG)

I.2.2.1 Représentation d'un signal ECG

Un cycle cardiaque typique est constitué de plusieurs ondes et segments bien définis [8] :

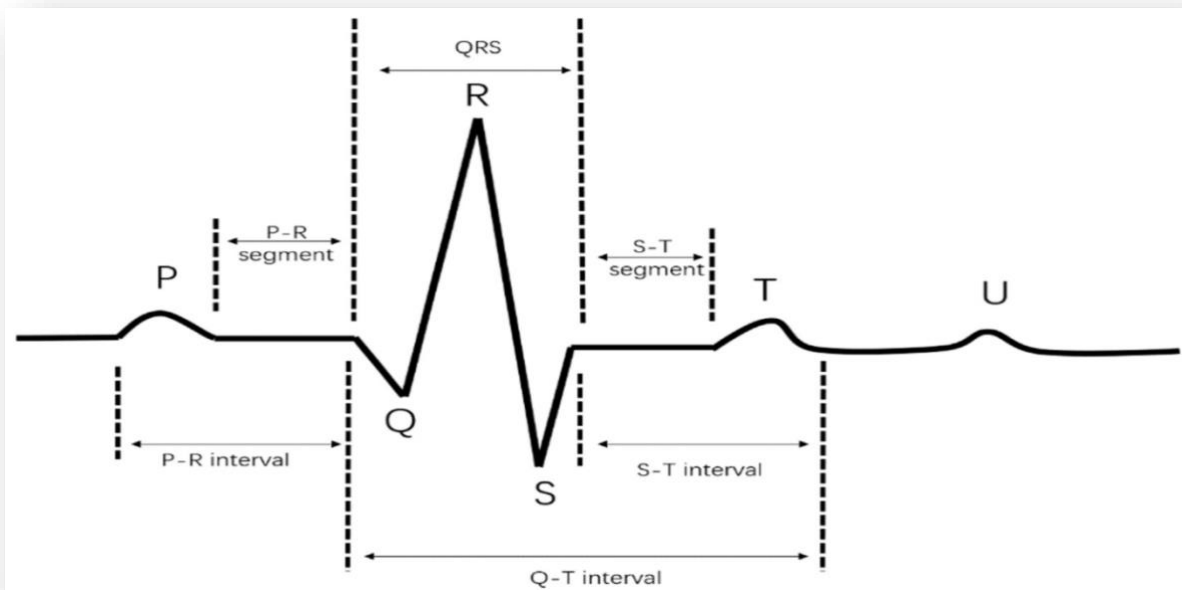


Figure I.3: Signal ECG

Onde P

L'onde P reflète la dépolarisation des oreillettes, marquant le début de l'activité électrique cardiaque. Elle apparaît comme une petite onde arrondie et positive avant le complexe QRS. Sa durée normale varie entre 0,08 et 0,11 seconde. Des anomalies de forme ou d'amplitude peuvent indiquer des pathologies auriculaires comme une hypertrophie ou une dilatation.

Intervalle PR (ou PQ)

Cet intervalle s'étend du début de l'onde P jusqu'au début du complexe QRS. Il correspond au temps nécessaire pour que l'influx électrique passe des oreillettes aux ventricules via le nœud auriculo-ventriculaire. Sa durée normale est comprise entre 0,12 et 0,20 seconde. Une prolongation peut signaler un bloc auriculo-ventriculaire, traduisant un trouble de conduction.

Complexe QRS

Le complexe QRS représente la dépolarisation des ventricules, déclenchant leur contraction. Il est composé des ondes Q, R et S, successivement négative, positive, puis à nouveau négative. Sa durée normale est de 0,06 à 0,10 seconde. Un allongement du QRS peut indiquer un bloc de branche ou une tachycardie ventriculaire.

Segment ST

Ce segment relie la fin du complexe QRS au début de l'onde T, correspondant à la période de repolarisation initiale des ventricules. Il apparaît normalement isoélectrique, c'est-à-dire aligné avec la ligne de base. Toute élévation ou dépression de ce segment peut évoquer une ischémie ou un infarctus. C'est un indicateur crucial dans le diagnostic des troubles coronariens.

Onde T

L'onde T traduit la repolarisation des ventricules, marquant leur retour à l'état de repos électrique. Elle se présente généralement sous forme d'une onde arrondie et positive après le segment ST. Des anomalies, comme une onde T inversée ou pointue, peuvent signaler une ischémie ou un trouble électrolytique. Elle joue donc un rôle important dans l'évaluation de la fonction cardiaque.

Intervalle QT

L'intervalle QT mesure la durée totale de l'activité électrique ventriculaire, de la dépolarisation à la repolarisation. Il commence au début du QRS et se termine à la fin de l'onde T. Sa durée varie selon le sexe et la fréquence cardiaque, mais doit rester inférieure à 440 ms (homme) ou 460 ms (femme). Un QT long est un facteur de risque majeur d'arythmies graves comme les torsades de pointes.

I.2.3. Définition de l'électroencéphalogramme (EEG) :

L'électroencéphalogramme (EEG) est une technique d'exploration fonctionnelle non invasive qui permet d'enregistrer l'activité électrique spontanée du cerveau, à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu. Ce signal résulte principalement de l'activité des neurones pyramidaux du cortex cérébral. L'EEG est largement utilisé dans le domaine médical pour détecter des anomalies neurologiques telles que l'épilepsie, les troubles du sommeil, les encéphalopathies, ou encore pour évaluer le niveau de vigilance d'un patient [9].

I.2.3.1. Représentation graphique du signal EEG :

Le signal EEG est représenté graphiquement sous forme de courbes ondulatoires, correspondant aux fluctuations de l'activité électrique cérébrale dans le temps [10].

L'axe horizontal représente le temps (généralement en secondes),

L'axe vertical indique l'amplitude du signal, exprimée en microvolts (μV).

Chaque courbe (ou canal) correspond à une électrode positionnée sur le cuir chevelu selon le système international 10–20. Cette disposition permet de visualiser l'activité électrique dans différentes régions cérébrales (frontale, pariétale, occipitale, etc.).

Afin de faciliter l'interprétation, le signal EEG est souvent filtré et analysé selon des bandes de fréquences spécifiques, aussi appelées rythmes cérébraux :

- Ondes Delta (0,5–4 Hz) : très lentes, elles apparaissent principalement lors du sommeil profond. Elles peuvent aussi être observées dans certains états pathologiques ou lésions cérébrales.
- Ondes Thêta (4–7 Hz) : présentes durant la somnolence, la méditation ou lors de relaxation profonde. Leur excès est parfois lié à des troubles attentionnels.

- Ondes Alpha (8–13 Hz) : fréquemment observées chez un sujet éveillé et détendu, notamment les yeux fermés. Elles témoignent d'un état de repos mental.
- Ondes Bêta (13–30 Hz) : associées à des phases de concentration, d'attention ou de stress psychologique.
- Ondes Gamma (>30 Hz) : plus rapides, elles reflètent une activité cognitive complexe comme l'apprentissage, la mémoire ou la perception sensorielle.

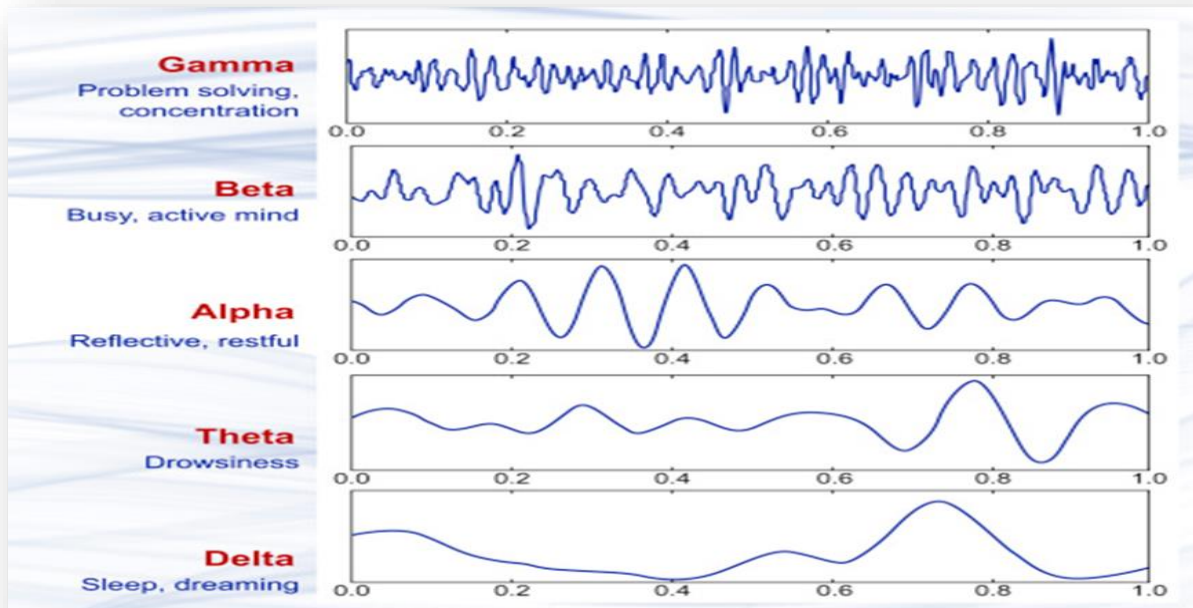


Figure I.4: Représentation graphique de signal EEG

I.2.3.2. Interprétation de signal EEG :

Les bandes de fréquences cérébrales sont des indicateurs essentiels de l'état neurologique et psychologique du patient. Elles sont analysées pour détecter les déséquilibres ou anomalies pouvant traduire des pathologies. Le tableau ci-dessous résume ces bandes [11] :

Bande	Fréquence	Signification
Delta	< 4 Hz	Sommeil profond ou anomalies neurologiques (épilepsie)
Thêta	4–7 Hz	Somnolence, relaxation, troubles de l'attention
Alpha	8–13 Hz	Repos éveillé, yeux fermés, relaxation
Bêta	13–30 Hz	Concentration, activité mentale, stress

Tab I.1 : Bandes de fréquences cérébrales

➤ Interprétation du tableau :

Une dominance des ondes delta est normale durant le sommeil profond, mais leur apparition à l'état d'éveil peut indiquer des troubles neurologiques.

Une augmentation des ondes thêta est souvent observée en cas de fatigue ou de trouble de l'attention.

Les ondes alpha sont un bon indicateur de relaxation. Leur diminution peut refléter un stress ou une hyperactivité mentale.

Un excès d'ondes bêta peut être corrélé à un état anxieux, tandis que leur présence est aussi normale en cas de concentration soutenue.

Les ondes gamma, plus rares, témoignent de processus cognitifs élevés mais sont souvent moins analysées en pratique clinique.

Ainsi, l'interprétation du tracé EEG repose sur l'analyse de l'équilibre entre ces différentes bandes, en fonction de la situation du patient (repos, veille, sommeil, crise...). Une lecture experte du tableau permet d'orienter un diagnostic ou un suivi clinique précis.

I.2.4. Définition du signal PPG

Le signal PPG est un signal optique non invasif permettant de mesurer les variations du volume sanguin dans les tissus périphériques. Il est capté à l'aide de capteurs composés de LED (rouge et infrarouge) et de photodiodes, placés généralement sur le doigt ou le lobe de l'oreille. Ce signal est utilisé pour surveiller en continu la fréquence cardiaque et la saturation en oxygène (SpO_2), en particulier dans les dispositifs de télésurveillance, les montres connectées ou les oxymètres médicaux [12].

I.2.4.1. La représentation graphique de signal SPO2 :

Le signal PPG est visualisé sous forme d'une onde pulsatile régulière, rythmée par les battements du cœur. Chaque pulsation se manifeste par une courbe typique avec :

- Un pic systolique, dû à la contraction du cœur,
- Une descente diastolique, liée à la relaxation,

Lecture graphique :

- Axe horizontal : le temps, exprimé en secondes ou millisecondes ;
- Axe vertical : l'intensité lumineuse reçue par la photodiode, en unités arbitraires.

Ce type de représentation permet une lecture simple et intuitive de la fréquence cardiaque et peut être utilisé pour suivre les variations de SpO_2 lorsque les deux longueurs d'onde (rouge et infrarouge) sont analysées [13].

I.2.4.2 Interprétation du signal PPG

Le signal (PPG) permet d'extraire deux indicateurs physiologiques clés [14] :

► 1. Fréquence cardiaque (BPM)

Calculée à partir des intervalles entre les pics systoliques du signal.

Exprimée en battements par minute (BPM).

Interprétation :

< 60 BPM → Bradycardie

60 – 100 BPM → Normale

> 100 BPM → Tachycardie

► 2. Saturation en oxygène (SpO₂)

Estimée à partir du rapport entre les amplitudes des composantes rouge et infrarouge du signal.

Indique le taux d'oxygène transporté par l'hémoglobine.

Interprétation :

≥ 94 % → Saturation normale

90 – 93 % → Hypoxémie modérée

< 90 % → Hypoxémie sévère

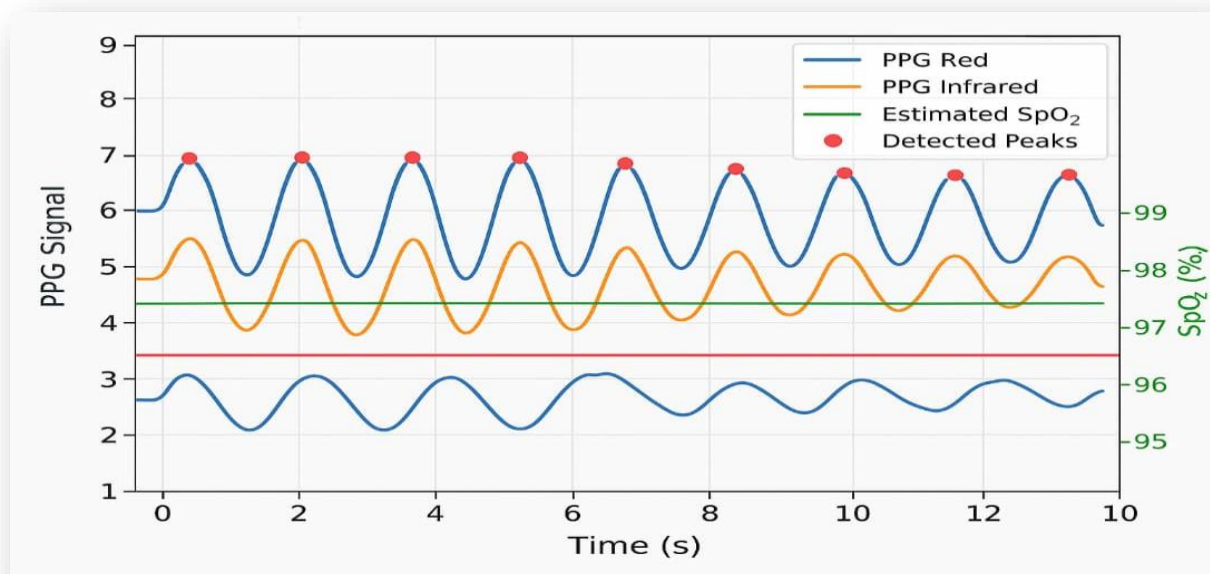


Figure I.5: Représentation graphique de signal PPG

I.2.4.3. Caractéristiques des signaux physiologiques

- ✓ Non-stationnaires : leurs propriétés statistiques varient dans le temps.
- ✓ Faible amplitude : souvent de l'ordre du microvolt (ex. EEG) ou millivolt (ex. ECG).

- ✓ Bruits : sensibles aux interférences électriques, aux mouvements, et aux artefacts (ex. respiration, clignements, etc.).
- ✓ Complexité morphologique : chaque signal a une forme spécifique qui reflète une fonction physiologique (ex. QRS pour ECG).
- ✓ Variabilité inter- et intra-individuelle : les signaux diffèrent selon les patients et selon le moment de l'enregistrement.
- ✓ Multimodalité : plusieurs signaux peuvent être mesurés simultanément (ex. ECG + SPO2 + température) [7].

I.2.4.4. Défis du traitement des signaux physiologiques

Élimination du bruit : retirer les interférences sans altérer l'information utile.

Filtrage adaptatif : s'adapter à la nature dynamique des signaux.

Détection d'événements pertinents : repérer des anomalies (ex. arythmie, crises, etc.).

Analyse en temps réel : indispensable dans les systèmes embarqués et la télémédecine.[7]

Interprétation automatique : nécessite des algorithmes fiables (ex. IA, apprentissage automatique).

Synchronisation : combiner plusieurs signaux pour une analyse conjointe (ex. ECG + pression artérielle).

Traitement avec ressources limitées : surtout dans les dispositifs portables ou embarqués.

Validation clinique : garantir que le traitement des signaux est médicalement pertinent et fiable.

I.3. Intelligence Artificielle dans le Traitement des Signaux en Télémédecine

I.3.1 Introduction à l'IA et ses applications en médecine

L'IA en médecine désigne l'utilisation d'algorithmes et de systèmes capables de simuler des fonctions cognitives humaines, comme l'apprentissage, le raisonnement et la prise de décision. Elle permet d'exploiter d'immenses volumes de données médicales pour assister les professionnels de santé dans leurs tâches quotidiennes. Contrairement à l'humain, l'IA peut analyser rapidement des bases de données complexes, facilitant ainsi des décisions médicales plus éclairées [8].

I.3.2 Types d'algorithmes d'IA appliqués aux signaux physiologiques

I.3.2.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage supervisé repose sur des données étiquetées pour entraîner des modèles capables de prédire ou de classer de nouvelles observations.

Réseaux de neurones artificiels (ANN) : Utilisés pour modéliser des relations complexes entre les entrées (signaux) et les sorties (diagnostics).

Machines à vecteurs de support (SVM) : Efficaces pour la classification binaire, notamment dans la détection d'anomalies cardiaques [15].

I.3.2.2 Apprentissage non supervisé

Cette approche est utilisée lorsque les données ne sont pas étiquetées, permettant de découvrir des structures ou des motifs cachés.

Clustering (K-Means) : Regroupe les données en clusters basés sur la similarité, utile pour identifier des comportements physiologiques similaires.

Analyse en composantes principales (PCA) : Réduit la dimensionnalité des données tout en conservant l'essentiel de l'information, facilitant l'analyse des signaux complexes [15].

I.3.2.3 Apprentissage profond (Deep Learning)

Les techniques d'apprentissage profond sont particulièrement adaptées à l'analyse des signaux physiologiques en raison de leur capacité à modéliser des relations temporelles et spatiales complexes.

- ✓ Réseaux de neurones convolutifs (CNN) : Excellents pour extraire des caractéristiques locales des signaux, tels que les motifs dans les ECG.
- ✓ Réseaux de neurones récurrents (RNN) et LSTM : Conçus pour traiter des données séquentielles, ils sont efficaces pour modéliser les dépendances temporelles dans les signaux physiologiques.
- ✓ Combinaison CNN-LSTM : Cette architecture hybride combine les avantages des CNN et des LSTM, permettant une analyse approfondie des signaux physiologiques [15].

I.3.3 Exemples d'utilisation de l'IA en télémédecine

L'intelligence artificielle (IA) joue un rôle croissant en télémédecine, notamment dans l'analyse des signaux physiologiques

I.3.3.1 Détection automatique des arythmies cardiaques via l'ECG

L'intégration de l'IA dans l'analyse des électrocardiogrammes (ECG) a permis le développement de dispositifs portables capables de détecter automatiquement les arythmies cardiaques. Par exemple, des entreprises comme AliveCor ont conçu des appareils tels que le Kardia Mobile, qui utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique pour identifier des anomalies du rythme cardiaque, facilitant ainsi le diagnostic à distance et en temps réel [16].

