

وزارة البحث العلمي والتعليم العالي

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche
scientifique

جامعة عبد الحميد بن باديس مستغانم

Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des sciences et technologies

Département de génie électrique



THÈSE

Pour obtenir le diplôme de

MASTER EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

Spécialité : *Électronique des systèmes embarqués*

Conception et réalisation d'une application en télémédecine

Présenté par : BENYAMINA Hamza

Soutenu le : 17/06/ 2025 devant le jury composé de :

Président	Moumene Mohammed El Amine	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Examinateur	Khatir Mohammed Rachid	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem
Examinatrice	Bendani Djazia	Maître Assistant "A"	Université de Mostaganem
Encadrant	Mohamed Habib Zahmani	Maitre de Conférences "A"	Université de Mostaganem
Encadrant	Abderrahmane Abdelkader	Maitre de Conférences "B"	Université de Mostaganem

Projet soutenu dans le cadre de l'arrêté 1275

Année Universitaire 2024-2025

Remerciements

Pour nous avoir permis d'être ce que nous sommes devenus aujourd'hui, pour la force et le courage qu'il nous a donné afin de terminer ce travail, nous remercions le SEIGNEUR des mondes par qui tout est possible, Allah le tout Miséricordieux.

Nous tenons à adresser notre gratitude et nos sincères remerciements à nos encadrants, Monsieur ABDERRAHMANE Abdelkader et Monsieur Mohamed HABIB ZAHMANI. Nous les remercions pour la confiance qu'ils nous ont accordée en nous proposant ce sujet, leur disponibilité, leur patience, leurs conseils et directives très instructifs. Nous les remercions énormément pour l'autonomie qu'ils nous ont laissée tout en nous guidant par des pistes de réflexion riches et porteuses.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à ma famille ; ils ont été à mes côtés jusqu'au bout, m'offrant leur amour et leur soutien inconditionnels. C'est tellement réconfortant de savoir que je les ai rendus si fiers de moi, fiers de ma réussite.

À mes coéquipiers du projet de fin d'études : Wahiba, Hadjer, Meriem et Fatima, Merci pour votre participation à ce parcours, pour votre collaboration et l'esprit d'équipe qui nous a unis à chaque étape. Vous avez été une excellente équipe, et ensemble nous avons accompli ce à quoi nous aspirions.

Je ne pourrais peut-être pas tout mentionner, mais je suis reconnaissante que vous ayez été là pour nous soutenir tout au long de ce parcours. À tous ceux que je ne pouvais pas mentionner, Merci.

Résumé

Notre projet décrit les exigences fonctionnelles et techniques de l'application Sehhaty, conçue pour améliorer la gestion des soins grâce à une plateforme centralisée accessible sur mobile, web et ordinateur. L'application vise à faciliter la coordination entre patients, médecins, laboratoires et centres d'imagerie. Elle intègre également un appareil connecté capable de mesurer les paramètres vitaux en temps réel (SpO₂, fréquence cardiaque) et de les transmettre de manière sécurisée au Dossier Médical Informatisé (DMI). Elle permet aux utilisateurs de consulter leur DMI, de prendre des rendez-vous en ligne et de surveiller les paramètres vitaux via l'appareil connecté. Nous aborderons cet appareil et son processus de fabrication dans cette partie de la thèse, ainsi que la manière dont le photopléthysmogramme (PPG) nous permet de créer un appareil portable non invasif.

Mots clés

Télémédecine – Photopléthysmographie (PPG) – Dispositif portable – Capteur MAX30102 – Application mobile

Abstract

Our project describes the functional and technical requirements of the Sehhaty application, designed to improve care management through a centralized platform accessible on mobile, web, and desktop. The application aims to facilitate coordination between patients, physicians, laboratories, and imaging centers. It also integrates a connected device capable of measuring vital parameters in real time (SpO₂, heart rate) and securely transmitting them to the Electronic Medical Record (EMR). It allows users to consult their EMR, book appointments online, and monitor vital parameters via the connected device. We will discuss this device and its manufacturing process in this part of the thesis, as well as how the photoplethysmogram (PPG) allows us to create a non-invasive wearable device.

Keywords:

Telemedicine – Photoplethysmography (PPG) – Portable device – MAX30102 sensor – Mobile application

ملخص

يتناول موضوع مشروعنا المتطلبات الوظيفية والتقنية لتطبيق "صحتي"، المصمم لتعزيز إدارة الرعاية الصحية من خلال منصة مركزية متاحة عبر الهاتف المحمول والويب و سطح المكتب. يهدف التطبيق إلى تسهيل التنسيق بين المرضى والأطباء والمختبرات ومراكز التصوير. كما يدمج جهازًا متصلًا قادرًا على قياس العلامات الحيوية آنيًا (تشبع الأكسجين في الدم، معدل ضربات القلب) ونقلها بشكل آمن إلى السجل الصحي الإلكتروني. يتيح التطبيق للمستخدمين الاطلاع على سجلهم الصحي الإلكتروني، وحجز المواعيد عبر الإنترنت، ومراقبة العلامات الحيوية من خلال الجهاز المتصل. سنتناول في هذا الجانب من الرسالة هذا الجهاز وعملية تصنيعه، وكيف يُمكننا مخطط التحجم الضوئي (PPG) من صنع جهاز غير جراحي قابل للارتداء.

الكلمات المفتاحية

الطب عن بعد – تخطيط ضغط الدم الضوئي – (PPG) جهاز محمول – مستشعر – MAX30102 تطبيق جوال

Table des matières

Remerciements	2
Introduction Générale	12
Contexte : La télémédecine et son importance croissante	13
Introduction aux appareils portables de surveillance de la santé	14
Aperçu de la photopléthysmographie (PPG)	14
Problème ou question de recherche	14
Chapitre 1 : Cadre théorique et étude de littérature	15
1.1 Systèmes de télémédecine et leurs architectures	16
1.1.1 Définition et utilisation de la télévision	16
1.1.2 Principaux composants des systèmes de conception	17
1.1.3 Approche centrée sur le patient	18
1.2 Dispositifs portables pour la surveillance de la santé	18
1.2.1 La généralisation des bracelets et des montres connectées	18
1.2.2 Bagues, patchs et capteurs discrets	19
1.2.3 La fonction principale des capteurs PPG	19
1.2.4 Intégration des applications mobiles et des services de santé	20
1.2.5 Enjeux et perspectives	20
1.3 Détails principes de la photopléthysmographie (PPG)	21
1.3.1 Physique : la lumière au service du flux sanguin	21
1.3.2 Architecture de PPG	21
1.3.3 Vérifier le signal PPG : formes et indications	22
1.3.4 Sources d'erreurs et les limites du PPG	23
1.4 Paramètres physiologiques pouvant être dérivés du signal PPG	24
1.4.1 Fréquence cardiaque (FC)	24
1.4.2 Saturation en oxygène du sang (SpO ₂)	25
1.5 Traitement des signaux PPG : techniques essentielles	26
1.5.1 Fragilité et nature du signal PPG	27
1.5.2 Étape 1 : Filtrage visant à annuler les interférences	27
1.5.3 Étape 2 : Détection des battements cardiaques à partir des pics	27
1.5.4 Étape 3 : Extraction des caractéristiques	28

1.5.5	Étape 4 : Normalisation et segmentation	28
1.5.6	Dernier objectif : qualité et fiabilité des données	28
1.6	Protocoles de communication dans les systèmes téléphoniques	29
1.6.1	Le rôle des protocoles de communication dans les systèmes de santé en réseau	29
1.6.2	Bluetooth Low Energy (BLE) : la norme pour les appareils médicaux portables	29
1.6.3	Wi-Fi : pour les systèmes de plus grande capacité et l'utilisation stationnaire	30
1.6.4	Sécurité des transmissions : une exigence absolue.....	31
1.6.5	Vers des protocoles hybrides et intelligents.....	32
1.7	Éthique et sécurité des dons par téléphone	32
1.7.1	La place de la confidentialité dans les systèmes de santé mobiles	32
1.7.2	Consentement éclairé et transparence du traitement.....	32
1.7.3	Législation actuelle : RGPD, HIPAA et autres réglementations	33
1.7.4	Protection contre les intrusions et les accès non autorisés	33
1.7.5	Une responsabilité partagée entre les développeurs, les propriétaires et les utilisateurs	33
Chapitre 2 : Conception du système et méthodologie.....		34
2.1	Aperçu du système proposé	35
2.2	Design du dispositif portable	35
2.2.1	Circuit	35
2.2.2	Conception physique : Boîtier 3D et stabilisation des mesures	41
2.3	Développement des applications.....	42
2.3.2	Principales fonctionnalités des applications.....	43
2.4	Serveur infrastructure et stockage cloud (Firebase)	44
2.4.1	Définition	44
2.4.2	Pourquoi le Firebase	44
2.4.3	Le service utilisé depuis notre côté.....	45
2.5	Méthodologie d'acquisition des données PPG.....	45
2.6	Traitement du signal PPG.....	45
2.6.1	Filtrage et prétraitement.....	45
2.6.2	Extraction des caractéristiques	45

2.7 Données transmises entre les éléments du système.....	46
2.8 Outils et environnements de développement utilisés	46
Chapitre 3 : Mise en œuvre et résultats expérimentaux	49
3.1 Mise en œuvre du système.....	49
3.1.1 Aperçu du matériel	49
C. Intégration du capteur et protocole de communication I ² C :.....	50
3.2 Développement du logiciel embarqué pour ESP32.....	50
3.2.1 Comment on a organisé le code avec les objets	50
3.2.2 Machine à états pour gérer le système	51
3.2.3 Comment les états changent.....	52
3.2.4 Utilisation de l'écran TFT.....	53
3.2.5 Stratégie de communication sans fil.....	54
3.2.6 Gestion des mises à jour automatiques (OTA) :.....	54
3.2.7 Maintenance automatique du système :	54
3.2.8 Diagramme d'activité	56
3.2.9 Configuration et prérequis	57
3.3 Connectivité : Wi-Fi, Bluetooth et intégration de Firebase	57
3.4 Architecture logicielle de l'application mobile.....	58
3.5 Composants côté serveur et architecture en nuage.....	58
3.6 Dispositif expérimental et collecte de données	59
3.6.1 Environnement d'essai et participants :	59
3.6.2 Processus de collecte des données.....	59
3.7 Analyse des données et extraction des paramètres physiologiques.....	59
3.7.1 Prétraitement et filtrage du signal.....	59
3.7.2 Fréquence cardiaque et autres mesures.....	60
3.8 Évaluation des performances	60
3.8.1 Évaluation de la qualité du signal.....	60
3.8.2 Fiabilité de la transmission	60
3.8.3 Précision et temps de latence	60

3.9 Défis et collaboration	61
3.9.1 Défis techniques	61
3.9.2 Collaboration interdisciplinaire.....	61
3.10 Résultats finaux.....	61
3.11 Perspectives d'amélioration avec le M5Stick C Plus2.....	66
Conclusion générale.....	67
Chapitre 4 : Business Model Canvas (BMC) avec Business plan(BP)	68
Business Model Canvas (BMC) :	69
1.1 Partenariats clés :	69
1.2 Activités clés :.....	69
1.3 Ressources clés :	69
1.4 Proposition de valeur :.....	70
1.5 Relations avec les clients :.....	70
1.6 Canaux de distribution :.....	70
1.7 Segments de clients :	70
1.8 Structure des coûts :	71
1.9 Sources de revenus :.....	71
Business plan (BP).....	71
Qui sommes-nous :	71
Nos Objectifs	72
Analyse FFOM (SWOT).....	72
Forces de notre plateforme	72
Faiblesses de notre service	73
Opportunités	73
Menaces.....	74
Stratégie marketing et concurrentielle.....	74
Plan financière.....	75
Références	77

List des figures

Figure 1. 1 Architecture de la télémédecine.....	16
Figure 1. 2 Diverse device portable.....	18
Figure 1. 3 Architecture de PPG.....	22
Figure 1. 4 La forme du signal PPG.....	23
Figure 1.5 Fréquence cardiaque depuis PPG.....	25
Figure 1. 6 Les composant AC DC dans le signal PPG.....	26
Figure 1. 7 Bluetooth Low Energy device.....	30
Figure 1. 8 logo de wifi.....	31
Figure 2. 1 Microcontrôleur ESP32.....	37
Figure 2. 2 Le capteur MAX30102.....	38
Figure 2. 3 composant de système du capteur.....	39
Figure 2. 4 Diagramme du système (MAX30102).....	40
Figure 2. 5 câblage entre MAX30102 et ESP32.....	40
Figure 2. 6 Nouveaux projet dans Solide Works.....	41
Figure 2. 7 L'imprimant 3D utilisée.....	42
Figure 2. 8 LOGO du Firebase.....	44
Figure 2. 9 Interface de « Arduino IDE ».....	47
Figure 2. 10 Firebase console.....	47
Figure 2. 11 Solid Works éditeur.....	48
Figure 3. 1 digramme de classe du système.....	51
Figure 3. 2 Diagramme machine d'état.....	53
Figure 3. 3 Diagramme d'activité.....	56
Figure 3. 4 fichier en-tête et bibliothèque.....	57
Figure 3. 5 Configuration Firebase et OTA.....	57
Figure 3. 6 RTDB Firebase.....	62
Figure 3. 7 données étais transmette dans le serial monitor.....	62
Figure 3. 8 données étais transmette dans le serial monitor.....	63
Figure 3. 9 résumer des données.....	64
Figure 3. 10 graph de SpO2 et FC.....	65
Figure 4. 1 cout d'investissement.....	75
Figure 4. 2 masse salariale.....	75
Figure 4. 3 les charges externes.....	76
Figure 4. 4 les achats directs.....	76
Figure 4. 5 La synthèse finale.....	76