I.3.3.2 Prédiction des crises d'épilepsie via l'EEG

L'IA est également utilisée pour prédire les crises d'épilepsie en analysant les signaux électroencéphalographiques (EEG). Des modèles de Deep Learning, tels que les réseaux de neurones convolutifs (CNN), ont été développés pour détecter automatiquement les crises épileptiques à partir des enregistrements EEG. Par exemple, une étude a proposé un cadre efficace basé sur des CNN pour la détection des crises, mettant en évidence l'efficacité de ces modèles dans le domaine des soins de santé intelligents [17].

I.3.4 Défis et perspectives de l'IA en télémédecine

I.3.4.1 Défis de l'IA en télémédecine

Qualité des données et biais algorithmiques

Les algorithmes d'IA nécessitent des données médicales de haute qualité et représentatives. Des ensembles de données biaisés ou incomplets peuvent entraîner des diagnostics erronés, affectant la fiabilité des soins prodigués à distance.

Protection des données personnelles

La collecte et le traitement de données sensibles posent des questions cruciales en matière de confidentialité et de sécurité. Il est impératif de garantir la conformité avec les réglementations en vigueur, telles que le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD), pour protéger les informations des patients.

Acceptabilité par les professionnels de santé

L'adoption de l'IA en télémédecine peut susciter des réticences chez certains professionnels, notamment en raison de craintes liées à l'automatisation excessive et à la perte de contrôle sur les décisions médicales. Il est essentiel de promouvoir une collaboration homme-machine équilibrée.

Cadre réglementaire et éthique

Le développement rapide des technologies d'IA dépasse parfois les cadres réglementaires existants. Il est nécessaire d'établir des normes claires pour encadrer l'utilisation de l'IA en télémédecine, en veillant à respecter les principes éthiques fondamentaux [18].

I.3.4.2 Perspectives de l'IA en télémédecine

Amélioration de l'accès aux soins :

L'IA, combinée à la télémédecine, peut réduire les inégalités d'accès aux soins, notamment dans les zones rurales ou mal desservies, en offrant des services médicaux à distance de qualité.

Personnalisation des traitements :

Grâce à l'analyse de données massives, l'IA permet de développer des approches thérapeutiques personnalisées, adaptées aux caractéristiques spécifiques de chaque patient.

Surveillance continue des patients :

Les outils d'IA facilitent le suivi en temps réel de l'état de santé des patients, permettant une détection précoce des anomalies et une intervention rapide, améliorant ainsi la gestion des maladies chroniques.

Optimisation des ressources médicales

L'automatisation de certaines tâches administratives et diagnostiques libère du temps pour les professionnels de santé, leur permettant de se concentrer davantage sur les aspects humains des soins [18].

Conclusion

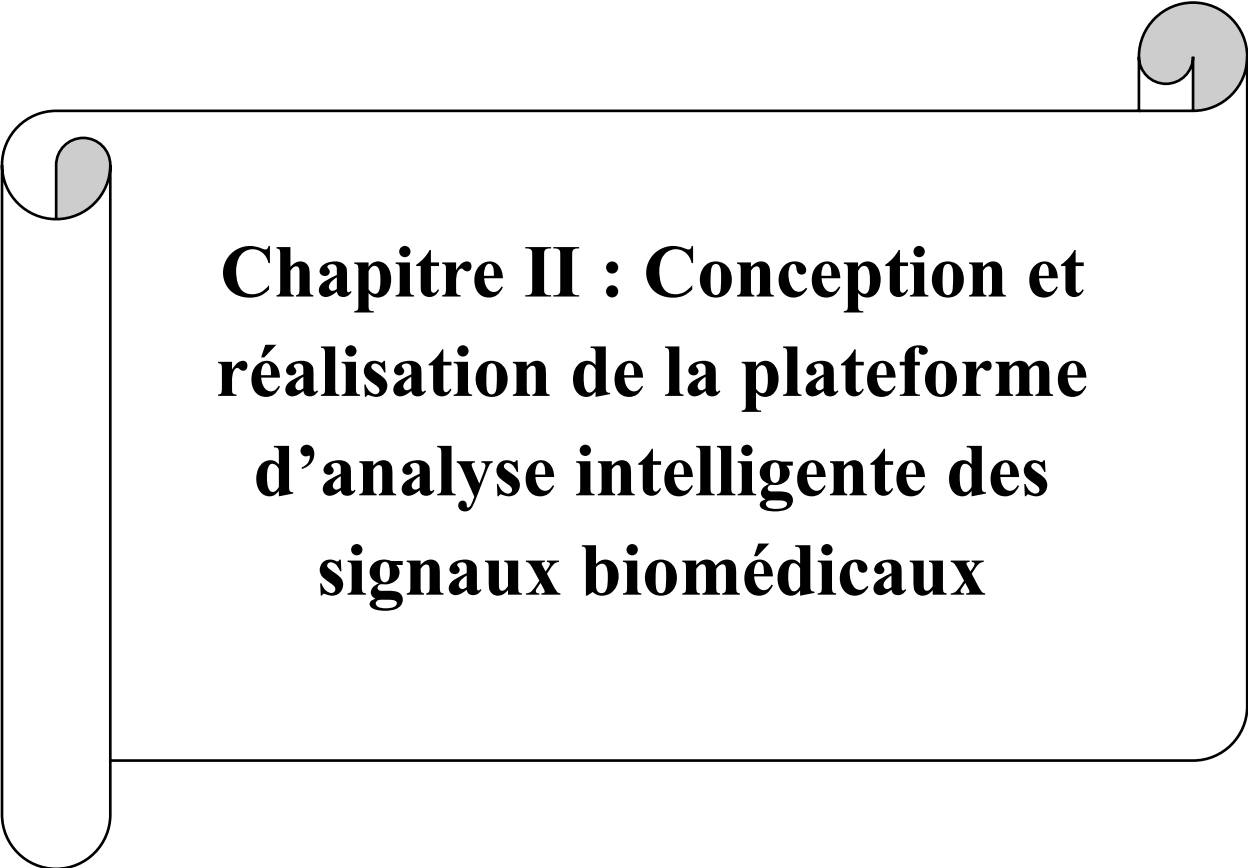
Ce premier chapitre a permis de présenter les bases fondamentales sur lesquelles repose notre projet, en abordant successivement la télémédecine, les signaux physiologiques et les apports de l'intelligence artificielle dans le domaine médical.

La télémédecine s'affirme aujourd'hui comme une solution innovante et incontournable pour garantir un accès équitable aux soins, en particulier dans les zones enclavées. Elle redéfinit le parcours de soins en tirant parti des technologies numériques pour faciliter le suivi médical, améliorer la réactivité diagnostique et alléger les contraintes logistiques.

Par ailleurs, les signaux physiologiques tels que l'ECG, l'EEG et le PPG constituent des marqueurs clés de l'état de santé du patient. Leur acquisition, leur représentation graphique et leur interprétation offrent un aperçu précieux du fonctionnement des systèmes cardiovasculaire, neurologique et circulatoire. Toutefois, ces signaux restent sensibles aux artefacts et nécessitent des traitements numériques adaptés pour en extraire des informations fiables.

Enfin, l'intelligence artificielle ouvre de nouvelles perspectives pour l'analyse automatique des signaux. Elle permet d'enrichir le diagnostic, de détecter des anomalies en temps réel et de proposer une interprétation adaptée au contexte médical du patient.

Ce cadre théorique constitue ainsi le point de départ de la mise en œuvre technique présentée dans les chapitres suivants, où seront détaillées les étapes de conception, de traitement et d'intégration des signaux ECG, EEG et PPG au sein d'une plateforme web moderne dédiée à la télémédecine.

A decorative graphic of a scroll with a black outline and grey shaded ends, framing the chapter title.

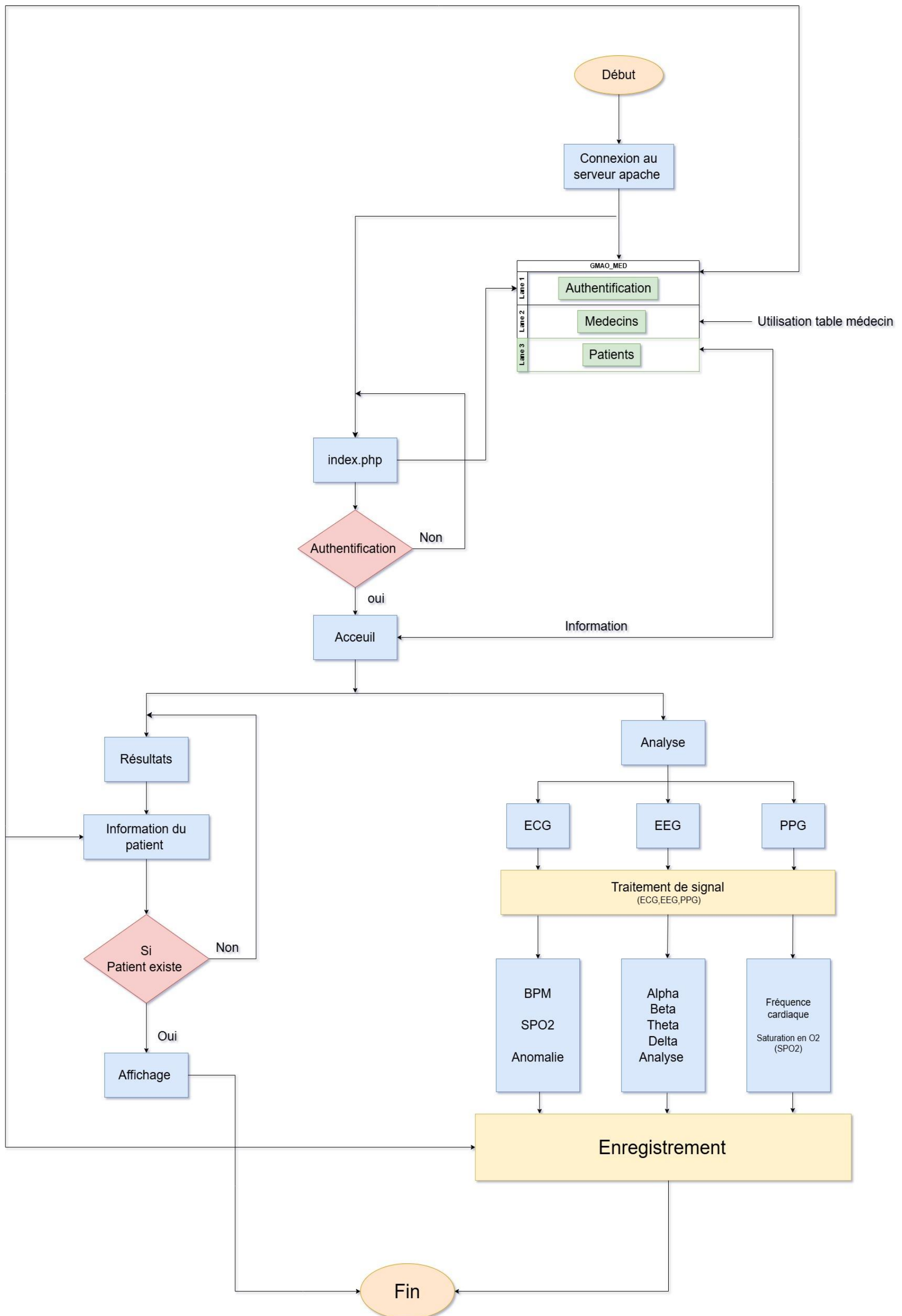
Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

II.1. Introduction :

Dans un contexte médical de plus en plus tourner vers l'utilisation des technologies numériques, la conception d'une plateforme web dédiée à l'analyse intelligente des signaux biomédicaux représente une réponse innovante aux besoins croissants de diagnostic rapide, fiable et accessible. Ce chapitre présente les fondations techniques et méthodologiques ayant permis la mise en place d'une solution intégrée permettant de traiter automatiquement des signaux physiologiques tels que l'électrocardiogramme (ECG), l'électroencéphalogramme (EEG) et le photopléthysmogramme (PPG).

Nous détaillerons dans ces pages les choix technologiques effectués, notamment l'utilisation des langages HTML, CSS, JavaScript et PHP, ainsi que l'intégration d'une base de données MySQL pour la gestion des utilisateurs et la sécurisation de l'accès aux informations sensibles. L'environnement de développement local XAMPP a été adopté comme socle technique pour tester et déployer la plateforme de manière autonome. Par ailleurs, nous exposerons les étapes clés de préparation des données biomédicales, depuis leur formatage au format CSV jusqu'à leur intégration dans le processus d'analyse automatisée.

Ce chapitre constitue donc une étape essentielle dans la compréhension de l'architecture globale de la plateforme, tout en posant les bases techniques nécessaires à l'implémentation des algorithmes de traitement avancés qui seront présentés dans le chapitre suivant.



II.2. Technologies et environnement de développement :

II.2.1. Langages utilisés

II.2.1.1. Langage PHP

♦ Définition :

PHP est un langage de script côté serveur, largement utilisé pour rendre les sites web dynamiques. Il permet de générer du contenu personnalisé en fonction des données ou des interactions de l'utilisateur [19].

♦ Rôle dans la plateforme :

Dans ce projet, PHP est essentiel. Il sert à :

- Lire les données des signaux biomédicaux, comme les fichiers CSV contenant l'enregistrement ECG.
- Traiter ces données pour les préparer à l'affichage ou à l'analyse.
- Générer les pages web dynamiques, incluant les graphiques et les rapports de signal.
- Assurer la communication entre le serveur et le navigateur, notamment via des API simples.
- Gérer la sécurité : authentification des utilisateurs, validation des données sensibles, contrôle d'accès.

II.2.1.2. Langage html

♦ Définition

HTML, qui signifie HyperText Markup Language, est le langage de base du web. Il sert à structurer le contenu des pages (titres, paragraphes, tableaux, images, liens, etc.).

Contrairement à un langage de programmation, HTML ne contient pas de logique ou de calcul, mais il organise les informations affichées à l'écran [20].

♦ Rôle dans la plateforme :

Dans cette plateforme, HTML joue un rôle fondamental. Il est utilisé pour :

- Créer l'ossature des pages web visibles par l'utilisateur ;
- Organiser les différents éléments de la page : texte, boutons, images, graphiques, etc.
- Intégrer les résultats des analyses (comme les signaux ECG affichés dans un graphe) dans une interface claire et accessible ;
- Faciliter l'intégration avec les autres langages, comme CSS pour le style ou JavaScript pour les interactions.

II.2.1.3. Langage CSS

◆ Définition

Le CSS, ou Cascading Style Sheets (feuilles de style en cascade), est un langage utilisé pour styliser et mettre en forme les pages web écrites en HTML.

Il permet de définir l'apparence des éléments (couleurs, tailles, positions, marges, arrière-plans, polices, etc.) sans toucher à la structure du contenu [20].

◆ Rôle dans la plateforme :

Dans cette plateforme, le CSS est utilisé pour :

- Donner un aspect professionnel et agréable aux pages (ex. : couleurs douces, police lisible, boutons attrayants) ;
- Organiser visuellement les éléments comme la barre latérale, les graphiques ou les titres ;
- Garantir une meilleure expérience utilisateur, en facilitant la lecture et la navigation
- Assurer une cohérence visuelle sur toutes les pages, grâce à des feuilles de style réutilisables (index.css, page_d'accueil.css, etc.).

II.2.1.4 Langage Javascript

◆ Définition

JavaScript est un langage de programmation côté client, utilisé dans les navigateurs pour rendre les pages web interactives et dynamiques.

Contrairement à HTML qui structure le contenu, et CSS qui le stylise, JavaScript permet d'agir

sur les éléments de la page : réagir aux clics, modifier des contenus en direct, charger des données sans recharger la page, etc [21].

♦ Rôle dans la plateforme :

Dans cette plateforme, JavaScript est utilisé pour :

- Permettre à l'utilisateur de naviguer entre les pages (comme "Accueil", "Analyse signal", etc.) sans quitter la page principale, grâce à la balise <iframe> contrôlée dynamiquement ;
- Charger et afficher les signaux biomédicaux (ECG, EEG, PPG) sous forme de graphiques, en récupérant les données CSV et en les traçant avec une bibliothèque graphique ;
- Offrir une expérience utilisateur fluide, rapide et intuitive.

II.2.2. Base de données SQL et fichiers CSV

II.2.2.1. Définition d'une base de données SQL :

Une base de données SQL est un système qui permet de stocker, organiser, interroger et gérer des données de manière structurée. Les données y sont réparties en tables, similaires à des tableaux, où chaque ligne représente un enregistrement et chaque colonne un attribut. Le langage SQL est utilisé pour effectuer des opérations comme l'ajout, la mise à jour, la suppression ou la recherche de données [22].

II.2.2.2 Rôle de la base de données dans la plateforme :

Dans ce projet, une base de données MySQL a été intégrée via phpMyAdmin sous XAMPP, afin de gérer les utilisateurs de la plateforme. Elle contient notamment une table appelée "médecin", qui joue un rôle essentiel dans :

- L'authentification des utilisateurs (connexion avec identifiant et mot de passe)
- La gestion des sessions pour sécuriser l'accès à certaines pages
- La possibilité, dans des évolutions futures, d'associer chaque médecin à ses patients et aux résultats de leurs analyses.

II.2.3. Définition des fichiers CSV

Les fichiers CSV sont des fichiers texte dans lesquels les données sont organisées en lignes et colonnes, séparées par des virgules. Ce format est très utilisé pour le traitement de données scientifiques car il est simple, lisible par l'humain, et compatible avec de nombreux langages (PHP, Python, Excel, etc.) [23].

II.2.3.1. Rôle des fichiers CSV dans la plateforme :

La plateforme utilise des fichiers CSV pour charger et analyser les signaux biomédicaux. Chaque type de signal est enregistré dans un fichier spécifique, avec une structure adaptée :

- ECG (ecg.csv) : deux colonnes (temps, amplitude) → utilisé pour détecter les pics PQRST, calculer le rythme cardiaque.
- EEG (eeg.csv) : quatre colonnes (ondes alpha, bêta, thêta, delta) → permet d'analyser l'activité cérébrale.
- PPG (ppg.csv) : deux colonnes (lumière rouge, lumière infrarouge) → sert à estimer le rythme cardiaque et la saturation en oxygène (SPO₂).

Ces fichiers sont :

- Lus côté serveur avec PHP, pour être validés et structurés ;
- Envoyés côté client via JavaScript, pour affichage graphique et analyse interactive.

II.2.4. Environnement de développement : XAMPP

II.2.4.1. Définition :

XAMPP est un environnement de développement local gratuit, qui regroupe plusieurs outils essentiels pour créer et tester des applications web. Il comprend :

- Apache : un serveur web,
- MySQL : un système de gestion de base de données,
- PHP : le moteur de script côté serveur,
- Et phpMyAdmin : une interface web pour gérer les bases de données.

Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

Il permet aux développeurs de travailler en local, sans dépendre d'un serveur distant, ce qui facilite le développement, les tests et les débogages [24].



Figure II.1: Interface XAMPP – Modules Apache et MySQL

II.2.4.2. Rôle de XAMPP dans la plateforme

Dans le cadre de ce projet, XAMPP constitue l'environnement principal de développement et d'exécution. Il est utilisé pour :

- Héberger les fichiers de l'application (.php, .html, .csv, .js, etc.) dans le dossier htdocs.
- Exécuter les scripts PHP (comme main.php, check_login.php, api_ecg.php) pour lire les fichiers CSV, gérer les connexions et produire des pages dynamiques.
- Gérer la base de données MySQL, notamment la table "médecin" utilisée pour l'authentification.
- Tester localement toutes les fonctionnalités de la plateforme avant une éventuelle mise en ligne (accès multi-utilisateur, affichage des signaux, sécurité, etc.).

II.3. Préparation des Données Biomédicales

II.3.1. Description des signaux ECG, EEG et PPG

II.3.1.1. Définition et description des signaux

Dans ce projet, trois types de signaux biomédicaux sont utilisés : ECG, EEG et PPG. Chacun correspond à un paramètre physiologique spécifique et nécessite une préparation particulière avant traitement.

II.3.1.1.1. Signal ECG

L'ECG est un signal qui mesure l'activité électrique du cœur. Il est obtenu en plaçant des électrodes à la surface de la peau, généralement sur la poitrine, les bras et les jambes.

Ce signal permet d'analyser les différentes phases du cycle cardiaque (ondes P, QRS, T) et de détecter des anomalies comme la tachycardie, la bradycardie ou la fibrillation auriculaire [25].

- Composantes principales : onde P, complexe QRS, onde T.
- Utilisation dans la plateforme : détection des pics R, calcul du rythme cardiaque (BPM), affichage graphique du signal.
- Format CSV : deux colonnes (temps, amplitude en mV).

II.3.1.1.2. Signal EEG

L'EEG est un signal qui reflète l'activité électrique du cerveau, captée à l'aide d'électrodes placées sur le cuir chevelu.

Il permet de détecter les différentes ondes cérébrales, associées à différents états mentaux (relaxation, concentration, sommeil, etc.) ou à certaines pathologies (épilepsie, coma...) [26].

Bandes principales :

- ♦ Alpha (8–13 Hz) → relaxation, yeux fermés
- ♦ Bêta (13–30 Hz) → activité mentale intense
- ♦ Thêta (4–8 Hz) → somnolence
- ♦ Delta (0,5–4 Hz) → sommeil profond

Utilisation dans la plateforme : extraction des bandes, analyse des anomalies avec IA.

Format CSV : quatre colonnes (valeurs Alpha, Bêta, Thêta, Delta).

II.3.1.1.3. Signal PPG

Le PPG est un signal optique utilisé pour mesurer la variation du volume sanguin dans les tissus, généralement avec un capteur placé au doigt ou au poignet.

Il repose sur l'absorption de la lumière par le sang à travers la peau, en utilisant deux longueurs d'onde : rouge et infrarouge [27].

- Applications : calcul du rythme cardiaque, estimation de la saturation en oxygène (SPO₂).
- Utilisation dans la plateforme : affichage du signal, détection de pics, calcul de SPO₂.
- Format CSV : deux colonnes (rouge, infrarouge).

II.3.2. Format et importation des données CSV

II.3.2.1 Format des fichiers CSV

Les fichiers CSV sont utilisés dans cette plateforme pour stocker les signaux biomédicaux bruts. Chaque ligne du fichier représente une mesure, et les colonnes correspondent aux paramètres physiologiques enregistrés. Le choix de ce format repose sur sa simplicité, sa portabilité, et sa compatibilité avec les langages web comme PHP et JavaScript [23].

II.3.2.2. Structure des fichiers CSV utilisés

Signal	Fichier	Contenu (colonnes)
ECG	ecg2.csv	Temps (s), Amplitude (mV)
EEG	eeg_matrice.csv	Alpha, Bêta, Thêta, Delta (μ V)
PPG	spo2_matrice.csv	Lumière rouge, Lumière infrarouge (unités relatives)

Tab II.1: Fichiers CSV utilisés

II.3.2.3. Importation des fichiers CSV dans la plateforme

Les données des fichiers CSV sont importées et traitées automatiquement dès que l'utilisateur demande une analyse. Cette opération est gérée côté serveur par des scripts PHP, qui lisent les fichiers ligne par ligne, extraient les valeurs numériques, et les organisent dans des structures de données exploitables.

- En PHP, l'importation se fait à l'aide de fonctions comme `fopen()`, `fgetcsv()` et `fclose()` ;
- En JavaScript, les données peuvent aussi être lues côté client (par exemple via `fetch()`), notamment pour l'affichage graphique dynamique des signaux.

II.3.3. Application des algorithmes de Marquardt et Levenberg

II.3.3.1. Définition et principe général

Les algorithmes de Levenberg et Marquardt sont des méthodes d'optimisation non linéaire. Ils sont souvent combinés pour former l'algorithme Levenberg-Marquardt, très utilisé dans l'ajustement de courbes ou l'apprentissage de réseaux de neurones.

Ce type d'algorithme est utile lorsque l'on cherche à ajuster un modèle mathématique à des données expérimentales, même si la relation entre les variables n'est pas linéaire [28].

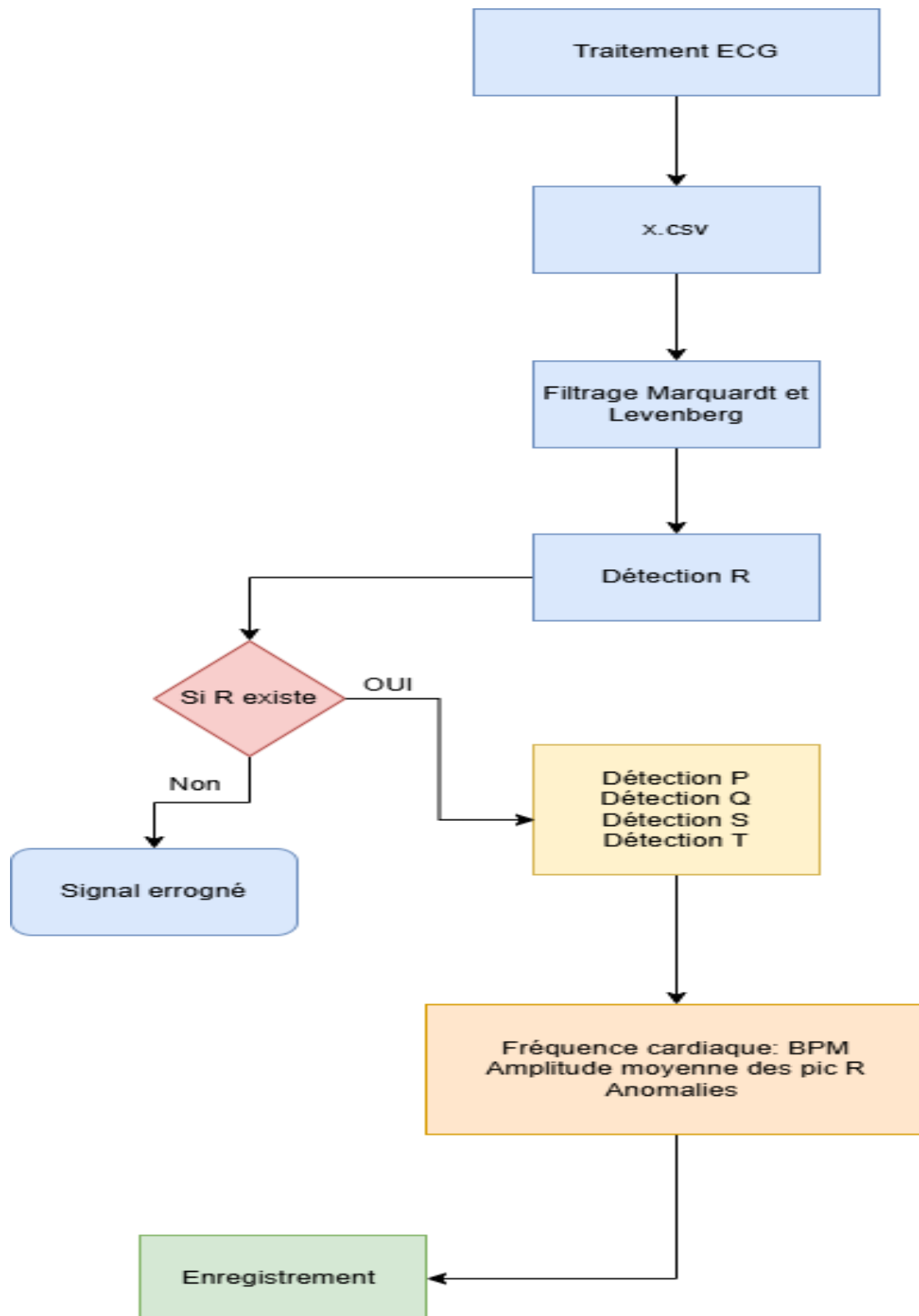
II.3.3.2. Application théorique dans la plateforme

- Modéliser les signaux physiologiques afin de les rendre plus lisses ou représentatifs.
- Optimiser les paramètres d'un modèle de détection de pics ou d'anomalies.
- Former un modèle d'intelligence artificielle (par exemple, un réseau de neurones) pour détecter des anomalies cardiaques ou neurologiques.

II.3.3.3. État d'implémentation

- Améliorer la précision du filtrage des signaux bruités.
- Affiner la détection automatique des anomalies.
- Réduire les faux positifs dans les résultats d'analyse par IA.
- Traitement du signal ECG

II.4. Traitement de signal ECG :



Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

Le traitement du signal électrocardiographique (ECG) dans la plateforme repose sur plusieurs étapes clés allant de l'importation du signal brut à l'extraction des composantes cardiaques (P, Q, R, S, T). L'objectif est d'offrir une analyse fiable, dynamique et accessible à travers une interface web interactive.

II.4.1 Prétraitement du signal

Le signal ECG est tout d'abord importé depuis un fichier CSV à l'aide de la bibliothèque PapaParse.js, qui permet de lire les données ligne par ligne dans le navigateur. Chaque ligne correspond à un échantillon du signal, mesuré à une fréquence de 360 Hz, soit 360 points par seconde.

Avant toute analyse, le signal est normalisé pour le ramener dans une plage commune (entre -1 et 1), facilitant l'interprétation et l'automatisation du traitement.

Un lissage est ensuite appliqué à l'aide d'une moyenne glissante sur trois points (via la fonction `smoothData()`), afin de réduire les fluctuations rapides et les bruits résiduels.

II.4.2 Filtrage du signal

Pour améliorer la lisibilité du tracé, deux types de filtres numériques sont utilisés dans le fichier ECG.js :

- Filtre passe-haut (≥ 0.5 Hz) : élimine les dérives lentes dues à la respiration ou aux mouvements corporels.
- Filtre passe-bas (≤ 20 Hz) : supprime les interférences de haute fréquence, telles que les bruits musculaires ou les parasites électriques.

Ces filtres sont appliqués à l'aide de fonctions JavaScript personnalisées, et permettent de stabiliser la ligne de base du signal, en le rendant plus net et exploitable.

II.4.3 Détection des ondes PQRST

L'étape suivante consiste à extraire les composantes caractéristiques du cycle cardiaque :

➤ Détection du pic R

Les pics R sont les sommets les plus visibles du signal ECG. Ils sont détectés automatiquement à l'aide d'un seuil dynamique calculé ainsi :

$$Seuil = moyenne + 1.2 \times \text{écart} - type$$

Tout échantillon dépassant ce seuil et représentant un maximum local est identifié comme un **pic R**.

➤ Détection des autres ondes (P, Q, S, T)

À partir de chaque pic R détecté, le script procède comme suit :

- **Avant le pic R :**
 - À -60 échantillons (~166 ms) : recherche du minimum local → pic Q
 - À -120 échantillons (~333 ms) : recherche du maximum local → pic P
- **Après le pic R :**
 - À +60 échantillons (~166 ms) : recherche du minimum local → pic S
 - À +120 échantillons (~333 ms) : recherche du maximum local → pic T

Ces opérations sont réalisées à l'aide des fonctions `findMinInWindow()` et `findMaxInWindow()` sur des fenêtres temporelles glissantes autour de chaque pic R.

II.4.4 Visualisation graphique

L'affichage des résultats s'effectue via une interface interactive développée avec la bibliothèque Chart.js. Cette interface permet de visualiser le signal ECG traité sous forme de courbes dynamiques et lisibles.

Chaque onde du cycle cardiaque (P, Q, R, S, T) est représentée par une couleur différente afin de les identifier plus facilement visuellement :

Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

- Le pic R est affiché en rouge, car il constitue l'élément central du cycle cardiaque.
- L'onde P est tracée en bleu, précédant l'activation ventriculaire.
- L'onde Q apparaît en jaune, immédiatement avant le pic R.
- L'onde S, suivant R, est représentée en vert.
- L'onde T, marquant la repolarisation ventriculaire, est colorée en violet.

Les courbes sont alignées dans le temps, et l'utilisateur peut interagir avec le graphique grâce à des options comme le zoom, le défilement ou l'affichage des valeurs au survol. Ces outils rendent l'analyse plus simple et compréhensible, même pour un public non spécialisé

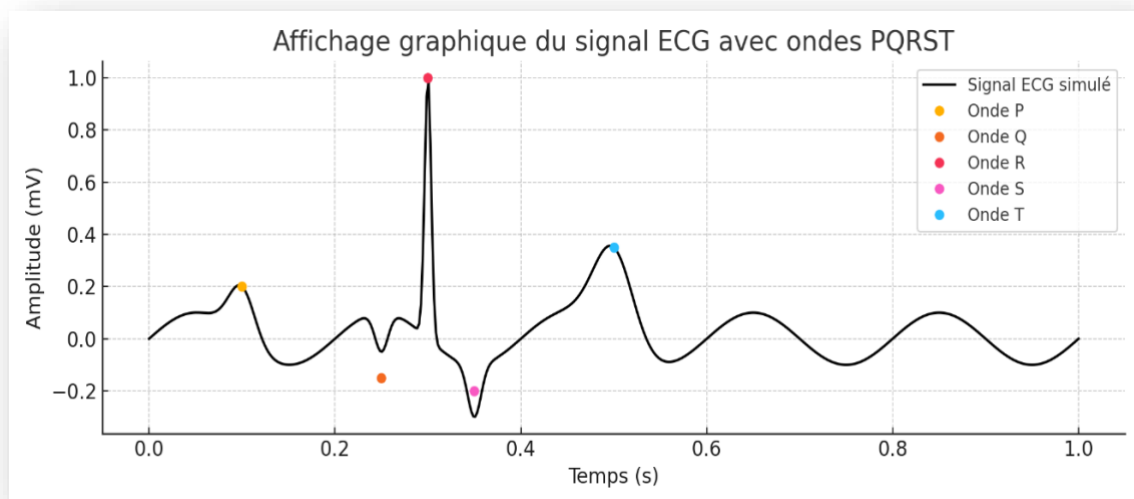
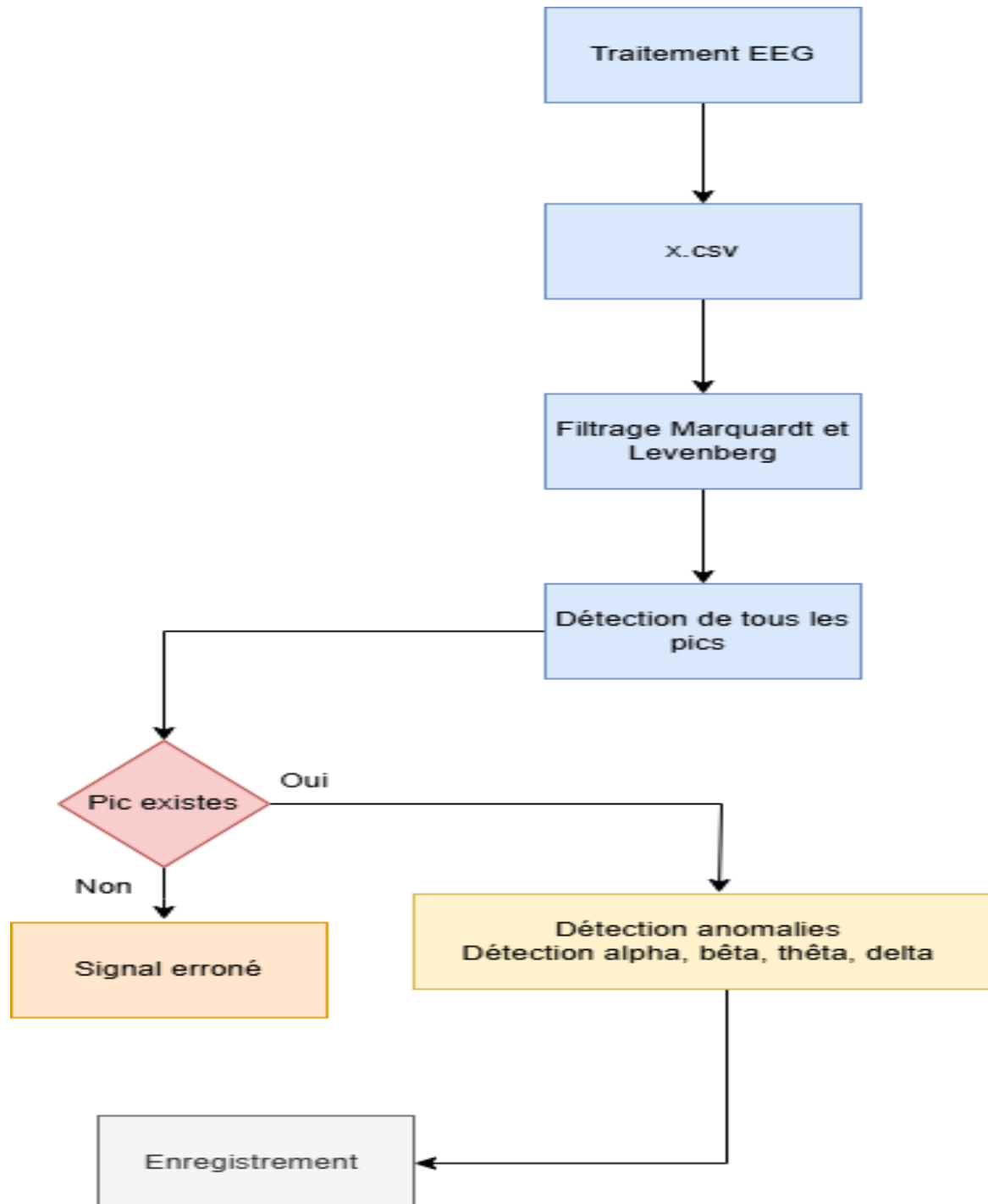


Figure II.2 : Le graphique de signal ECG

II.5. Traitement du signal EEG dans la plateforme



Le traitement du signal électroencéphalographique (EEG) dans la plateforme repose sur une chaîne d'étapes visant à faciliter l'analyse de l'activité cérébrale en temps réel. La plateforme exploite des fichiers EEG déjà organisés par bandes de fréquences, ce qui permet une analyse ciblée et rapide des ondes cérébrales, un repérage d'anomalies éventuelles, ainsi qu'une visualisation claire des signaux.

II.5.1. Prétraitement et filtrage du signal EEG

L'EEG est un signal électrique cérébral mesuré à l'aide d'électrodes disposées sur le cuir chevelu. Il est fortement sensible aux perturbations (mouvements, bruits ambiants, interférences musculaires), d'où la nécessité d'un traitement préalable.

Dans cette plateforme, le fichier EEG importé au format CSV contient quatre colonnes de données distinctes, correspondant directement aux bandes de fréquence filtrées :

- Delta (0.5–4 Hz),
- Thêta (4–8 Hz),
- Alpha (8–13 Hz),
- Beta (13–30 Hz).