List des abréviations

PPG	Photopléthysmographie
SpO₂	Saturation pulsée en oxygène
FC	Fréquence cardiaque
BLE	Bluetooth Low Energy
DMI	Dossier Médical Informatisé
ESP32	Microcontrôleur avec Wi-Fi et Bluetooth
RTDB	Real Time Database
TFT	Thin Film Transistor (écran LCD)
OTA	Over The Air (mise à jour à distance)
API	Application Programming Interface
UI	Interface Utilisateur
HIPAA	Health Insurance Portability and Accountability Act
RGPD	Règlement Général sur la Protection des Données
BMC	Business Model Canvas

Introduction Générale

Ces dernières années, nous avons constaté que le domaine de la santé évolue rapidement, notamment grâce aux nouvelles technologies. Cependant, l'accès à un médecin reste difficile pour beaucoup, en particulier dans les zones reculées ou mal desservies. À l'inverse, les cabinets sont souvent surchargés, et le suivi des patients chroniques demande beaucoup de temps et de ressources. C'est dans ce contexte que la télémédecine prend toute son importance.

La télémédecine consiste à surveiller un patient à distance à l'aide d'outils numériques. Elle permet de suivre l'état de santé d'une personne sans nécessiter de déplacements fréquents vers des centres médicaux. Grâce à de petits capteurs, des dispositifs électroniques et des communications sans fil de plus en plus accessibles, les données de santé peuvent être collectées et transmises à un spécialiste, en temps réel ou de manière différée.

Dans ce projet, nous avons souhaité nous inscrire dans cette démarche en concevant une solution simple, portable et abordable, capable de surveiller certains indicateurs vitaux sans recourir à un brassard traditionnel. Pour y parvenir, nous avons opté pour un capteur optique, le MAX30102, associé à une carte électronique ESP32. L'objectif est de capter des signaux corporels (comme le rythme cardiaque) et de les analyser.

Cette thèse retrace l'ensemble du processus, depuis l'idée initiale jusqu'à la mise en œuvre concrète du système. Cet article explique les raisons du choix des composants, la gestion des données, et la manière dont cet outil pourrait, à long terme, s'intégrer dans des applications de télémédecine.

À travers ce travail, notre objectif est clair : prouver qu'avec un peu de créativité, des compétences techniques solides et des outils judicieusement choisis, il est possible de développer des solutions innovantes pour améliorer le suivi médical des patients, tout en fournissant des données vitales aux personnes soucieuses de leur santé, comme les sportifs.

Contexte : La télémédecine et son importance croissante

La manière dont les soins médicaux sont dispensés a radicalement changé ces derniers temps. Grâce à la technologie numérique, il est devenu possible de soigner les patients et de suivre leur état à distance, sans avoir à se rendre dans une clinique ou un hôpital. C'est de la télémédecine.

Au départ, la télémédecine était utilisée dans des circonstances exceptionnelles, par exemple pour les patients qui vivaient très loin des complexes médicaux. Cependant, au fil du temps, il s'est transformé en bien plus qu'un simple service de réparation. De nos jours, elle est devenue le cœur de la gestion des maladies chroniques, du suivi postopératoire ou de la prévention. La crise sanitaire de la COVID-19 a également démontré la commodité, voire la nécessité, de pouvoir rencontrer virtuellement un professionnel de la santé, lorsque les rendez-vous en personne deviennent plus problématiques.

En facilitant l'accès aux soins de santé, la télémédecine permet de mieux contrôler le temps des spécialistes, de réduire les temps d'attente inutiles et d'identifier certains problèmes de santé plus tôt. Cela améliore non seulement le confort du patient, mais aussi l'efficacité du système de santé dans son ensemble.

Ce qui rend la télémédecine si passionnante aujourd'hui, c'est l'émergence de petits appareils connectés capables de capturer des signes vitaux tels que la fréquence cardiaque, la saturation en oxygène et même la pression artérielle, et dans certains cas, de mesurer la saturation en oxygène de manière non invasive. Ces appareils sont faciles à utiliser et peuvent être utilisés à la maison ou au travail, envoyant des images en temps réel au médecin.

Comme l'a identifié l'Organisation mondiale de la santé, la télémédecine est désormais considérée comme un moyen sûr d'assurer la continuité des soins de santé, en particulier dans les conditions où les installations médicales font défaut.

Introduction aux appareils portables de surveillance de la santé

Les appareils portables répondent aux besoins de nombreuses personnes. Appareils intelligents, bracelets de fitness et appareils connectés : ces objets ne contiennent pas plus d'informations que l'utilisateur ou l'ordinateur. Il permet également d'enregistrer les signes vitaux tels que la fréquence cardiaque, le taux d'oxygène dans le sang (SpO₂), la somnolence et la température corporelle. Cette approche se poursuit de manière non invasive avec acquisition du signal PPG, ouvrant la voie à une nouvelle méthode d'améliorer le diagnostic précoce et le suivi à distance des patients.

Aperçu de la photopléthysmographie (PPG)

Les appartements Santee Ports sont équipés des dernières technologies et PPG est situé au centre. Il s'agit d'une option qui permet d'ajuster les paramètres de volume dans les textures, en utilisant une technique simple utilisant la lumière. Un condensateur est placé sur la valve, par exemple, pour empêcher les battements cardiaques, comme l'oxygène dans le sang, et d'autres informations sont utilisées pour augmenter la pression artérielle.

Cette technologie présente l'avantage supplémentaire d'être pas coûteuse, simple et idéale pour être petits capteurs. Elle est déjà utilisée dans de nombreux appareils portables et médicales, et continue d'intéresser les chercheurs pour l'utilisation dans des applications plus précises et diversifiées.

Problème ou question de recherche

Bien que les technologies PPG soient bien connues, elles sont loin d'atteindre leur plein potentiel, notamment dans le contexte de la télémédecine. La question principale de ce projet est : ***Comment pouvons-nous proposer une solution portable, légère, robuste et facile à utiliser pour mesurer les signes vitaux à partir de mesures PPG prises au doigt, qui peut être connectée à une application de télémédecine accessible au patient et les médecins ?***

Ce problème entraînera d'autres problèmes : la qualité du signal PPG, les méthodes adaptatives, la précision et surtout, comment intégrer tout dans un système de communication sécurisé.