II.5.2. Détection des ondes cérébrales (alpha, bêta, thêta, delta)

Chaque onde est ensuite analysée pour évaluer son niveau d'activité. Cela se fait par le calcul de la moyenne de l'amplitude pour chaque bande. Cette moyenne permet de donner une estimation de l'intensité du signal, ce qui est utile pour interpréter les états mentaux du sujet (repos, stress, fatigue, etc.).

Cette analyse constitue une base simple mais efficace pour observer l'évolution cérébrale dans le temps et sert d'entrée à la détection automatisée.

La plateforme calcule la moyenne d'amplitude de chaque bande EEG afin de déterminer le niveau d'activité cérébrale dominant chez le patient. Cette méthode permet de caractériser rapidement l'état mental global.

II.5.3. Détection d'anomalies neurologiques avec IA simple

Un système de règles médicales simples a été implémenté pour détecter des anomalies potentielles à partir des valeurs moyennes de chaque onde EEG. Par exemple :

- Une activité alpha élevée peut indiquer une sédation excessive,
- Une activité bêta anormalement haute peut traduire un état de stress ou d'agitation,
- Une présence exagérée d'ondes delta ou thêta peut signaler un état de sommeil profond ou une pathologie neurologique.

II.5.4. Visualisation du signal EEG

Une fois les signaux EEG traités et séparés en différentes bandes (alpha, bêta, thêta, delta), ils sont préparés pour l'affichage. Chaque bande est associée à une couleur et organisée sous forme de série temporelle.

Cette préparation permet d'afficher plus tard les courbes EEG de manière lisible, avec une visualisation claire de l'activité cérébrale. La bibliothèque **Plotly.js** est utilisée pour tracer ces courbes dans l'interface de la plateforme.

II.5.5. Lecture multivoies EEG

La plateforme prend également en charge l'analyse de signaux multivoies EEG, issus de plusieurs électrodes placées à différents points du cuir chevelu.

Un second fichier CSV brut, structuré avec les colonnes Time, MV1, MV2, MV3, MV4, permet de visualiser séparément les signaux enregistrés par chaque voie

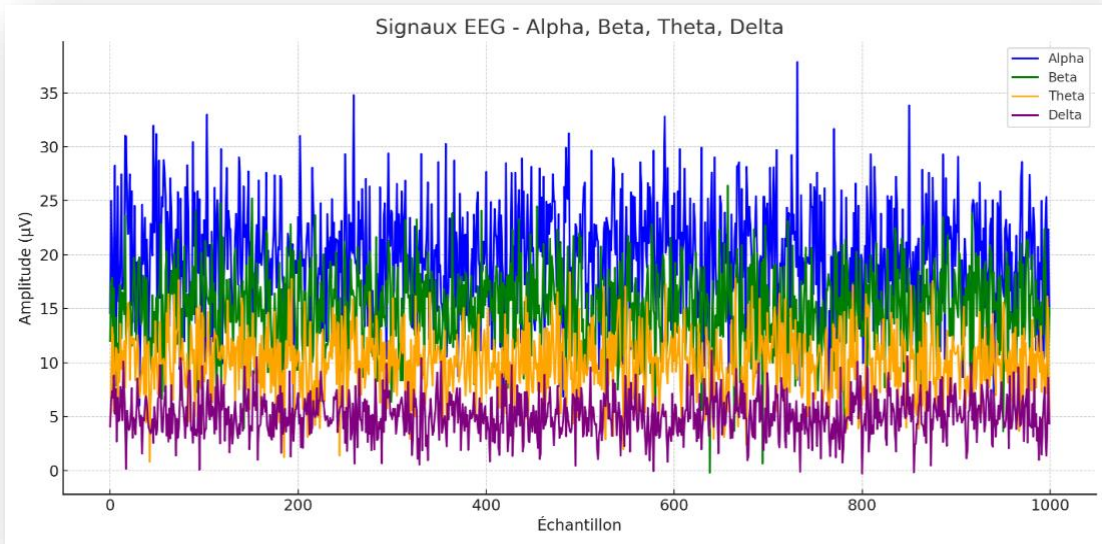
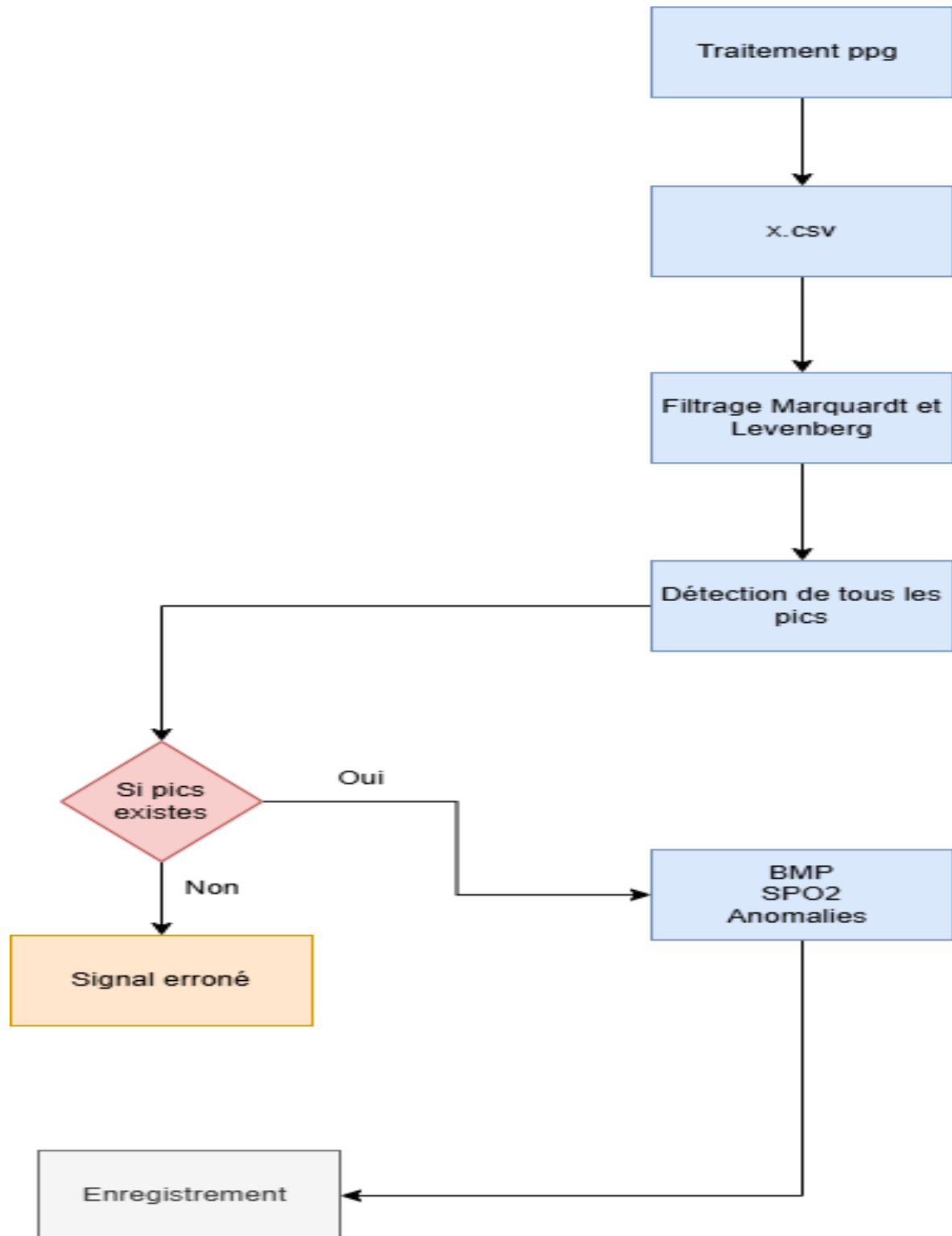


Figure II.3: Le graphique de signal EEG

II.6. Traitement du Signal PPG



Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

Dans cette partie de la plateforme, nous nous sommes concentrés sur le traitement du signal PPG (Photopléthysmogramme), utilisé principalement pour estimer la saturation en oxygène (SpO_2) et détecter la fréquence cardiaque.

Le signal provient d'un capteur optique qui enregistre la lumière absorbée par le sang à deux longueurs d'onde : rouge et infrarouge. Ces deux signaux sont enregistrés dans un fichier CSV contenant deux colonnes.

II.5.1. Prétraitement du signal

Avant d'analyser quoi que ce soit, on commence par nettoyer les données importées. Cela signifie :

- Supprimer les lignes vides,
- Corriger les écarts trop irréguliers,
- Aligner les deux signaux (rouge et infrarouge) pour qu'ils soient bien synchronisés.

Ce prétraitement est essentiel pour éviter les erreurs lors du filtrage et de la détection des pics.

II.5.2. Filtrage du signal avec la méthode Levenberg–Marquardt

Pour rendre le signal plus lisible, on applique un filtrage. Ce filtrage combine plusieurs techniques :

- Un filtre passe-bas, qui supprime les bruits de haute fréquence,
- Un lissage par moyenne glissante, qui adoucit les courbes,
- Et un filtre dynamique optimisé grâce à la méthode Levenberg–Marquardt, qui permet d'ajuster les paramètres pour mieux faire ressortir les formes typiques du signal PPG.

Grâce à cette combinaison, le signal devient plus stable et prêt pour la détection des points importants.

II.5.3. Fréquence du signal SpO₂

Le signal est enregistré à une fréquence d'environ 50 Hz, c'est-à-dire qu'on récupère 50 mesures par seconde. Cette fréquence est suffisante pour suivre les variations du volume sanguin et détecter les cycles cardiaques avec précision.

II.5.4. Détection des pics du signal

Une fois le signal filtré, l'algorithme cherche automatiquement les pics systoliques, c'est-à-dire les sommets qui correspondent à chaque battement de cœur.

Pour cela, la plateforme :

- Calcule une moyenne et un écart-type du signal pour définir un seuil dynamique,
- Cherche les points les plus hauts (maximums locaux) qui dépassent ce seuil,
- S'assure qu'il y a une distance minimale entre deux pics pour éviter de compter deux fois le même battement.

La détection commence par le premier pic R, considéré comme le premier vrai battement détecté. À partir de ce point, le reste du signal est analysé de manière régulière.

II.5.5. Estimation de la saturation en oxygène (SpO₂)

Une fois les pics détectés, la plateforme peut estimer la saturation en oxygène dans le sang. Pour cela, elle utilise les valeurs maximales des signaux rouge et infrarouge, et applique une formule simple :

$$SpO_2 = 110 - 25 \times \left(\frac{\text{Amplitude rouge}}{\text{Amplitude infrarouge}} \right)$$

Plus ce ratio est faible, plus la saturation est élevée. Une valeur normale de SpO₂ est en général supérieure à 95 %.

II.5.6. Calcul du rythme cardiaque (BPM)

À partir des positions des pics, on calcule les intervalles entre deux battements successifs, puis on en déduit la fréquence cardiaque avec la formule :

$$BMP = \frac{60}{\text{Durée moyenne entre deux pics (en secondes)}}$$

Ce calcul permet de suivre le rythme du patient en temps réel, et d'alerter si celui-ci est trop lent (bradycardie) ou trop rapide (tachycardie).

II.6.5 Affichage graphique du signal PPG

Enfin, pour valider visuellement les résultats et offrir une expérience utilisateur complète, trois graphiques sont générés grâce à la bibliothèque Chart.js :

- Le premier montre le signal PPG Rouge, avec les pics détectés indiqués visuellement.
- Le second affiche le signal Infrarouge, également annoté de ses pics.
- Le troisième trace l'évolution temporelle de la SpO₂ estimée, avec une ligne rouge horizontale à 90 % qui sert de seuil d'alerte.

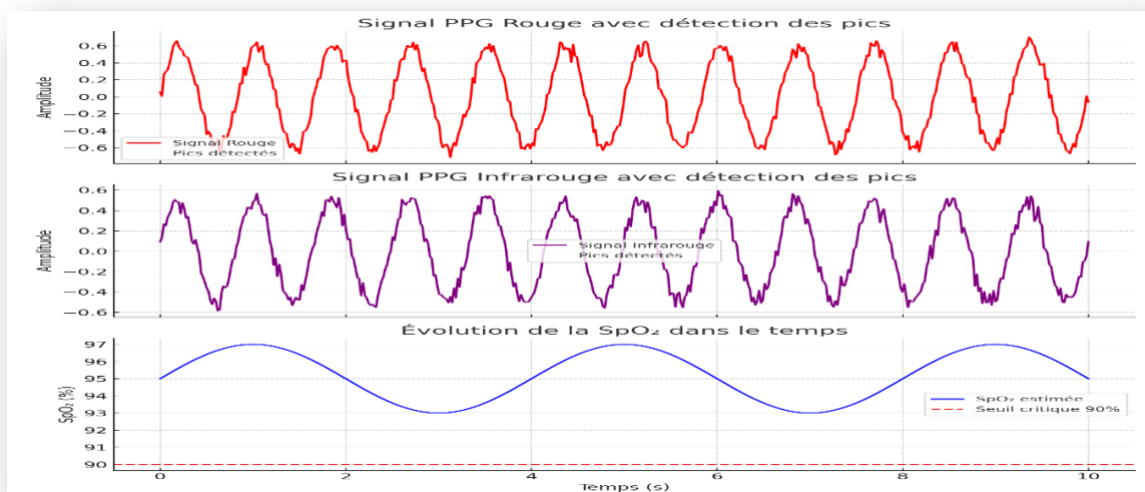


Figure II.4 : les graphiques de signal PPG

II.7. Détection d'anomalie :

Pour la détection d'anomalies, nous avons intégré un modèle téléchargé depuis la base de données MIT-BIH, pour détecter automatiquement les anomalies physiologiques à partir des signaux importés, en s'appuyant sur des techniques issues du Deep Learning.

L'implémentation s'appuie sur une fonction JavaScript intégrée dans la plateforme. Une fois le signal prétraité (filtré et normalisé), certaines valeurs clés comme les intervalles R–R, la durée QT et les amplitudes des pics sont extraites. Ces valeurs sont ensuite comparées à des seuils connus (issus des recommandations cliniques) et évaluées par une logique décisionnelle.

II.8. Partage des Résultats sur le Réseau

L'un des objectifs de la plateforme est de permettre l'accès distant aux résultats d'analyse des signaux physiologiques (ECG, EEG, PPG). Cela facilite la consultation par des médecins, chercheurs ou patients via une interface web simple et sécurisée.

II.8.1. Mise en place d'un serveur local avec XAMPP

Pour pouvoir accéder à notre plateforme depuis un simple navigateur, même sans connexion internet, nous avons utilisé **XAMPP**. C'est un outil tout-en-un qui installe automatiquement un serveur local avec Apache (pour héberger les pages web), PHP (pour exécuter les scripts côté serveur), et MySQL (pour gérer une base de données si besoin).

Concrètement, une fois XAMPP installé sur notre machine, on a :

- Déposé tous les fichiers du projet (HTML, JS, CSV, PHP) dans le dossier htdocs/ ;
- Activé le serveur Apache via l'interface de XAMPP ;
- Ouvert un navigateur web et accédé à notre plateforme à l'adresse :
<http://localhost/> suivi du nom de notre dossier.

Cela permet de simuler un vrai site web en local, pour tester, afficher les résultats, visualiser les signaux, et simuler un usage professionnel sans dépendre d'un serveur distant. C'est simple, efficace, et très pratique pendant le développement.

II.8.2. Accès aux résultats via l'interface web

Une fois le serveur en route, toute l'interaction avec l'utilisateur se fait via une interface web très intuitive, que nous avons développée en HTML, CSS et JavaScript.

Depuis cette interface :

- L'utilisateur peut importer un fichier CSV contenant des données ECG, EEG ou PPG.
- Il peut ensuite lancer automatiquement les analyses : le signal est filtré, les pics sont détectés, le BPM ou la SpO₂ est calculé, etc.
- Ensuite, des graphiques interactifs s'affichent directement (avec Chart.js) pour représenter les signaux et les résultats.
- Enfin, la plateforme affiche un diagnostic textuel clair, généré à partir de règles simples (ex. : bradycardie si BPM < 60, hypoxie si SpO₂ < 90 %, etc.).

Tout cela se fait dans le navigateur, sans rien installer. La plateforme est donc prête à être utilisée par un médecin, un étudiant ou un chercheur en quelques clics.

II.8.3. Sécurité et gestion des utilisateurs

- Pour garantir la sécurité et dirigé chaque médecin a sa propre plateforme (ses tables de base de données) l'interface de connexion à la base de données des médecins, qui constitue une étape cruciale pour garantir l'accès sécurisé aux informations sensibles. L'interface est structurée de manière claire et intuitive, avec deux champs principaux : un champ pour saisir l'identifiant utilisateur et un autre pour entrer le mot de passe, masqué par des points pour assurer la confidentialité. En dessous de ces champs, un bouton permet de soumettre les informations saisies.
- Un aspect technique important de cette interface est l'utilisation du chiffrement CHAP (Challenge-Handshake Authentication Protocol). Ce protocole d'authentification basé sur un défi-réponse assure une sécurité accrue en évitant la transmission directe du mot de passe en clair. Lorsque l'utilisateur clique sur le bouton de soumission, le serveur génère un défi cryptographique, que l'utilisateur utilise conjointement avec son mot de passe pour générer une réponse. Cette réponse est ensuite transmise au serveur, qui la compare avec la

Chapitre II : Conception et réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux

valeur attendue pour valider l'authenticité de l'utilisateur. Le chiffrement CHAP joue ainsi un rôle essentiel en renforçant la protection des données sensibles et en empêchant les attaques potentielles liées à la capture de mots de passe.

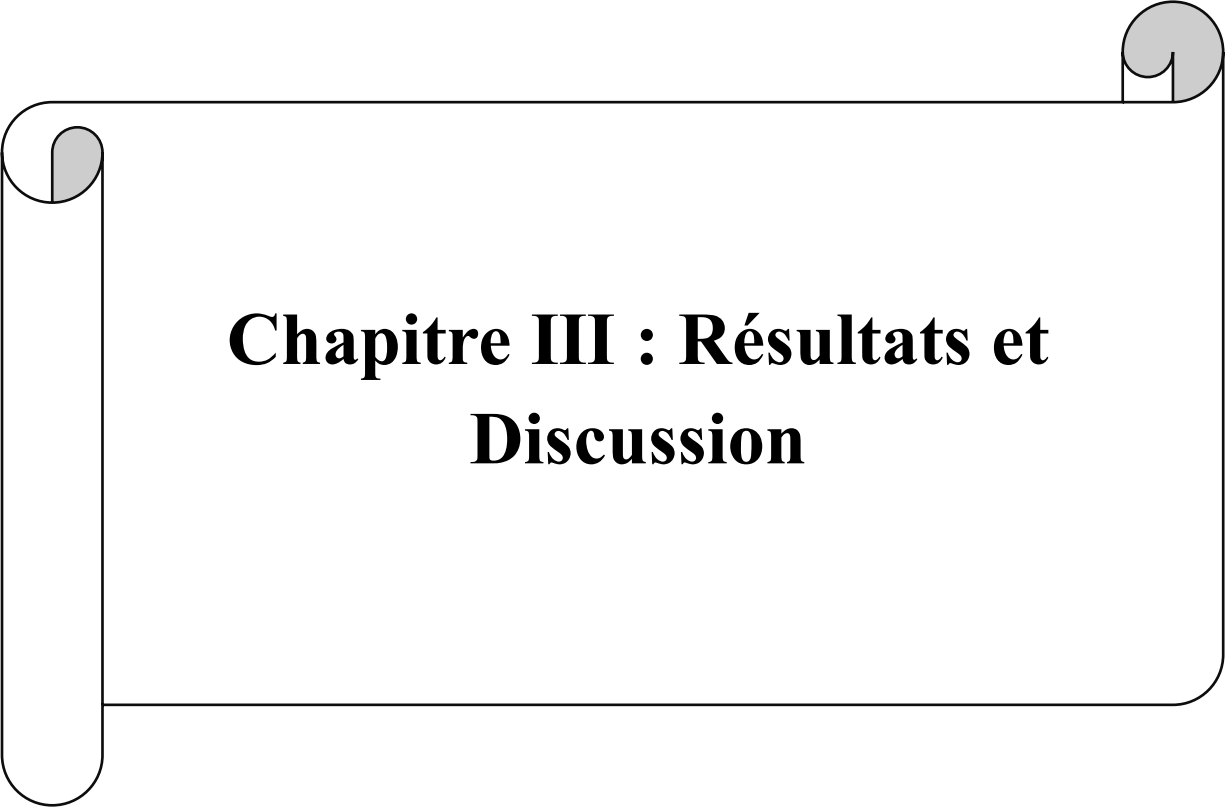
- Toutes ces informations sont envoyées avec une requête SQL (`select * nom mot_de_passe from 'authentification' ('nomdemedecin', 'mot de passe')`)
- Cette interface représente donc non seulement une étape pratique pour accéder à la base de données, mais également un élément fondamental de la stratégie de sécurité mise en place pour protéger les informations médicales confidentielles.

Conclusion

La conception et la réalisation de la plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux ont permis de poser les bases solides d'un outil fonctionnel, intuitif et adapté aux exigences actuelles du domaine médical. Grâce à l'utilisation de technologies web modernes et accessibles (HTML, CSS, JavaScript, PHP), associées à un environnement de développement local performant (XAMPP), la plateforme offre une interface conviviale et dynamique, capable de traiter efficacement des signaux ECG, EEG et PPG.

L'intégration de fichiers CSV structurés a permis de standardiser l'importation des données, tandis que l'usage d'algorithmes de filtrage et d'ajustement non linéaire, tels que celui de Levenberg-Marquardt, a contribué à améliorer la qualité des signaux analysés. Enfin, la mise en place d'un système d'authentification sécurisé, reposant sur le chiffrement CHAP, souligne l'engagement à protéger les données médicales sensibles et garantir une utilisation responsable de la plateforme.

Ainsi, ce chapitre marque une étape cruciale dans la construction du projet, en établissant une architecture robuste et modulaire, prête à accueillir les traitements spécifiques et les analyses intelligentes développés dans la suite du mémoire.

A decorative frame resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip on the top, both with rounded ends and a light gray fill. The frame encloses the chapter title.

Chapitre III : Résultats et Discussion

Introduction

Dans ce troisième chapitre, nous présentons les résultats obtenus à la suite de la mise en œuvre de notre plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux. L'objectif est de montrer concrètement comment les différentes fonctionnalités développées du traitement des signaux à l'affichage des résultats s'intègrent dans un environnement web accessible, interactif et utile pour l'interprétation médicale.

Chaque section de ce chapitre illustre, à l'aide de captures d'écran réelles, le fonctionnement des modules dédiés au traitement de l'ECG, de l'EEG et du PPG. Nous mettons en évidence le filtrage des signaux, la détection des caractéristiques importantes, les mesures calculées automatiquement, ainsi que l'aide au diagnostic par intelligence artificielle. D'autres fonctionnalités comme la sauvegarde dans une base de données, l'accès sécurisé ou encore le partage des résultats via interface web sont également présentées.

L'ensemble de ces résultats sera ensuite analysé et discuté, en mettant en avant les points forts, les limites du système actuel, ainsi que les pistes d'amélioration envisagées.

III.1. Présentation Générale de la Plateforme de Télémédecine :

Dans le cadre de ce projet, nous avons conçu et réalisé une plateforme web dédiée à l'analyse et au traitement des signaux physiologiques tels que (ECG), (EEG) et le (PPG). Cette application repose sur une architecture web moderne en HTML, CSS et JavaScript, offrant une interface utilisateur intuitive, réactive et accessible via un simple navigateur.

Structure de l'interface

L'interface graphique de la plateforme se divise en deux sections principales :

- Un menu de navigation vertical positionné sur le côté gauche de l'écran. Celui-ci regroupe l'ensemble des fonctionnalités principales accessibles par simple clic :
- Accueil : affiche une animation ECG représentative du contexte médical,
- Analyse Signal : permet l'importation, la visualisation et le traitement des fichiers de signaux biomédicaux,
- Affichage de résultats : donne accès à un tableau récapitulatif des résultats cliniques extraits à partir des signaux analysés.

- Une zone principale d'affichage, située à droite, qui utilise un cadre iframe pour charger dynamiquement les différentes pages sans recharger toute l'interface. Cette architecture optimise la fluidité de navigation et isole les modules fonctionnels tout en maintenant une cohérence visuelle.

L'utilisation des boutons du menu permet une transition fluide entre les différentes sections. Chaque action déclenche le chargement d'un fichier HTML spécifique (comme accueil.html, analyse.html) dans l'iframe, ce qui évite la redondance et améliore l'expérience utilisateur.



Figure III.1 : Page d'accueil de la plateforme

III.2. Résultats de la Préparation des Données Biomédicales

III.2.1. Importation et Format des Fichiers CSV

L'importation des signaux biomédicaux constitue la première étape du traitement dans la plateforme. Chaque type de signal (ECG, EEG, SPO₂) est stocké dans un fichier au format CSV, choisi pour sa simplicité, sa portabilité et sa compatibilité avec les technologies web utilisées dans cette application.

Depuis l'interface principale, l'utilisateur peut naviguer entre les modules ECG, EEG et SPO₂ via un menu vertical situé à gauche. Chaque bouton ouvre dynamiquement une page dédiée à l'analyse

du signal correspondant dans un cadre intégré, ce qui permet un affichage fluide sans rechargement complet de la page.

Les fichiers attendus par la plateforme suivent des structures précises :

- **Pour le signal ECG** : une seule colonne contenant les valeurs d'amplitude du signal cardiaque, échantillonnées dans le temps.
- **Pour le signal EEG** : un fichier CSV à plusieurs colonnes, chacune représentant une bande de fréquence spécifique (alpha, bêta, thêta, delta).
- **Pour le signal PPG (SPO₂)** : deux colonnes correspondant aux valeurs des composantes rouge et infrarouge, nécessaires à l'estimation de la saturation en oxygène.

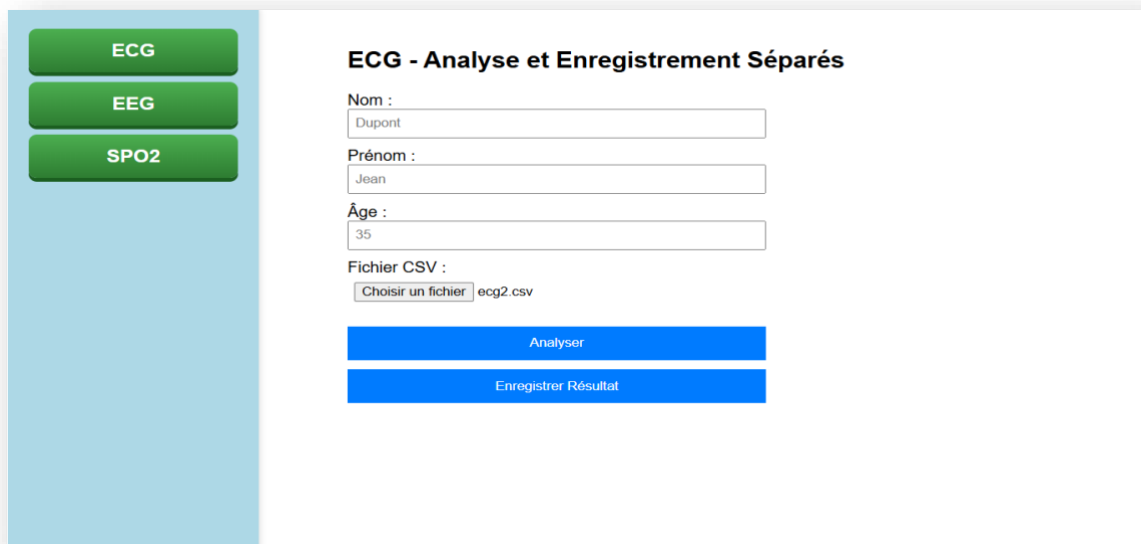


Figure III.2 : Interface d'importation d'un fichier CSV EEG avec message de confirmation

III.2.2. Application des algorithmes de Marquardt-Levenberg

Afin d'améliorer la qualité des signaux biomédicaux importés dans la plateforme, un algorithme de régression non linéaire de type Levenberg-Marquardt est automatiquement appliqué dès l'analyse du fichier CSV. Ce type d'algorithme est largement utilisé dans les systèmes de traitement du signal pour effectuer des ajustements de courbes en présence de bruit ou d'irrégularités.

Dans notre cas, l'objectif principal est de produire un signal plus lisse et plus régulier, facilitant la détection automatique des points caractéristiques (pics PQRST, ondes cérébrales, pics PPG...).

L'algorithme corrige les fluctuations indésirables du signal et stabilise la courbe avant son affichage et son traitement plus approfondi.

III.2.3. Traitement intégré et invisible pour l'utilisateur

Le traitement est entièrement intégré à la chaîne d'analyse. L'utilisateur n'interagit pas directement avec l'algorithme, et il ne visualise que le résultat final du signal corrigé.

Le signal brut (non filtré) n'est pas affiché séparément, car la correction est effectuée automatiquement dès le chargement des données, ce qui garantit une fluidité d'usage et une interface épurée.

III.2.4. Intérêt de l'approche

Cette correction automatique permet :

- Une meilleure visualisation graphique du signal,
- Une détection plus fiable des anomalies,
- Et une stabilité accrue des mesures physiologiques (fréquence cardiaque, intervalle QT, saturation SpO₂...).

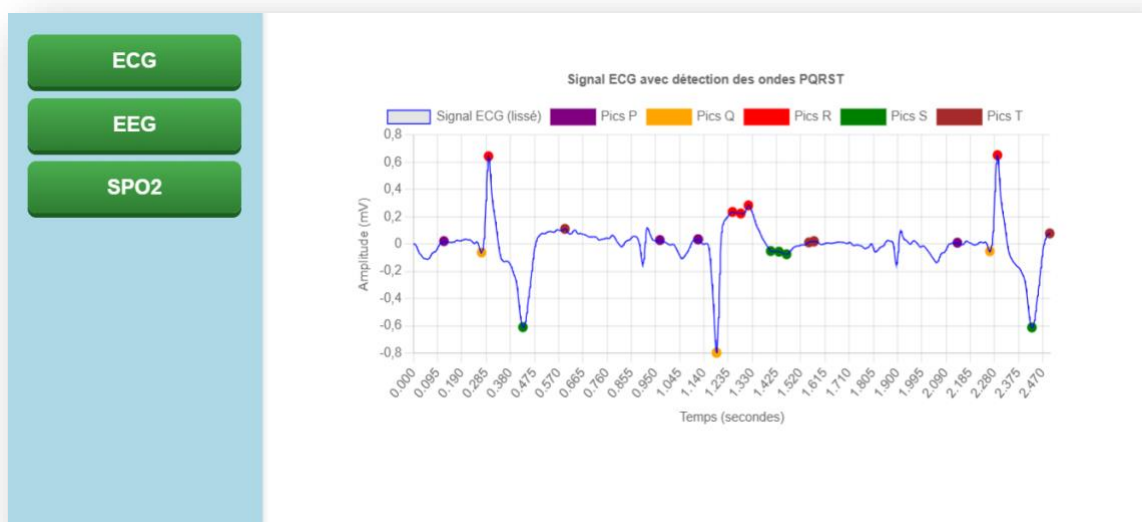


Figure III.3 :Signal ECG corrigé par l'algorithme de Levenberg-Marquardt intégré dans la plateforme

III.3. Résultats du Traitement du Signal ECG

La plateforme permet un traitement complet du signal électrocardiographique (ECG), depuis le prétraitement jusqu'à la génération d'un diagnostic automatique. Chaque étape est réalisée en arrière-plan, avec une interface interactive qui facilite la lecture et l'interprétation des résultats par l'utilisateur.

III.3.1. Filtrage du Signal ECG

Avant toute analyse, le signal ECG est automatiquement soumis à un processus de filtrage visant à améliorer sa qualité. La plateforme applique une normalisation, suivie d'un filtrage passe-haut (0.5 Hz) pour éliminer les dérives de ligne de base, puis un filtrage passe-bas (~20 Hz) pour supprimer les hautes fréquences parasites, notamment les bruits musculaires.

Même si la version actuelle de la plateforme n'affiche que le signal corrigé, le filtrage permet d'obtenir une courbe plus stable, plus nette et plus fiable pour la détection des événements cardiaques. Les réglages de fréquence ne sont pas modifiables manuellement à ce stade, mais peuvent être ajustés dans une future version.

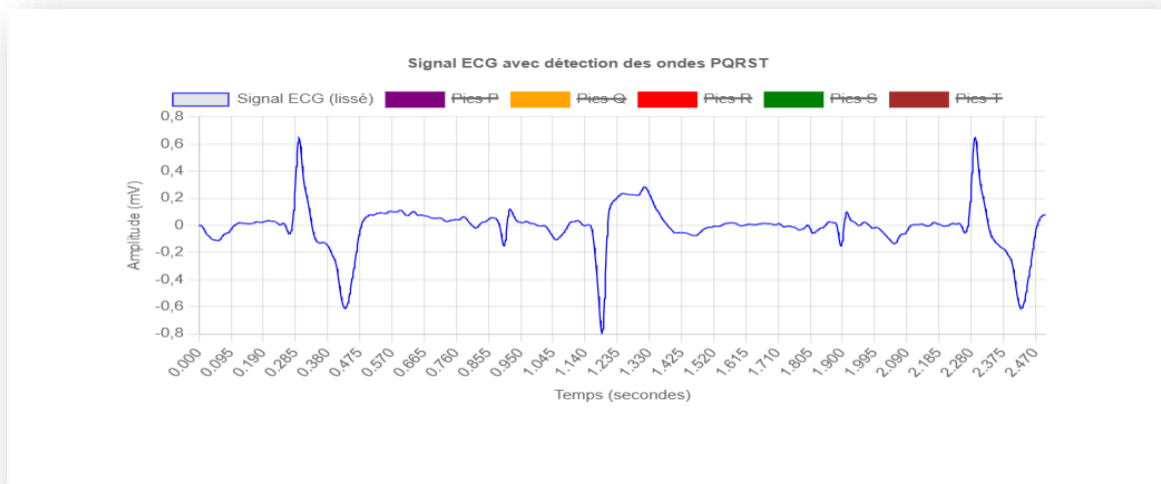


Figure III.4 : Affichage du signal ECG filtré après traitement passe-haut et passe-bas

III.3.2. Détection des Pics PQRST

Une fois le signal prétraité, la plateforme procède à la détection automatique des ondes caractéristiques du cycle cardiaque : les pics P, Q, R, S et T. L'algorithme identifie d'abord les

pics R, considérés comme les sommets du signal, puis localise les autres pics en fonction de leur position relative.

Chaque type de pic est représenté par un marqueur coloré distinct sur le graphique (par exemple : rouge pour R, violet pour P, vert pour S, etc.), ce qui permet une lecture rapide et une validation visuelle facile du tracé cardiaque.

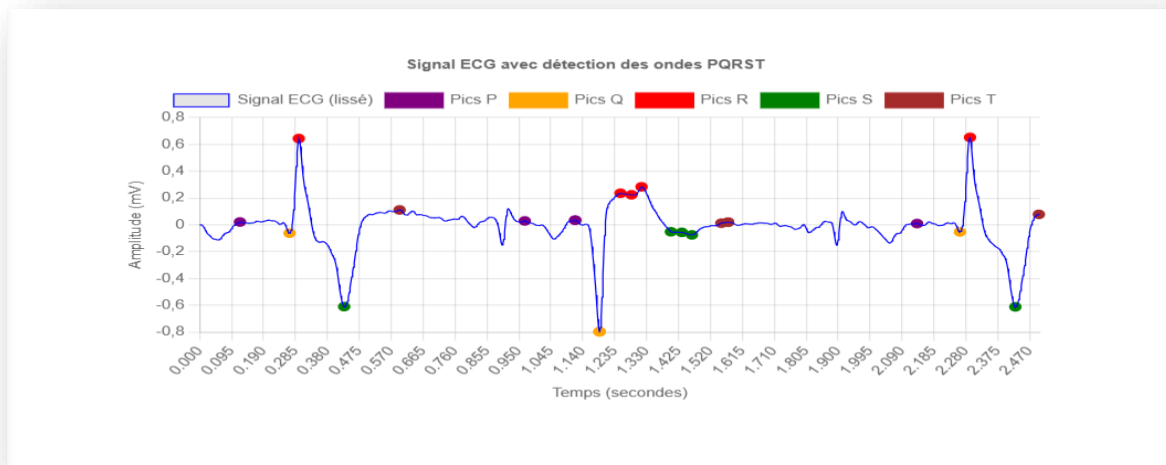


Figure III.5 : Signal ECG annoté avec détection automatique des pics PQRST

III.3.3. Calcul du Rythme Cardiaque (BPM)

À partir des intervalles entre les pics R, la plateforme calcule automatiquement la fréquence cardiaque exprimée en battements par minute (BPM). Ce calcul repose sur la formule suivante :

$$BPM = \frac{60}{\text{intervalle moyen entre deux pics R(en s)}}$$

Les résultats affichés à l'écran dans l'interface sont :

- La fréquence cardiaque (BPM) calculée automatiquement,
- L'amplitude moyenne des pics R, exprimée en microvolts (μV).

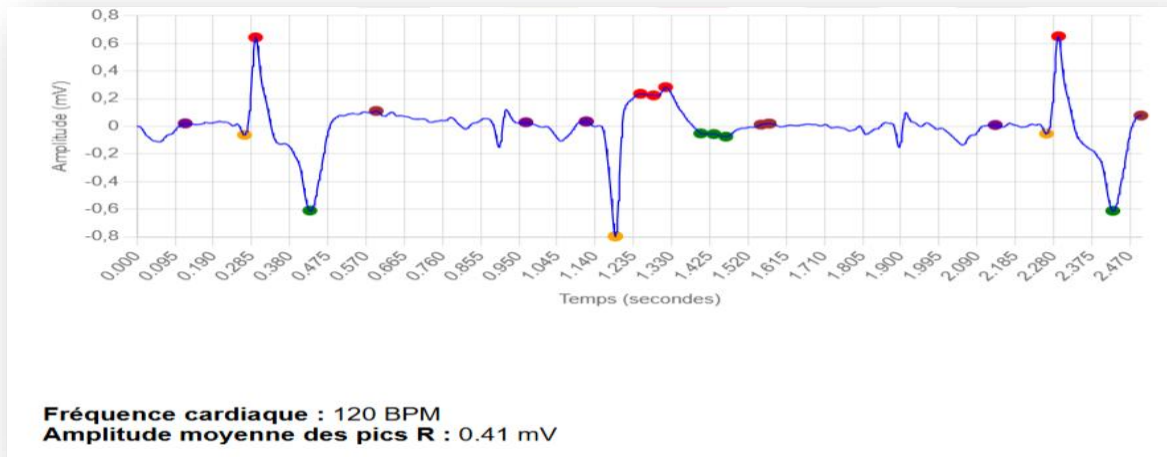


Figure III.6 : Affichage du BPM et des mesures cardiaques calculées automatiquement

III.3.4. Détection d'Anomalies Cardiaques par IA

La plateforme dispose d'un module de diagnostic automatique, conçu à partir de règles médicales simples. Ce système permet d'interpréter automatiquement les données extraites du signal ECG, sans intervention manuelle de l'utilisateur.