Chapitre 1 : Cadre théorique et étude de littérature

1.1 Systèmes de télémédecine et leurs architectures

Les systèmes de télémédecine représentent probablement une solution innovante face aux limites actuelles des équipements dans les systèmes de soins. Ils prennent en considération, dans la perception de la population, la localisation de l'hôpital, la chambre du patient et les centres de soins. Cette approche s'appuie sur l'emploi de technologies sophistiquées qui favorisent la surveillance à distance entre divers services médicaux (voir Figure 1.1), facilitant de ce fait la consultation et garantissant un suivi constant de la santé du patient.

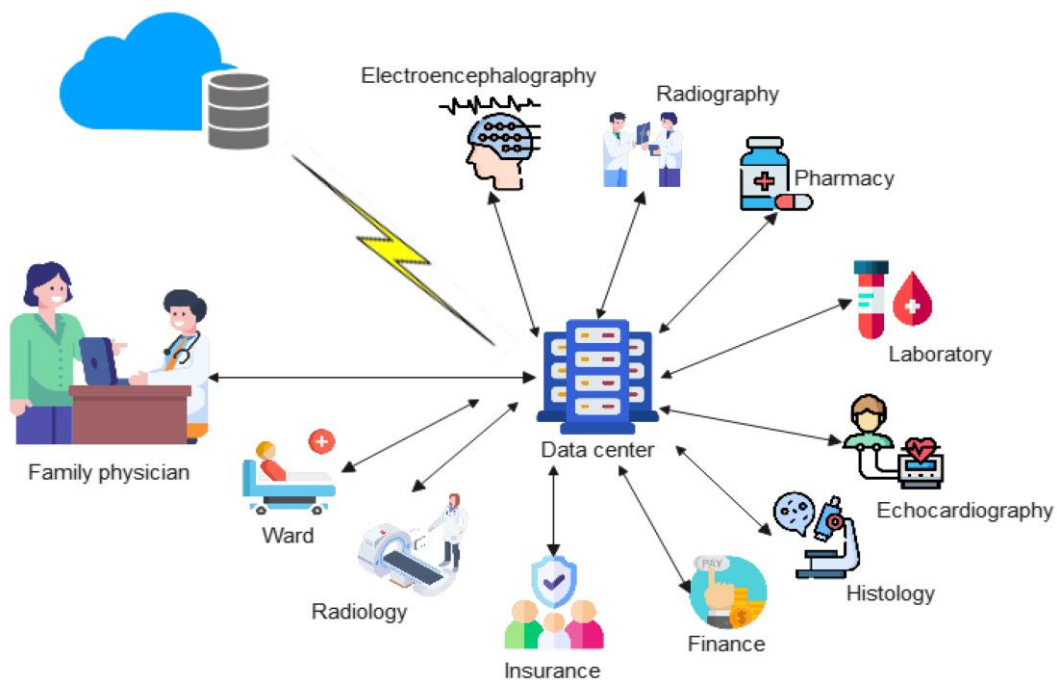


Figure 1. 1 Architecture de la télémédecine

1.1.1 Définition et utilisation de la télévision

Grâce aux technologies de l'information et de la communication (TIC). Il existe divers autres services dans le monde : consultation (consultation médicale à distance), formation (avec l'aide d'experts professionnels), assistance (aide à la réalisation d'un acte médical), traitement (préservation des constantes biologiques ou physiologiques), et autres. Télérégulation (gestion des urgences) [1]. Ils permettent de maintenir une communication continue entre le corps médical et le patient, pendant la durée de la permanence du personnel de la clinique ou de l'hôpital.

1.1.2 Principaux composants des systèmes de conception

Derrière, les appareils qui intégrant une architecture technique conçue compose ces éléments de base :

a) Le module de collecte de données

Le premier maillon de cette chaîne est le module de collecte, connecté à un condensateur biomédical, à un appareil portable jetable (associé à un connecteur extensible ou à un capteur d'oxygène), ou à une application mobile permettant d'enregistrer les symptômes ou de répondre à des questionnaires médicaux. Ce module mesure les signes vitaux ou les données cliniques : fréquence cardiaque, saturation en oxygène. Pour obtenir des données exploitables, le pilote doit répondre à des exigences précises : précision, stabilité, réparation, facilité d'utilisation et, dans le cas d'IDEAL, non-invasif afin de garantir un confort d'utilisation à domicile [2].

b) Le système de transmission des données

L'une des données de secours, celles résultant de l'analyse ou du stockage du système. Il s'agit de la connexion entre des technologies de communication sans nom comme le Bluetooth, le Wi-Fi ou les téléphones portables (3G, 4G ou 5G). Ces technologies permettent la transmission des données à des moments précis ou à des intervalles de connexion avec un serveur distant, une application mobile ou un centre de soins. Ce module doit garantir la rapidité du transfert, ainsi que la sécurité des appareils confidentiels et sensibles. La réception du certificat, l'anonymisation et les protocoles de sécurité (TLS/SSL) sont nécessaires pour respecter la réglementation relative à la protection du personnel, comme le RGPD en Europe [3].

c) Architecture de la plateforme et analyse des données

Cette architecture permet d'analyser le système, qu'il soit transmis au cloud, à un smartphone ou à un dispositif médical. Cette plateforme a pour mission de collecter les dons, de les visualiser sous un format compréhensible (tableaux de bord, graphiques, alertes) et de fournir des informations cliniques en continu. Elle peut être utilisée directement par le patient pour l'orienter vers l'équipe hospitalière, mais aussi par un médecin pour suivre l'évolution d'une pathologie chronique ou induire une intervention précoce dans la détection d'anomalies. Certaines plateformes sont couplées à des algorithmes d'intelligence artificielle permettant d'identifier à domicile des anomalies prématurées ou des pathologies émergentes, comme une poussée hypertensive ou un épisode d'origine [4].

1.1.3 Approche centrée sur le patient

Ce modèle ne comporte aucune fonction facilitant l'intégration aux modules. Le système idéal est celui qui parvient à collecter les données sans interrompre la vie du patient, à transmettre les données sans latence, et à assurer le reste de manière intelligente, avec une réelle valeur médicale. Il s'agit de l'application centrale de l'utilisateur, qu'il soit patient ou professionnel, et dont l'adoption de ces technologies est conditionnée. Un système téléphonique n'est pas une technologie particulière : c'est un écosystème cohérent, interopérable, sécurisé et orienté vers l'usage.