Parmi les paramètres analysés, on retrouve :

- La fréquence cardiaque (BPM),
- La régularité du rythme, basée sur la variabilité des intervalles R–R,
- L'amplitude moyenne des pics R, exprimée en microvolts (μV),
- Et la durée moyenne de l'intervalle QT.

Ces mesures sont affichées de façon claire dans l'interface et offrent une vue d'ensemble rapide de l'activité cardiaque.

Grâce à l'analyse croisée de ces données, la plateforme est capable de détecter automatiquement plusieurs types d'anomalies, notamment :

- Une bradycardie, lorsque le BPM est inférieur à 60,
- Une tachycardie, si le BPM dépasse 100,
- Une irrégularité du rythme, pouvant suggérer une arythmie,
- Une amplitude anormale des pics R, trop faible ou trop élevée,
- Ou encore un intervalle QT prolongé, indicateur possible d'un trouble de conduction.

Fréquence cardiaque : 120 BPM
Amplitude moyenne des pics R : 0.41 mV

Analyse médicale & IA :

- ⚠ Tachycardie
- ⚠ Amplitude R faible
- ⚠ Rythme irrégulier
- ✅ QT normal

Figure III.7 : Diagnostic automatique du rythme cardiaque avec interprétation IA

III.3.5. Affichage Graphique du Signal ECG

Le signal ECG corrigé est visualisé à l'aide de Chart.js, une bibliothèque interactive qui permet un affichage fluide et clair. L'utilisateur peut zoomer, faire défiler et suivre le tracé en temps réel, avec une légende dynamique pour identifier les différentes ondes.

Ce mode de visualisation facilite l'analyse visuelle du rythme cardiaque et permet au praticien de valider rapidement les résultats proposés par l'algorithme.

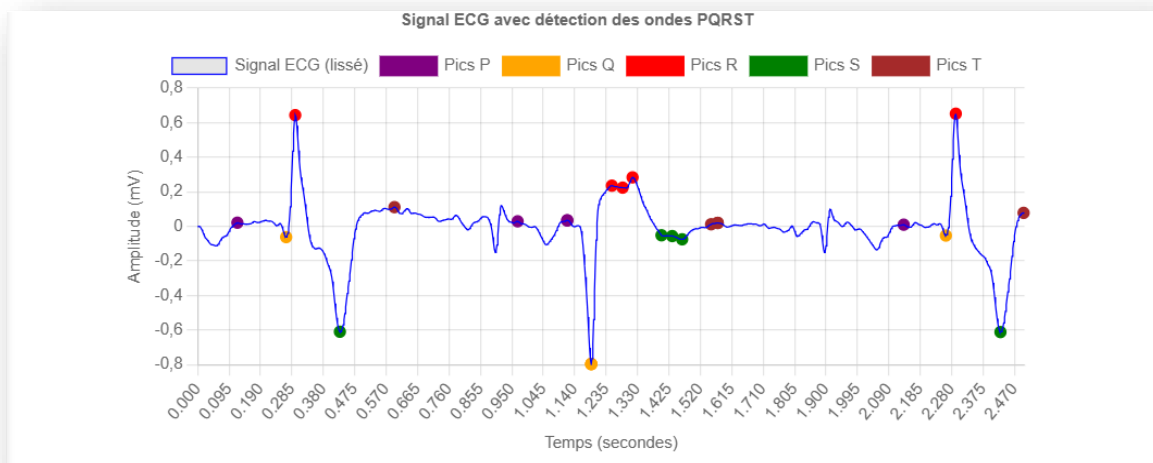


Figure III.8 : Visualisation interactive du signal ECG avec marquage des points caractéristiques

III.4. Résultats du Traitement du Signal EEG

III.4.1. Filtrage et Prétraitement du Signal EEG

Avant toute analyse, le signal EEG doit être nettoyé des artefacts pouvant altérer l'interprétation, comme ceux dus aux clignements d'yeux ou aux mouvements musculaires.

Dans cette plateforme, le prétraitement est réalisé à l'aide d'un module JavaScript qui lit un fichier CSV contenant des valeurs EEG brutes, réparties selon plusieurs bandes de fréquence (alpha, bêta, thêta, delta).

L'utilisateur charge les données via un champ de sélection, puis lance l'analyse. Le système extrait les colonnes correspondantes et calcule la moyenne de chaque bande.

Les données sont ensuite affichées sous forme de courbes distinctes pour chaque bande, permettant une lecture directe du signal global et une détection visuelle d'anomalies.

Bien que la suppression des artefacts oculaires via ICA (Independent Component Analysis) ne soit pas encore totalement intégrée, cette étape est prévue dans les perspectives d'évolution de la plateforme.

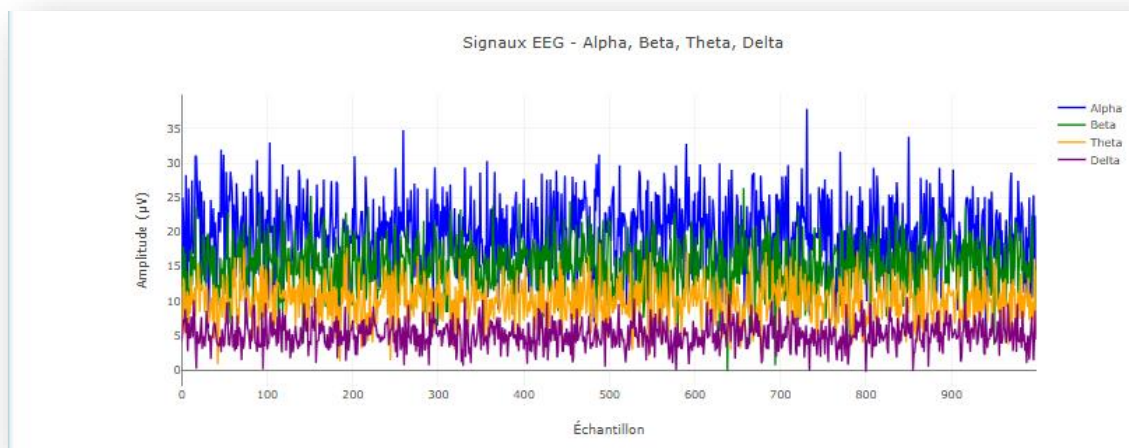


Figure III.9 : Tracé EEG multi-bandes après traitement

III.4.2. Détection des Ondes Cérébrales

Une fois le signal EEG filtré et prétraité, la plateforme procède à l'analyse des principales bandes de fréquences cérébrales : alpha, bêta, thêta et delta. Ces ondes sont chacune liées à un état neurologique spécifique :

- Alpha : relaxation et veille calme,
- Bêta : concentration, stress ou activité mentale intense,
- Thêta : somnolence, méditation ou fatigue mentale,
- Delta : sommeil profond ou activité cérébrale ralentie.

Après l'analyse, la plateforme calcule automatiquement la moyenne d'amplitude pour chaque bande à partir des données EEG enregistrées. Ces moyennes sont ensuite affichées dans une zone dédiée de l'interface, ce qui permet d'obtenir rapidement un aperçu **de l'activité cérébrale dominante**.

Les moyennes affichées sont :

- **Alpha** : 19.80 μV
- **Bêta** : 15.03 μV
- **Thêta** : 10.03 μV
- **Delta** : 5.13 μV

Ces valeurs permettent d'estimer de manière simple et visuelle l'état mental global du patient

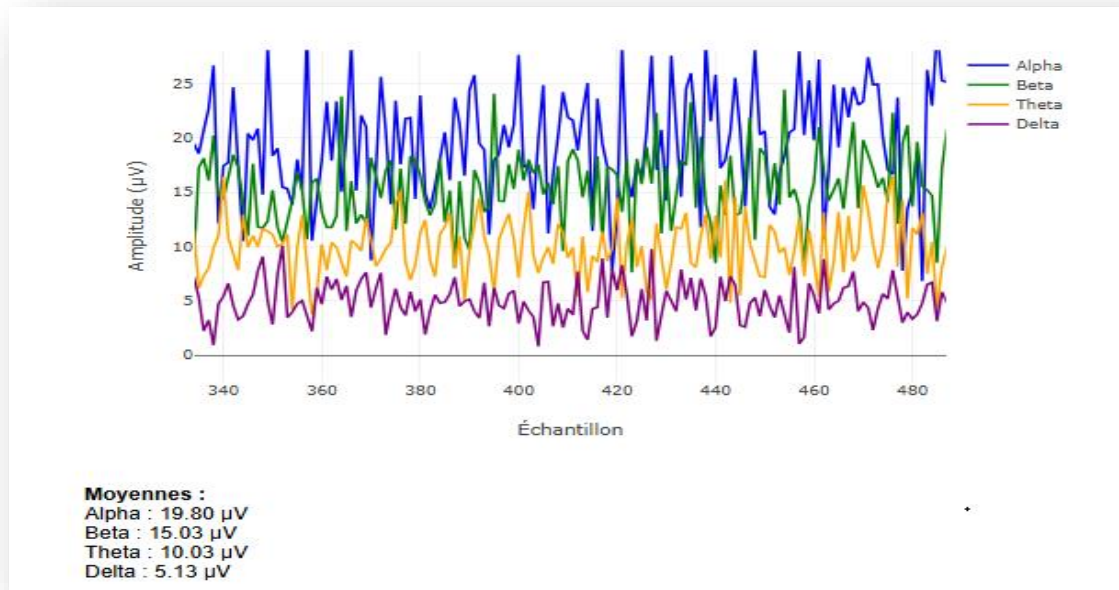


Figure III.10 : Résultats EEG – Moyennes des ondes cérébrales et diagnostic

III.4.3. Détection d'Anomalies Neurologiques avec IA

L'un des objectifs de la plateforme est de détecter automatiquement certaines anomalies dans le signal EEG, à partir des moyennes d'amplitude enregistrées.

Le système identifie deux types d'anomalies fréquentes liées aux ondes cérébrales :

- Thêta élevé : peut indiquer une fatigue mentale importante ou des troubles de l'attention.
- Delta élevé : peut suggérer un état de sommeil profond ou dans certains cas, une pathologie neurologique.

Lorsqu'une anomalie est repérée, la plateforme affiche une alerte visuelle claire, compréhensible aussi bien pour un clinicien que pour un patient.

Moyennes :

Alpha : 19.80 μV

Beta : 15.03 μV

Theta : 10.03 μV

Delta : 5.13 μV

Analyse :

⚠ Theta élevé : fatigue ou troubles de concentration

⚠ Delta élevé : sommeil profond ou pathologie

Figure III.11 : La détection automatique des anomalies

III.4.4. Visualisation du Signal EEG

La plateforme propose une interface claire et interactive pour la visualisation des signaux EEG. Une fois le fichier CSV chargé via le formulaire prévu, les données sont automatiquement traitées par un script JavaScript, puis représentées sous forme de graphiques dynamiques.

Le signal est divisé en quatre canaux distincts, chacun correspondant à une bande de fréquence cérébrale : alpha, bêta, thêta et delta. Ces courbes sont superposées sur un même graphique, ce qui permet une lecture simultanée de l'activité cérébrale.

- L'axe horizontal représente le temps (échantillons)
- L'axe vertical indique l'amplitude du signal (en microvolts, μV).

Pour faciliter l'analyse visuelle, chaque bande est codée par une couleur spécifique :

- **Alpha** : bleu
- **Bêta** : vert
- **Thêta** : orange
- **Delta** : violet

Cette représentation permet à l'utilisateur de :

- Suivre les variations d'activité dans chaque bande,
- Identifier les pics de concentration ou de repos,
- Détecter des déséquilibres entre les différentes ondes cérébrales.

L'interface intègre également des fonctions interactives telles que le zoom, le défilement temporel et la lecture des valeurs au survol. Ces fonctionnalités rendent l'analyse accessible et intuitive, même pour des utilisateurs non experts.

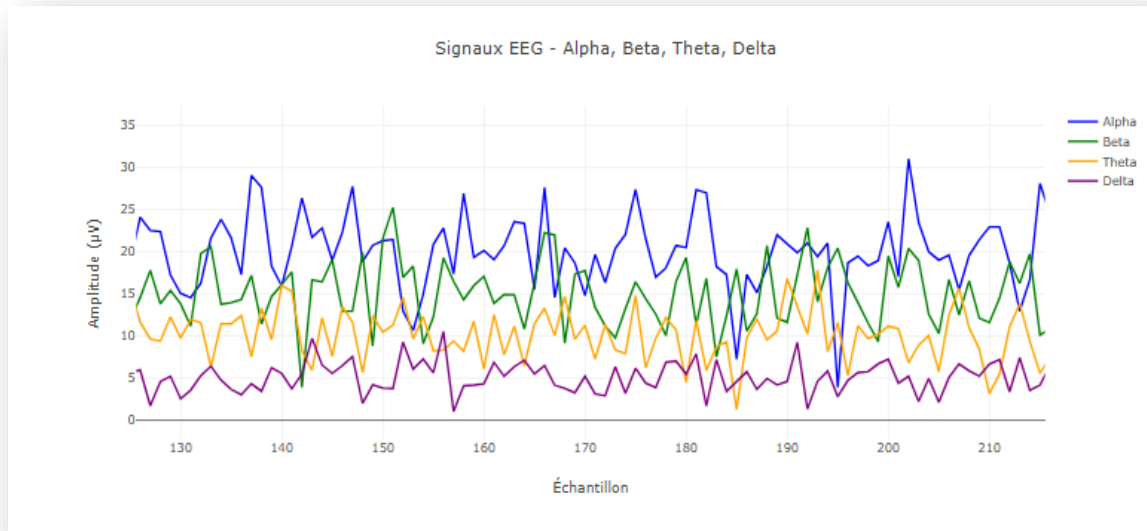


Figure III.12 : Affichage multi-canaux des ondes EEG (Alpha, Bêta, Thêta, Delta)

III.5. Résultats du Traitement du Signal PPG

Le module PPG de la plateforme permet d'analyser de manière automatique les signaux photopléthysmographiques issus de capteurs optiques (rouge et infrarouge), afin d'évaluer le rythme cardiaque ainsi que la saturation en oxygène (SpO_2) du patient. Toutes les étapes du traitement sont intégrées dans une interface web interactive, intuitive et divisée en trois volets : signal rouge, signal infrarouge et SpO_2 .

III.5.1. Filtrage du Signal PPG

Après l'importation d'un fichier CSV contenant les colonnes Rouge et Infrarouge, les deux signaux sont automatiquement lissés par une moyenne glissante afin d'éliminer les fluctuations non physiologiques. Le but de ce filtrage est de faciliter la détection des pics systoliques, caractéristiques du pouls.

Les courbes affichées sont ainsi des versions filtrées du signal PPG, offrant une meilleure lisibilité et une stabilité accrue.

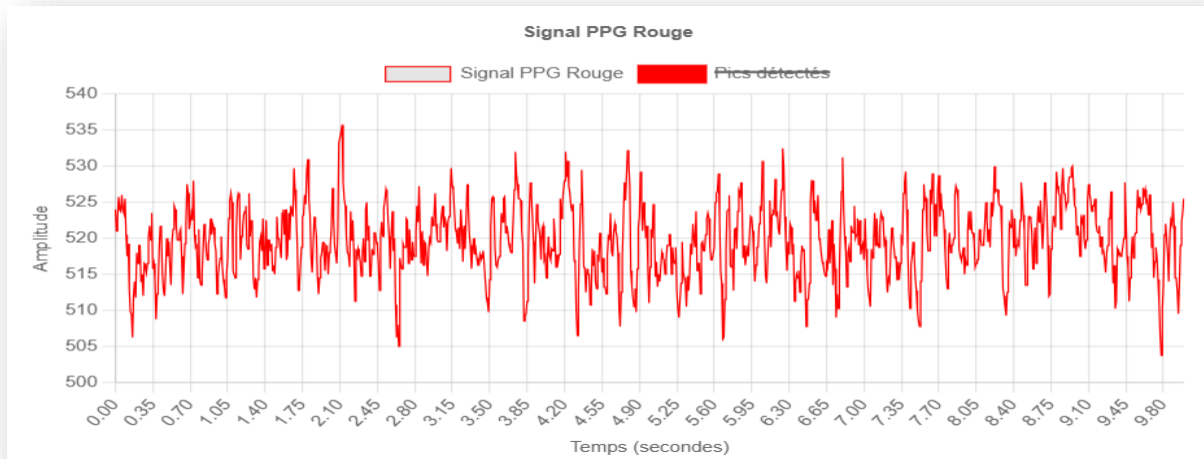


Figure III.13 : Signal PPG rouge affiché après filtrage

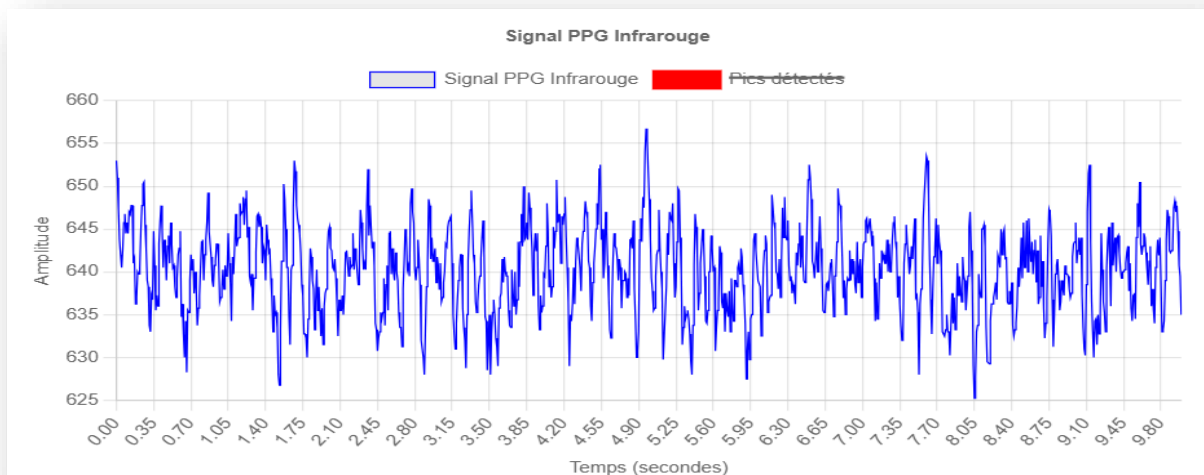


Figure III.14 : Signal PPG rouge affiché après filtrage

III.5.2. Détection des Pics et du Rythme Cardiaque

L'algorithme détecte automatiquement les pics systoliques présents dans chaque signal (rouge et infrarouge), en se basant sur un seuil dynamique défini comme suit :

$$\text{Seuil} = \text{moyenne du signal} + 0.8 \times \text{écart - type}$$

Cette approche permet de s'adapter aux variations naturelles du signal. Pour éviter les détections multiples d'un même battement, seuls les pics espacés d'au moins 10 échantillons sont conservés.

La fréquence cardiaque (BPM) est calculée en utilisant la formule suivante :

$$BPM = \frac{60}{\text{intervalle moyen entre deux pics R(en s)}}$$

Ce calcul est réalisé séparément pour les signaux rouge et infrarouge, puis une moyenne des deux valeurs est prise pour améliorer la précision.

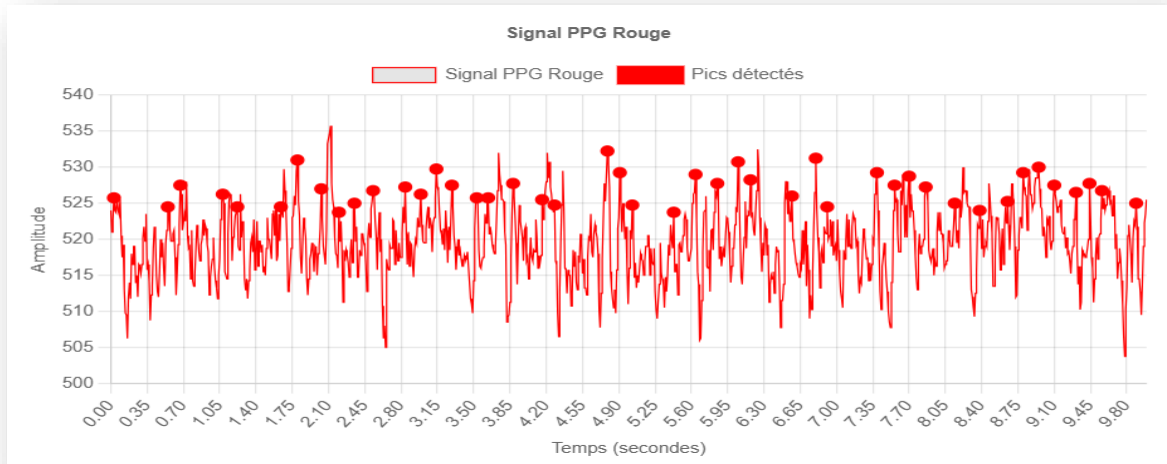


Figure III.15 : Détection automatique des pics PPG (Rouge)

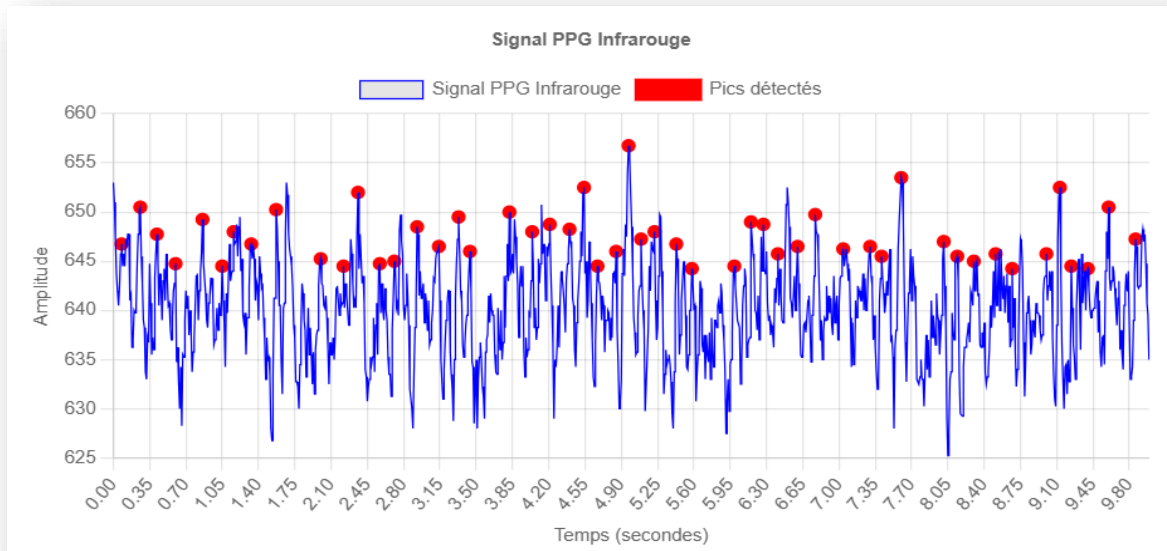


Figure III.16 : Détection automatique des pics PPG (Infrarouge)

III.5.3. Estimation de la Saturation en Oxygène (SpO₂)

La SpO₂ est estimée à partir du rapport des amplitudes des signaux rouge et infrarouge, mesurées aux emplacements des pics détectés.

La plateforme applique une formule empirique simplifiée, implémentée dans la fonction `calculateSpO2()`, pour convertir ce rapport en un pourcentage :

$$SpO_2 = 110 - 25 \times \left(\frac{\text{Amplitude rouge}}{\text{Amplitude infrarouge}} \right)$$

La valeur obtenue est bornée entre 70 % et 100 %, afin de respecter les limites physiologiques normales.

Cette méthode reste une approximation simplifiée, car elle ne prend pas en compte les composantes alternatives et continues (AC/DC) utilisées dans les oxymètres médicaux professionnels.

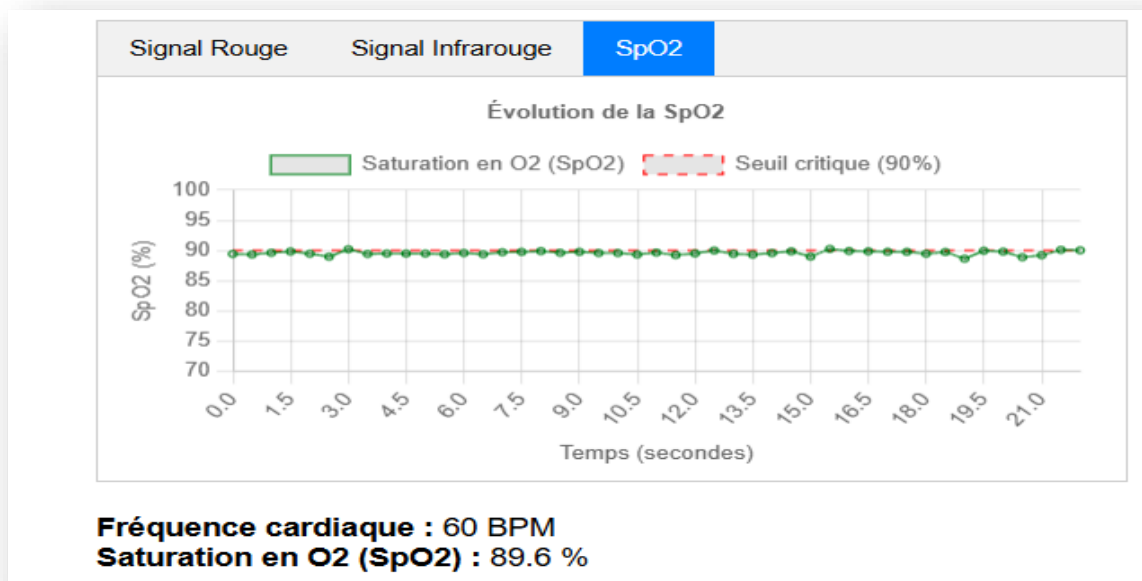


Figure III.17 : Estimation de la SpO₂ avec affichage du seuil critique

III.5.4. Détection d'Anomalies avec Intelligence Artificielle

La plateforme utilise un système expert simple pour analyser automatiquement les valeurs du rythme cardiaque (BPM) et de la saturation en oxygène (SpO₂), dans le but de détecter d'éventuelles anomalies.

Dans la version de la plateforme, un seul type d'alertes est prioritairement détecté:

- Hypoxémie modérée : lorsque la SpO_2 est inférieure à 90 %.

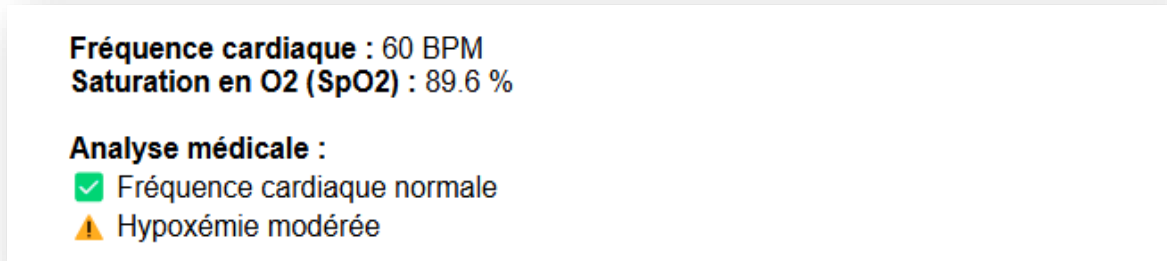


Figure III.18 : Diagnostic automatique généré à partir des valeurs de BPM et SpO_2

III.5.5. Affichage Graphique du Signal PPG

L'interface web présente les signaux rouge, infrarouge et la SpO_2 dans trois onglets interactifs, chacun dédié à un type de donnée. Les courbes sont générées à l'aide de Chart.js, avec des points visibles sur les pics détectés pour faciliter la lecture.

Le système à onglets permet de naviguer rapidement entre les signaux sans recharger la page, offrant ainsi une expérience utilisateur fluide et organisée.

La visualisation proposée permet de valider visuellement les résultats cliniques simulés, tout en garantissant une lecture claire, intuitive et accessible à tous les utilisateurs.

Trois graphiques sont ainsi affichés :

- Le signal rouge, avec ses pics systoliques mis en évidence,
- Le signal infrarouge, également annoté de ses pics,
- L'évolution de la SpO_2 dans le temps, avec une ligne d'alerte tracée à 90 % pour signaler les seuils critiques.

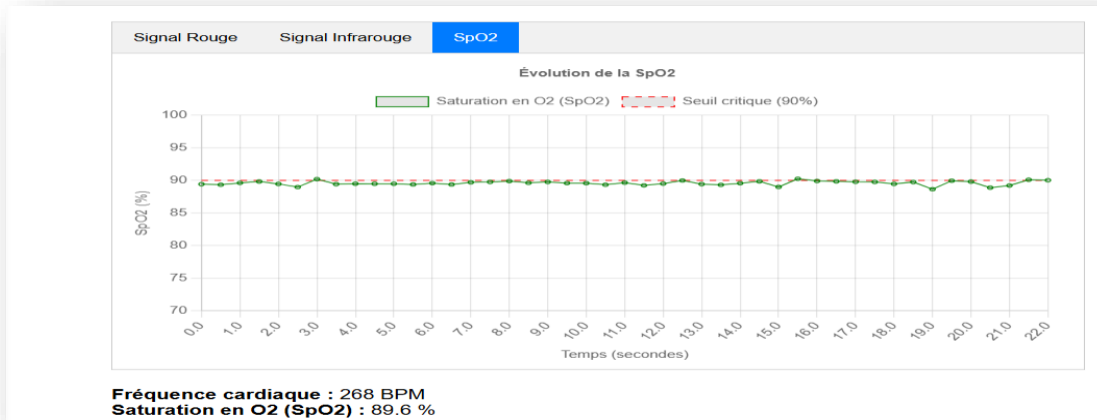


Figure III.19 : Affichage graphique interactif des signaux PPG et de la SpO₂

III.6. Partage des Résultats sur le Réseau

L'un des objectifs principaux de notre plateforme est de permettre une consultation simple et sécurisée des résultats à travers un navigateur, en utilisant un hébergement local. Pour cela, nous avons déployé la solution à l'aide de XAMPP, qui regroupe plusieurs outils essentiels du web (serveur, base de données, scripts), tout en simulant le fonctionnement d'un site distant.

III.6.1. Mise en Place d'un Serveur Local avec XAMPP

Le déploiement local a été réalisé grâce à l'environnement XAMPP, qui regroupe les éléments suivants :

- Apache pour le serveur web,
- MySQL pour le stockage des données,
- PHP pour les traitements côté serveur,
- Et phpMyAdmin pour administrer la base via une interface graphique.

Après installation, les fichiers du projet sont placés dans le dossier htdocs/. L'activation des modules Apache et MySQL depuis le tableau de bord de XAMPP permet d'exécuter la plateforme localement, accessible à l'adresse : http://localhost/nom_du_projet/

Cette configuration permet une utilisation hors ligne, tout en conservant les fonctionnalités d'un site web dynamique.

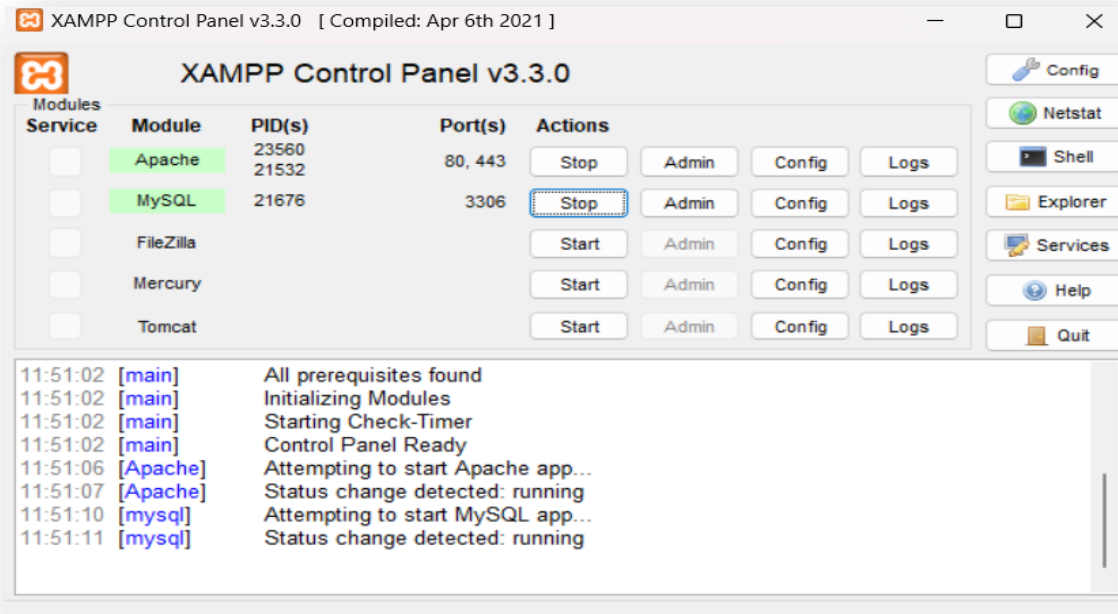


Figure III.20 : Console XAMPP avec services Apache et MySQL actifs.

III.6.2. Accès aux Résultats via Interface Web

Une fois le serveur local lancé, l'utilisateur peut accéder aux différents modules (ECG, EEG, PPG) depuis son navigateur. Tous les résultats sont centralisés dans une base MySQL, ce qui permet un affichage organisé et structuré des données.

La section "Affichage des résultats" propose une vue tableau listant les informations extraites des signaux : nom, âge, fréquence cardiaque (BPM), saturation SpO₂, ou encore présence d'anomalies. Des filtres et tris sont disponibles pour faciliter la recherche.

Résultats ECG											
Sélectionner un patient :											
Bensalah											
Afficher les résultats											
Résultats pour Bensalah											
Nom	Prénom	Âge	BPM	QT moyen	Rythme irrégulier	Anomalies	Alpha	Beta	Théta	delta	spo2
Bensalah	Yacine	26	120	0.3382 s	Oui	⚠ Tachycardie, ⚠ Amplitude R	-	-	-	-	-

Figure III.21 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal ECG

Sélectionner un patient :

Résultats pour Cherfaoui

Nom	Prénom	Âge	BPM	QT moyen	Rythme irrégulier	Anomalies	Alpha	Beta	Théta	delta	spo2
Cherfaoui	Nour Ej Houda	33	-	-	Non	⚠ Theta élevé : fatigue ou tr	19.80 μ V	15.03 μ V	10.03 μ V	5.13 μ V	-

Figure III.22 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal EEG

Sélectionner un patient :

Résultats pour Boukercha

Nom	Prénom	Âge	BPM	QT moyen	Rythme irrégulier	Anomalies	Alpha	Beta	Théta	delta	spo2
Boukercha	Walid	42	288	-	Non	⚠ Tachycardie, ⚠ Hypoxémie m	-	-	-	-	89.6 %

Figure III.23 : Tableau de bord centralisé affichant les résultats de signal PPG

III.6.3. Sécurité et Gestion des Utilisateurs

Même si la plateforme fonctionne localement, la sécurité des données médicales reste une priorité. C'est pourquoi un système d'authentification a été mis en place :

- Formulaire de connexion avec identifiant et mot de passe,
- Gestion des rôles : l'interface prévoit des niveaux d'accès différents selon le type d'utilisateur (ex. : médecin, administrateur, étudiant),
- Protection contre les fichiers non valides : l'importation est restreinte aux fichiers CSV valides, évitant les manipulations ou injections.

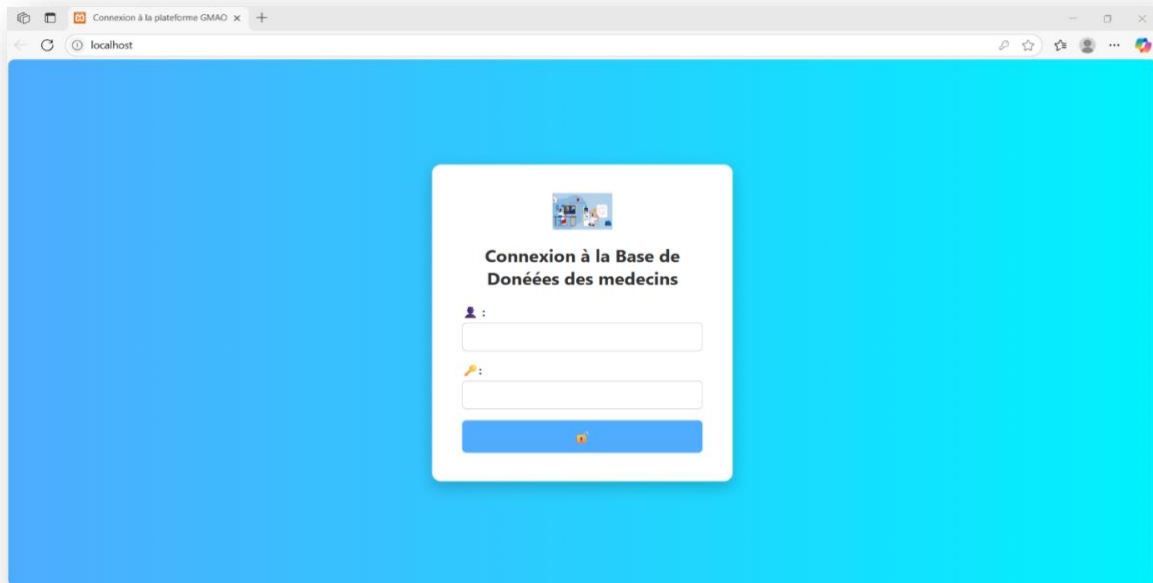


Figure III.24 : Formulaire de connexion

III.7. Analyse Comparative et Discussion

Afin de positionner notre plateforme par rapport aux outils de référence dans le traitement des signaux biomédicaux, une analyse comparative a été menée selon plusieurs critères : accessibilité, coût, diversité des signaux pris en charge, interactivité, intelligence artificielle, etc.

L'objectif est de mettre en évidence les forces de notre application, mais aussi ses limites vis-à-vis de solutions reconnues comme MATLAB, LabVIEW ou encore PhysioNet Tools.