1.2 Dispositifs portables pour la surveillance de la santé

Les capteurs portables de surveillance de la santé, ou wearables (Figure 1.2), sont actuellement à l'avant-garde d'une véritable révolution à l'ère de la médecine préventive et personnalisée. Grâce aux progrès de la miniaturisation, de la connectivité et de l'intelligence artificielle, il est désormais possible de suivre de nombreux paramètres physiologiques en temps réel, au poignet, au doigt, au thorax ou même sur la peau. Ces dispositifs connectés ne se contentent plus de compter les pas ou d'afficher l'heure : ils deviennent de véritables alliés pour la santé.



Figure 1. 2 Diverse device portable.

1.2.1 La généralisation des bracelets et des montres connectées

Parmi les appareils les plus largement adoptés par le grand public, les montres connectées occupent une place de choix. Apple, Fitbit, Samsung, Garmin et Huawei comptent parmi les marques qui ont inondé le marché de modèles équipés de capteurs sophistiqués pour suivre la fréquence cardiaque, le taux d'oxygène dans le sang (SpO2), la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC), le stress et même la qualité du sommeil [5]. Les informations sont ensuite

téléchargées sur une application mobile permettant à l'utilisateur de suivre ses habitudes de santé au quotidien.

Outre la surveillance de la santé personnelle, certaines de ces montres, comme l'Apple Watch Series 8, intègrent des fonctionnalités médicales certifiées, comme la surveillance par électrocardiogramme (ECG) monodérivation ou la détection de chutes à haute altitude, avec appels d'urgence automatiques intégrés [6]. Ces fonctionnalités, bien que toujours encadrées par des contraintes réglementaires, constituent une évolution progressive de ces produits vers le domaine médical.

1.2.2 Bagues, patchs et capteurs discrets

Outre les montres, de nouveaux dispositifs portables sont lancés, moins invasifs et parfois plus spécifiques. Les bagues connectées, comme l'Oura Ring, offrent un moyen élégant de surveiller la fréquence cardiaque, la température corporelle ou le sommeil, en étant moins intrusives qu'une montre [7]. Les patchs adhésifs, souvent utilisés en milieu clinique ou semi-clinique, permettent une surveillance prolongée sur plusieurs jours ou semaines en les posant directement sur la peau, la poitrine ou le bras.

Ces patchs contiennent des capteurs avancés capables de capter l'activité électrocardiographique (ECG), la respiration ou les mouvements corporels. Nombre de ces dispositifs, comme ceux développés par VitalConnect ou BioIntelliSense, sont même autorisés par la FDA pour un usage thérapeutique et permettent de transmettre des données directement à un portail de surveillance distant [8]. Leur utilisation est particulièrement utile pour les patients à domicile, les patients sortant de l'hôpital ou les personnes souffrant de maladies chroniques.

1.2.3 La fonction principale des capteurs PPG

La plupart des dispositifs portables utilisent une technologie optique simple mais stable : la photopléthysmographie (PPG). Le capteur utilise une émission de lumière (dans certaines configurations, une LED infrarouge ou verte) et un photodétecteur qui mesure les variations de la lumière transmise en fonction du mouvement du sang sous la peau. Ces signaux peuvent être isolés pour permettre des mesures telles que la fréquence cardiaque, la SpO₂ ou des composantes de la pression artérielle [9].

Le PPG est particulièrement utilisé pour sa faible consommation d'énergie, sa miniaturisation aisée, son faible coût et son caractère non invasif, ce qui en fait la technologie la plus recherchée pour les montres, bagues, écouteurs et autres dispositifs de surveillance [10]. Les fabricants d'objets connectés utilisent des appareils tels que le MAX30102 ou le MAX86141. Leur intégration dans les objets du quotidien favorise une surveillance continue sans contraintes excessives pour l'utilisateur.

1.2.4 Intégration des applications mobiles et des services de santé

Le succès de ces dispositifs portables dépendra également de leur efficacité à s'interfacer avec une application mobile et à servir d'intermédiaire entre le capteur et, éventuellement, le médecin. Cette application fournit des données enregistrées sur les mesures prises, une visualisation possible sous forme de graphiques ou de tendances, et la génération automatique de notifications d'alarme en cas d'exception.

Certaines applications intègrent également un mécanisme sécurisé de partage de données avec les professionnels de santé pour la surveillance à distance des maladies chroniques, la prise en charge postopératoire ou la prévention des rechutes. Ceci est assez cohérent avec les systèmes de surveillance à distance remboursés par l'assurance maladie dans certains pays [11].

1.2.5 Enjeux et perspectives

Même si les objets connectés actuels montrent qu'ils peuvent vraiment aider à rendre la prévention et le suivi de santé plus accessibles, il reste encore pas mal de points à améliorer. Les données doivent être fiables d'un point de vue médical, la vie privée des gens doit être bien protégée, et il faut que les professionnels de santé acceptent d'utiliser ces outils dans leur travail. Pour que ces appareils soient vraiment utilisés dans le médical, ils doivent passer par des validations strictes (comme les normes CE, FDA, ou ISO), ce qui fait que certains produits grand public, même s'ils sont populaires, ne sont pas toujours utilisables dans un cadre médical sérieux.

D'après des articles du *Monde* et les dernières recommandations du ministère de la Santé en Algérie, l'avenir pourrait aller vers une combinaison entre capteurs biométriques, intelligence artificielle et plateformes numériques. Cette convergence pourrait rendre la médecine plus prédictive, plus adaptée à chaque personne, et accessible à plus de monde. Ce serait un vrai

tournant pour les systèmes de santé, surtout dans les pays qui veulent moderniser l'accès aux soins comme l'Algérie

1.3 Détails principes de la photopléthysmographie (PPG)

La photopléthysmographie (PPG) est l'utilisation de technologies non invasives pour la surveillance des paramètres cardiovasculaires. Discret, simple à mettre en œuvre dans des dispositifs portables et économiquement, il est également important comme sortie centrale vers le suivi du Sanctuaire, où se trouvent les spécificités des environnements cliniques. Pour comprendre la richesse de cette technologie, il est important d'explorer les éléments matériels, les éléments électroniques utilisés et les dispositifs d'exploitation du son.

1.3.1 Physique : la lumière au service du flux sanguin

Le principe du PPG repose sur l'interaction entre la lumière émise par une diode électroluminescente et le tissu biologique, principal composant de la peau et des sanitaires. Lorsqu'un jet radioactif (rouge ou infrarouge) est appliqué sur la peau du doigt, une partie de celle-ci est absorbée par l'hémoglobine présente dans le sang, provoquant ainsi un reflux ou un effet diffus du volume sanguin local. Afin de changer la couleur de l'écran, le volume de la lumière se déplace, contrôlant ainsi également la quantité de lumière absorbée [12].