III.7.1. Comparaison avec d'autres outils

Plusieurs outils de traitement des signaux biomédicaux sont utilisés dans le monde académique et clinique, notamment :

Chapitre III : Résultats et Discussion

Critères techniques	Notre plateforme	MATLAB	LabVIEW	PhysioNet Tools
Accessibilité	Navigateur web (facile)	Licence payante	Licence payante	Gratuit (ligne de commande)
Coût	Gratuit (open source local)	Élevé	Élevé	Gratuit
Langage principal	HTML, JS, PHP	MATLAB	G (graphique)	Python, MATLAB
Affichage temps réel	Oui (Chart.js)	Limité	Oui	Non
Signaux pris en charge	ECG, EEG, PPG	Principalement ECG	Variable	ECG, PPG
IA intégrée	Oui (règles simples)	Oui (selon scripts)	Non natif	Non
Interface utilisateur	Moderne, intuitive	Complexe	Graphique avancée	Aucune interface graphique
Besoin d'installation	XAMPP uniquement	Oui	Oui	Oui

Tab III.1 : Tableau comparatif entre notre plateforme et d'autres outils de traitement de signaux.

➤ Discussion

Ce tableau montre que notre plateforme se distingue par sa facilité d'accès, son interface intuitive, sa prise en charge simultanée de plusieurs types de signaux (ECG, EEG, PPG), et son diagnostic intégré en temps réel via des règles simples d'intelligence artificielle.

Elle ne remplace pas des outils complexes comme MATLAB en matière de modélisation avancée ou de traitement scientifique très poussé, mais elle répond efficacement à des besoins pédagogiques, expérimentaux ou cliniques légères, avec une courbe d'apprentissage très réduite.

III.7.2. Discussion des points forts

Notre plateforme présente plusieurs avantages majeurs :

- Accessibilité immédiate via navigateur, sans connaissance technique approfondie.
- Interface simple et intuitive, adaptée aux étudiants comme aux professionnels de santé.
- Déploiement facile en local avec XAMPP, sans configuration complexe.
- L'analyse des signaux ECG, EEG et PPG à partir de fichiers CSV, avec affichage graphique immédiat.
- Traitement automatisé des signaux ECG, EEG et PPG, avec extraction et affichage des paramètres clés.
- Diagnostic simplifié basé sur des règles médicales standards, intégré en temps réel.
- Une visualisation interactive des signaux, avec zoom, défilement temporel (pan), annotations et survol de valeurs.
- Pour l'ECG : détection des pics PQRST, calcul du rythme cardiaque (BPM) et alertes en cas d'anomalies comme une tachycardie.
- Pour l'EEG : traitement multi-bandes (alpha, bêta, thêta, delta), calcul automatique des moyennes et affichage d'un diagnostic simplifié.
- Pour le PPG : calcul du pouls, estimation de la saturation SpO₂ et détection d'anomalies cardiovasculaires.
- Une base de données intégrée, qui permet de sauvegarder les résultats par médecin, facilitant le suivi des patients.

III.8. Limites et Perspectives

Notre plateforme répond aux objectifs de base, mais présente certaines limites qui ouvrent la voie à des améliorations futures.

III.8.1. Limites identifiées

- Traitements avancés non intégrés : L'analyse EEG reste basique (moyennes par bande). Des approches comme l'ICA ou la détection automatique de crises ne sont pas encore incluses.
- Fichiers à préparer manuellement : Les signaux doivent être importés en CSV formaté, ce qui demande une étape en amont pour l'utilisateur.
- Mono-utilisateur : La plateforme fonctionne avec un seul compte à la fois, sans gestion multi-profils ou partage entre médecins.
- Pas de traitement en temps réel : L'analyse se fait après importation du signal ; aucune acquisition directe ou surveillance en temps réel n'est disponible.

III.8.2. Perspectives d'évolution

- Ajout d'IA : Pour détecter automatiquement des anomalies comme les arythmies ou les crises neurologiques.
- Connexion à des capteurs réels : Pour permettre le suivi en temps réel dans des contextes cliniques.
- Systèmes multi-utilisateurs : Gestion de comptes médecins/patients avec stockage sécurisé des résultats.
- Version mobile : Pour une utilisation sur tablette ou smartphone, en déplacement ou à distance.
- Paramétrage expert : Pour offrir plus de contrôle aux utilisateurs avancés (filtres, seuils, nouveaux signaux).

Conclusion

Ce troisième chapitre a présenté une vue d'ensemble des résultats obtenus à travers la mise en œuvre de notre plateforme d'analyse intelligente des signaux biomédicaux. En combinant des technologies web modernes avec des outils de traitement de signal, l'application développée permet de :

- Traiter automatiquement des signaux ECG, EEG et PPG depuis des fichiers CSV,
- Appliquer des étapes de prétraitement et de filtrage adaptées à chaque type de signal,
- Extraire des paramètres physiologiques clés (BPM, QT, SpO₂, ondes cérébrales...),
- Générer un diagnostic automatisé basé sur des règles médicales simples,
- Visualiser dynamiquement les signaux via une interface interactive,
- Et enfin, stocker et consulter les résultats via un serveur local sécurisé.

La plateforme offre une solution simple, rapide et accessible, adaptée aussi bien à un usage pédagogique qu'à une expérimentation préclinique. Bien que certaines limites aient été identifiées (IA simple, traitement unitaire, interface non responsive...), les résultats obtenus sont encourageants et ouvrent la voie à plusieurs évolutions futures, telles que le traitement batch, l'intégration d'une IA plus avancée, ou encore un déploiement en ligne.

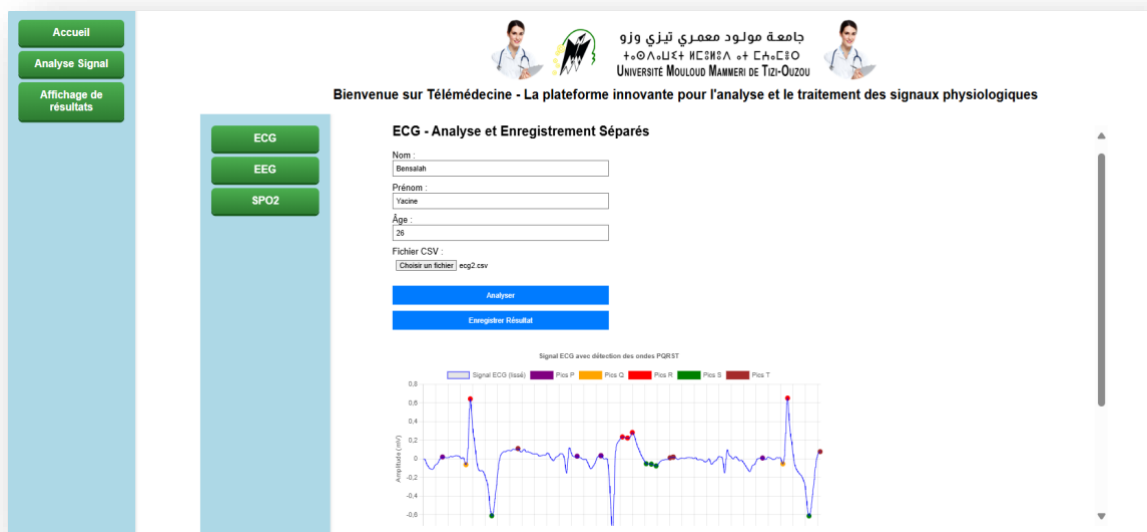


Figure III.25: Vue d'ensemble de la plateforme avec les modules ECG, EEG et SPO₂ accessibles via le menu principal

A decorative scroll frame with a black outline and rounded corners. The left side features a vertical scroll-like element. The text "Conclusion générale" is centered within the frame.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Au terme de cette étude, il est évident que l'intégration des technologies online et des algorithmes de traitement des signaux offre des opportunités immenses pour améliorer la qualité et l'efficacité du diagnostic médical. La plateforme développée constitue une solution accessible, modulaire et adaptable aux besoins évolutifs de la télémédecine moderne. Elle permet non seulement de traiter efficacement des signaux biomédicaux complexité, mais aussi de visualiser ces données de manière interactive et intuitive, facilitant ainsi leur interprétation par les professionnels de santé.

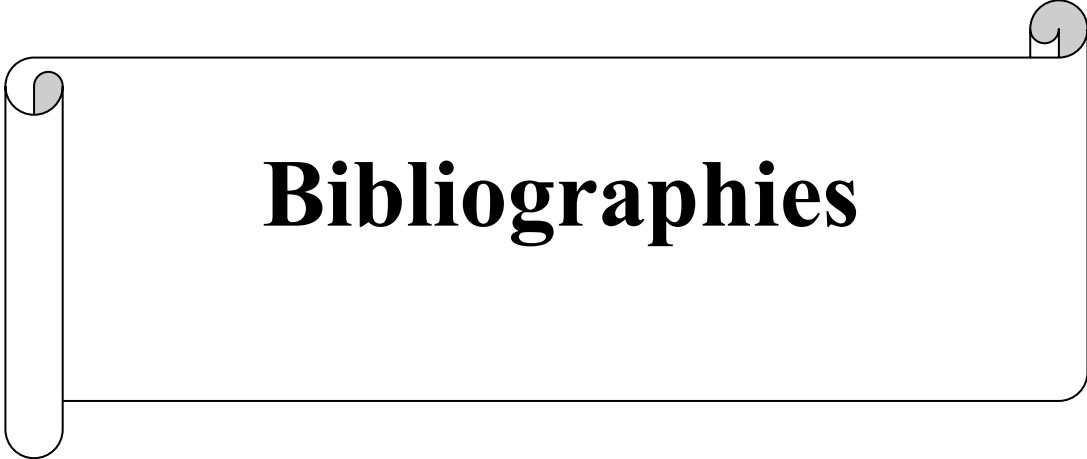
Grâce à l'utilisation de langages web modernes (HTML, CSS, JavaScript), de scripts côté serveur (PHP) et d'une base de données structurée (MySQL), la plateforme garantit une expérience utilisateur fluide et personnalisable. De plus, l'intégration de méthodes mathématiques avancées, telles que l'algorithme de Levenberg-Marquardt, a permis de stabiliser et d'affiner les signaux bruités, augmentant ainsi la fiabilité des mesures extraites. La détection d'anomalies basée sur des règles médicales simples montre également un potentiel prometteur pour un use diagnostic rapide.

Cependant, malgré ses nombreuses qualités, la plateforme reste perfectible. Les limites actuelles résident notamment in la simplicité de l'intelligence artificielle utilisée, l'absence de traitement temps réel des signaux et la gestion mono-utilisateur. À cet égard, plusieurs perspectives d'amélioration peuvent être envisagées :

- ✓ Intégration d'un modèle d'intelligence artificielle plus avancé : Utiliser des réseaux de neurones profonds pour détecter automatiquement des arythmies cardiaques, des crises épileptiques or des difficultés respiratoires avec une précision accrue.
- ✓ Traitement temps réel : Connecter la plateforme à des capteurs physiologiques en temps réel pour permettre une surveillance continue des patients, particulièrement utile dans les unités de soins intensifs ou à domicile.
- ✓ Développement mobile et design adaptatif: Développer une application mobile ou une version responsive de la plateforme pour une usage flexible sur smartphone ou tablette.
- ✓ Gestion multi-utilisateurs et sécurité renforcée : Implémenter un système de gestion des rôles (médecin, infirmier, patient) avec un chiffrement avancé des données pour garantir la confidentialité et la traçabilité.

- ✓ Déploiement en ligne et cloud comptine : Passer d'un hébergement (XAMPP) to une architecture cloud pour permettre l'accès à la plateforme à distance, favorisant la collaboration entre professionnels de santé.

En conclusion, ce projet représente une étape importante vers la démocratisation des outils d'analyse biomédicale accessibles à tous, qu'il s'agisse de praticiens, de chercheurs or d'étudiants. Il ouvre la voie à des applications concrètes dans le domaine de la télémédecine, tout en posant les bases d'un futur système décisionnel intelligent intégrant les dernières avancées en matière d'IA et de Données massives dans le secteur de la santé.



Bibliographies

Bibliographies

- [1] : NEGGAB M, AISSANI N, “Conception et Réalisation d’une Plateforme Web de Téléconsultation Médicale.”, Mémoire Master, Spécialité Conduite de Projet Informatique, université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 25/10/2020.
- [2] : site web: <https://www.em-consulte.com/article/1398997/telemedecine-les-debuts-de-l-histoire>
- [3] : site web: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Télémédecine>.
- [4] ALLAOUI M, “La conception d’une plateforme télé médicale dédiée au traitement des signaux physiologiques : phono cardiogramme”, mémoire de projet de fin d’étude MASTER en GENIE BIOMEDICAL, Université Abou Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2016-2017.
- [5] : site web: <https://zettaoctet.fr/technologie/telemedecine-avantages-inconvenients/>
- [6] : site web: <https://www.pressesante.com/les-avantages-et-les-inconvenients-de-la-telemedecine/>
- [7] : Briganti G., « Introduction à l’Intelligence Artificielle en Médecine », Université libre de Bruxelles, 2020.
- [8] : Galland-Decker C., Brunner P., Marinoni C., Jankovic J., Guardia A., Bastardot F. « Santé numérique : Intelligence artificielle générative en médecine : définitions, usages et limites », Revue Médicale Suisse, vol. 21, n° 907, 26 février 2025.
- [9] : M. BOUHAMED MERZOUG, « Étude et réalisation d’un EEG », mémoire de fin d’étude, Université de Saïda (Dr. Moulay Tahar), 2020.
- [10] : A. KRIBA, A. SEHAL & N. BOUZOUBAÏN, « Traitement et classification du signal EEG », mémoire de fin d’étude, École Nationale Polytechnique d’Alger, 2023.
- [11] : F. BENDJEDDOU, « Application sur la classification de signaux EEG », mémoire de fin d’étude, Université de Tlemcen, 2013.
- [12] : A. FERHATI, « Développement d’un capteur PPG pour applications médicales », mémoire de fin d’étude, Université de Bejaïa, 2019.
- [13] : M. RAÏSSI et S. HADJAB, « Étude comparée de signaux PPG infra-rouge et rouge pour la mesure de SpO₂ », mémoire de fin d’étude, Université d’Oran 2, 2021.
- [14] : M. BACHIR, « Développement d’un module PPG pour suivi cardio-respiratoire », mémoire de fin d’étude, Université Badji Mokhtar – Annaba, 2022.
- [15] : BENAMAR Dounia, AHMED SEGHIR Manel, « Analyse des signaux cardiaques par la méthode d’intelligence artificielle : réseaux de neurones convolutifs (CNN) », mémoire de projet de fin d’études MASTER Filière Électronique Spécialité Instrumentation, Université Saad Dahlab de Blida 1, 2020.

Bibliographies

- [16] : ALIVECOR Inc., « KardiaMobile : Dispositif portable de détection d'arythmies cardiaques », Fiche produit, 2020.
- [17] : TRUONG N.D., NGUYEN A.D., KUHLMANN L., BONYADI M.R., YANG J., IPPOLITO S., KAVEHEI O., « Convolutional neural networks for seizure prediction using intracranial and scalp electroencephalogram », *Neural Networks*, vol. 105, pp. 104–111, 2018
- [18] : DYNSEO, « L'IA et la télémédecine : une nouvelle ère pour les soins à distance », Article en ligne, Agence DYNSEO, 2023.
- [19] : K. LARBANI, « Analyse, conception et réalisation d'une application Web pour la gestion de la scolarité », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2003.
- [20] : A. IBAZIZENE, « Conception et réalisation d'un site web pour le laboratoire LAMPA », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [21] : JavaScript – MDN Web Docs, « Qu'est-ce que JavaScript ? », consulté en 2025.
Site web : <https://developer.mozilla.org/fr/docs/Web/JavaScript>
- [22] : L. MEKIDECHE, « Étude et réalisation d'une base de données pour la gestion des dossiers médicaux », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.
- [23] : Site web : <https://techterms.com/definition/csv>
- [24] : Site web :
<https://prezi.com/p/62a-dy0nb8jz/xampp-votre-environnement-de-developpement-web>
- [25] : Y. YALAOUI, « Électrocardiogramme (ECG) », support de cours, Faculté de Médecine, Université Salah Boubnider Constantine 3, 2023.
- [26] : S. SELLAM, « Électroencéphalographie », support de cours, Faculté de Médecine, Université Oran 1 Ahmed Ben Bella, 2019.
- [27] : R. BEREKSI REGUIG, M.-A. BEKKAI & N. EL-ISLEM, « Réalisation d'un dispositif de mesure du photopléthysmogramme (ppg) », mémoire de fin d'étude, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen, 2013.
- [28] : The MathWorks, Curve Fitting with Levenberg–Marquardt: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/lsqcurvefit.html>

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'une plateforme web intelligente pour l'analyse des signaux biomédicaux (ECG, EEG, PPG). Basée sur une architecture HTML, CSS, JavaScript, PHP et MySQL, et déployée avec XAMPP, la plateforme permet le traitement, la visualisation et l'interprétation des données physiologiques avec un module d'intelligence artificielle basique pour la détection d'anomalies. Les résultats montrent l'efficacité du filtrage par l'algorithme de Levenberg-Marquardt, la fiabilité de la détection des paramètres cardiaques et cérébraux, ainsi que la possibilité de stocker et partager les résultats via une base de données sécurisée. Cette solution offre une approche accessible et modulaire dans le domaine de la télémédecine.

Summary

This thesis presents the design and implementation of an intelligent web platform for the analysis of biomedical signals (ECG, EEG, PPG). Based on an HTML, CSS, JavaScript, PHP and MySQL architecture, and deployed with XAMPP, the platform enables the processing, visualization and interpretation of physiological data with a basic artificial intelligence module for anomaly detection. Results show the effectiveness of filtering by the Levenberg-Marquardt algorithm, the reliability of detection of cardiac and cerebral parameters, and the ability to store and share results via a secure database. This solution offers an accessible, modular approach to telemedicine.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة تصميم وتطوير منصة ويب ذكية لتحليل الإشارات الطبية الحيوية (تخطيط كهربية القلب وتخطيط كهربية الدماغ وتخطيط ضغط الدم). استنادًا إلى بنية HTML و CSS و JavaScript و PHP و MySQL و MySQL، ويتم نشرها عبر XAMPP، تتيح المنصة معالجة البيانات الفسيولوجية وتصورها وتفسيرها باستخدام وحدة ذكاء اصطناعي أساسية للكشف عن الشذوذ. تُظهر النتائج فعالية التصفية بواسطة خوارزمية ليفنبرغ-ماركوارت، وموثوقية الكشف عن المعلمات القلبية والدماغية، والقدرة على تخزين النتائج ومشاركتها عبر قاعدة بيانات آمنة. يوفر هذا الحل نهجًا معياريًا يسهل الوصول إليه للتطبيق عن بُعد.

Agzul

Aymis-agi yessawal yeftmerna akked twensa n tneflit web tazwart i tesæa ad tkemmel asenker n isignalen n tmeddurt am ECG, EEG akked PPG. Tettwensa s tutlayin n web am HTML, CSS, JavaScript, PHP akked MySQL, tettwaseqdec s XAMPP deg uselkim adigan. Tazemred ad ttwali, ad tfek tafat, akked tfsiret n isefka n umdan, s unekcum isefkan i yesean ad ssufen uguren. Imuddan i d-yettwafen ban amahil n ufri s uselkem Levenberg-Marquardt, akked tugna n tsemlit n yisefka n wul akked mezzin. Tanekcumt-agi tettwafed-d d abrid ar-ttwzgen deg telimedicin, tazwart, i d-yennay d afus i usirem n tsekla.