Ces micro-variations sont captées par un photodétecteur placé à proximité de la LED, qui traduit l'intensité lumineuse en un signal électrique analogique : c'est le signal PPG. Il s'agit donc d'un dispositif direct à partir de l'activité du cœur, corrigé en plaçant l'écran pulsatile dans les salles d'art superficielles [13].

1.3.2 Architecture de PPG

Le condensateur PPG de base constitue les principes de base :

- **Une ou plusieurs LED :** généralement rouge (env. 660 nm) et infrarouge (env. 940 nm), parfois verte (525 nm), en utilisant l'application. Lorsque Le capteur est en contact direct avec la surface de la peau pour des mesurer efficace.

- **Un photodétecteur** : Il est placé soit à l'arrière de la LED (mode réflexion), soit à l'avant (mode transmission). La lumière émise par la LED traverse ou est réfléchiée par les tissus biologiques, puis est captée par le photodétecteur qui la convertit en un signal électrique proportionnel à l'intensité lumineuse (voir Figure 2.3)

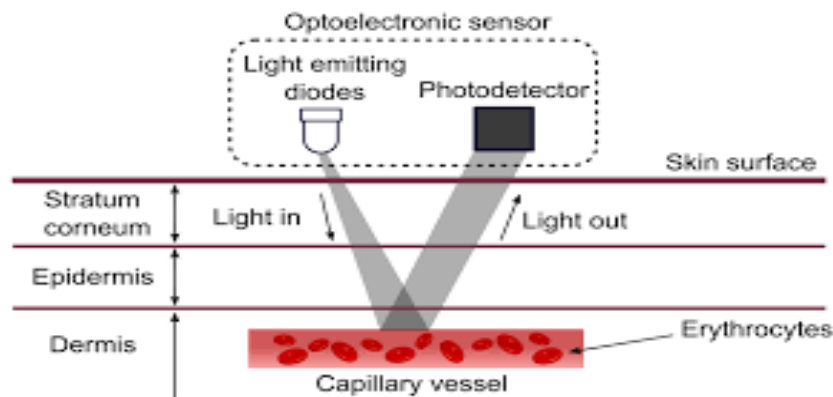


Figure 1. 3 Architecture de PPG utilisé dans l'étude de Chellamani et al. [2025].

Le mode **réflexion** est le plus couramment utilisé dans les zones où l'appareil est fixé fermement, comme les poignets ou les sacs portables, car il permet une mesure stable même en mouvement. Le mode **transmission**, quant à lui, est généralement utilisé dans des zones plus fines et spécifiques du corps, comme les doigts ou le lobe de l'oreille, où la lumière peut traverser les tissus. [14].

1.3.3 Vérifier le signal PPG : formes et indications

Le signal PPG est synchronisé avec le rythme cardiaque et apparaît à intervalles réguliers. Chaque cycle comprend :

- Une montée rapide (systole) : correspondant à la phase de contraction du cœur, lorsque le sang est éjecté dans les artères.
- Un pic systolique, suivi d'une descente progressive (diastole). Sur cette pente descendante, on peut observer une petite ondulation (appelée onde dicrote), causée par la fermeture de la valve aortique et le recul élastique de l'aorte.

Ce signal est utilisé pour extraire des informations de base telles que la fréquence cardiaque (voir Figure 1.4). Il peut également être exploité pour analyser la variabilité du rythme cardiaque, détecter des arythmies, ou estimer la pression artérielle à l'aide de modèles mathématiques adaptés [15].

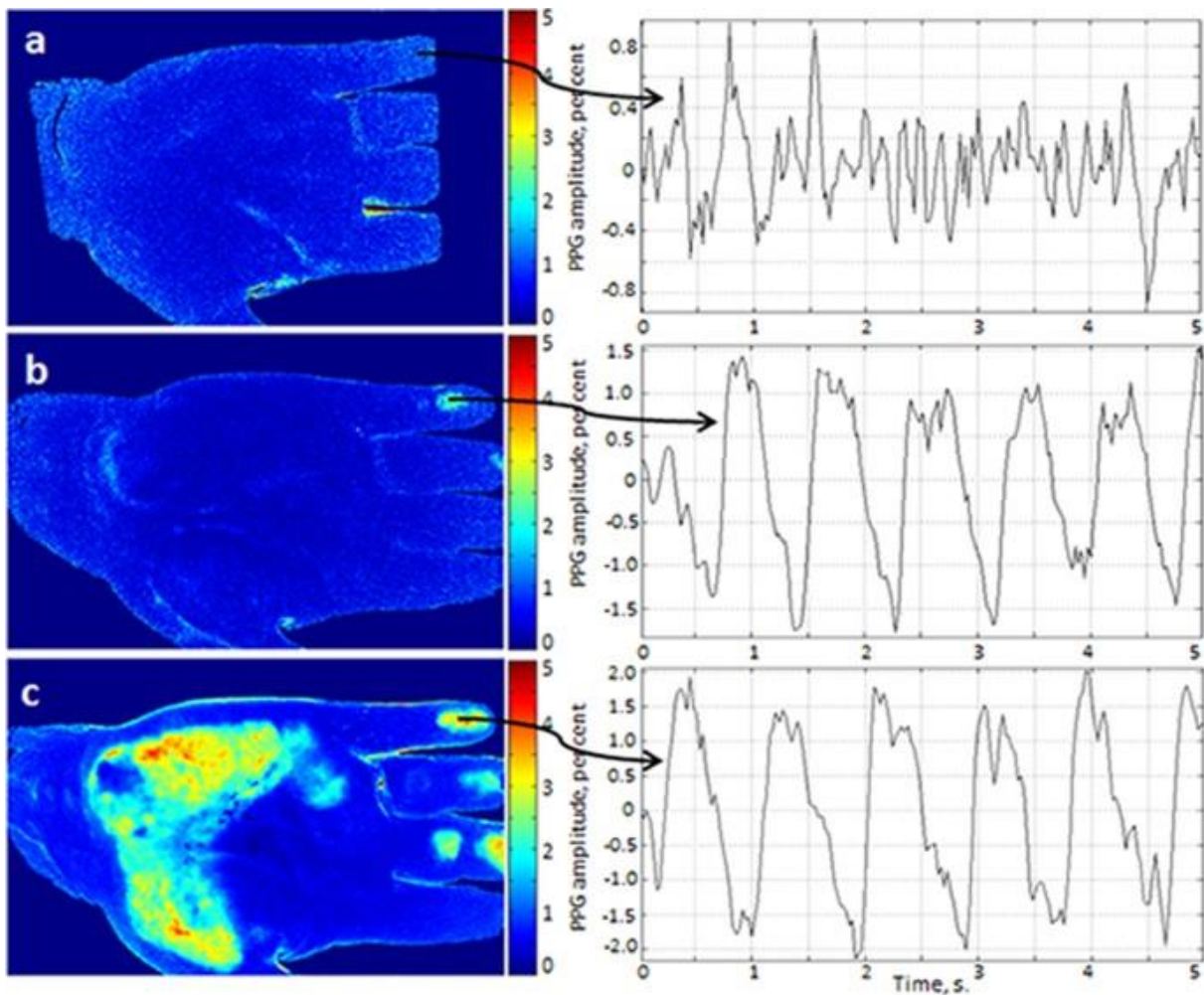


Figure 1. 4 La forme du signal PPG [12].

1.3.4 Sources d'erreurs et les limites du PPG

Bien que le PPG soit une méthode simple et non invasive, il est très sensible à plusieurs facteurs externes pouvant compromettre la fiabilité des mesures. Voici les principales sources de perturbations fréquentes :

- **Mouvements du porteur :** Un simple équilibrage du poignet ou même une contraction musculaire peuvent entraîner des variations de lumière similaires à celles causées par les pulsations sanguines, générant ainsi des artefacts de mouvement.
- **Variations de température :** Un fort froid peut Provoque un rétrécissement des vaisseaux sanguins., ce qui réduit les performances de diffusion et la qualité du signal obtenu.

- **La position du capteur** : Position large, pression excessive ou position asymétrique de la peau due à une faible pression.
- **Des paramètres individuels** : tels que la couleur de la peau ou la taille des doigts peuvent affecter la diffusion de la lumière et la qualité du signal reçu.

Ces perturbations rendent parfois le trait du signal complexe, et nécessitent l'utilisation de filtres numériques, d'algorithmes de correction et de techniques d'application pour automatiser la séparation des véritables données des zones physiologiques des bruits externes.

1.4 Paramètres physiologiques pouvant être dérivés du signal PPG

Le signal PPG (photopléthysmographique) est une source précieuse d'informations physiologiques, facilement exploitable grâce à un capteur optique appliqué sur la peau. Le signal lumineux, qui suit les variations du volume sanguin dans les capillaires, permet d'obtenir de nombreuses indications sur la santé cardiovasculaire et d'autres aspects de la santé, parfois avec une précision remarquable, notamment en combinaison avec les techniques modernes de traitement du signal et d'intelligence artificielle. Son caractère non invasif et sa facilité d'intégration aux appareils connectés rendent la PPG particulièrement intéressante pour une surveillance en temps réel, non intrusive et à domicile.

1.4.1 Fréquence cardiaque (FC)

La fréquence cardiaque est l'un des premiers paramètres pouvant être extraits d'un signal PPG. Chaque battement cardiaque produit une onde de pression artérielle, correspondant à un pic du tracé PPG. En mesurant le temps entre deux pics successifs (Figure 2.5), on peut extraire la fréquence cardiaque instantanée en battements par minute (BPM). Cette méthode est courante dans les montres connectées, les bracelets connectés et même les bagues connectées, avec une précision tout à fait satisfaisante au repos [16].

$$\text{Fréquence cardiaque (Fc)} = T/60$$

T : c'est la période entre deux pics successifs du signal (en secondes).

Fc : c'est les battements cardiaques par minute.

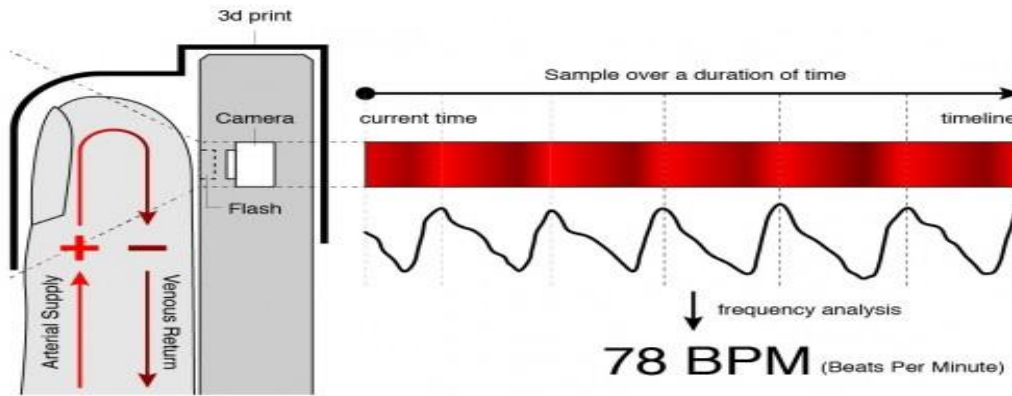


Figure 1.5 Fréquence cardiaque depuis PPG

La facilité d'accès aux informations permet diverses applications : surveillance de la fréquence cardiaque à l'effort, détection d'anomalies telles que la bradycardie ou la tachycardie, ou analyse de la récupération après l'effort.

1.4.2 Saturation en oxygène du sang (SpO_2)

Un autre indicateur important accessible grâce à la PPG est la saturation en oxygène du sang (SpO_2), ou le pourcentage d'hémoglobine dans le sang transportant de l'oxygène. Pour cette mesure, le capteur utilise la lumière rouge (environ 660 nm) et l'infrarouge (environ 940 nm). L'hémoglobine oxygénée et l'hémoglobine désoxygénée absorbant différemment ces deux lumières, le rapport d'absorption permet de mesurer le taux d'oxygène dans le sang [17].

On peut le calculer d'après cette équation :

$$SpO_2 = 110 - 25 \times R$$

Où le R est le ratio optique entre les composantes alternatives (AC) et continues (DC) des deux signaux (Figure 3.6) utilisé dans les capteurs de type oxymètre pour estimer la saturation en oxygène (SpO_2). On le calcule avec l'équation suivant :

$$R = \frac{AC_{\text{rouge}}/DC_{\text{rouge}}}{AC_{\text{IR}}/DC_{\text{IR}}}$$

Où :

AC (composante alternative) : correspond à la variation du signal causée par le flux sanguin pulsatile (lié au rythme cardiaque).

DC (composante continue) : correspond à la lumière absorbée par les tissus statiques (peau, os, etc.).

Rouge : longueur d'onde autour de 660 nm.

IR (infrarouge) : longueur d'onde autour de 880–940 nm.

Ce paramètre est utilisé par les hôpitaux, est désormais largement utilisé grâce aux dispositifs portables, comme les montres connectées. Il a acquis une importance particulière après la pandémie de COVID-19, où la SpO₂ est devenue un paramètre important pour une fonction respiratoire saine [18].

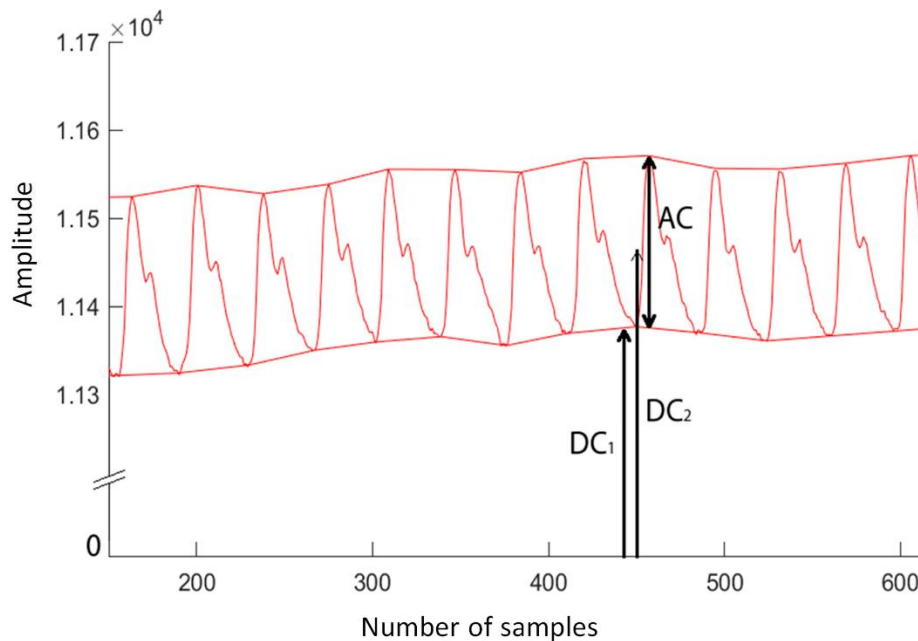


Figure 1. 6 Les composant AC DC dans le signal PPG

dsp.stackexchange.com, « Calculate SpO₂ value from raw fingertip plethysmography (PPG)2025.

1.5 Traitement des signaux PPG : techniques essentielles

Le signal PPG (photoplethysmographique) est une forme d'onde utile mais sensible. Il peut quantifier des informations physiologiques vitales telles que la fréquence cardiaque, la saturation en oxygène. Cependant, pour que des informations utiles et exploitables en soient extraites, ce signal brut devra subir une certaine forme de traitement. Ce traitement comprend la correction des artefacts, l'extraction des caractéristiques des données permanentes et la normalisation des résultats pour une interprétation facile.

1.5.1 Fragilité et nature du signal PPG

Le signal PPG est obtenu à partir de la mesure des variations de lumière absorbée ou diffusée par le sang passant sous la peau, généralement à l'aide de LED infrarouges ou rouges. Le signal est généralement périodique et correspond à la fréquence cardiaque du patient. En théorie, c'est très stable et propre ; Mais en pratique, il est très sensible aux interférences : mouvements de l'utilisateur, variation de l'intensité lumineuse ambiante, bruit électronique du capteur ou mauvais contact avec la peau [20]. C'est la raison pour laquelle il est nécessaire de traiter rigoureusement un tel signal avant toute analyse ou choix clinique.

1.5.2 Étape 1 : Filtrage visant à annuler les interférences

Le filtrage constitue la première ligne de défense contre les sources de bruit. Son but est d'annuler les interférences indésirables et de sélectionner uniquement le signal utile à la mesure prévue (battements cardiaques). Il existe deux grandes catégories de bruits traitées ici :

- **Bruit de mouvement** : créé à chaque fois que le patient bouge son doigt ou le gadget.
- **Interférence lumineuse** : par la lumière ambiante, et est capable de perturber le photodétecteur.

Ces derniers sont supprimés à l'aide de filtres passe-bas pour éliminer les composants haute fréquence indésirables et de filtres passe-haut pour éliminer les composants très lents tels que les tendances dues au mouvement ou à la respiration [21]. Des algorithmes de filtrage adaptatif ou de soustraction de référence peuvent être utilisés si le bruit est dynamique et compliqué [22].

1.5.3 Étape 2 : Détection des battements cardiaques à partir des pics

Après le filtrage du signal, l'étape suivante consiste à identifier les points caractéristiques de la forme d'onde PPG, c'est-à-dire les pics systoliques, c'est-à-dire la valeur maximale pour chaque battement cardiaque. L'identification des pics permet de calculer la fréquence cardiaque (intervalles RR) et sert également de point de départ pour examiner d'autres paramètres temporels.

Cette approche s'appuie sur des algorithmes de détection de maximum local avec des seuils de durée et d'amplitude supplémentaires pour éviter les fausses alarmes. Certains systèmes

utilisent des dérivées de signal (première ou seconde) pour améliorer la précision de détection [23]. La régularité des pics est également un indicateur de la qualité du signal.

1.5.4 Étape 3 : Extraction des caractéristiques

Outre les pics, le signal PPG contient de nombreuses informations détaillées. Différentes caractéristiques temporelles et morphologiques sont ensuite déduites par cycle cardiaque :

- Amplitude systolique maximale (mesure la force du pouls),
- La Durée du cycle cardiaque (intervalles de pointe),
- Temps de montée et de la descente,
- Rapport systolique/ encoche dicrotique (rarement avec des signaux de bonne qualité).

Ils permettent non seulement de détecter des anomalies mais également de modéliser des quantités physiologiques de niveau supérieur telles que la pression artérielle ou l'état de stress du patient [24]. Ils fournissent une base aux algorithmes de classification de l'apprentissage automatique.

1.5.5 Étape 4 : Normalisation et segmentation

Avant de pouvoir comparer les données de différents utilisateurs ou à différents moments, les signaux doivent être normalisés. Cela est généralement réalisé en mettant à l'échelle les amplitudes dans une plage préférée (par exemple, entre 0 et 1) et en divisant également les cycles cardiaques.

Ce processus sert non seulement à la compréhension humaine, mais est également important dans les systèmes d'intelligence artificielle où les modèles doivent analyser des entrées de taille et de forme raisonnable. La segmentation temporelle, généralement basée sur des pics, permet une analyse battement par battement du signal.

1.5.6 Dernier objectif : qualité et fiabilité des données

Globalement, le traitement du signal PPG n'est plus une opération technique secondaire : il impacte directement la précision des mesures physiologiques et donc la fiabilité du système lors de sa mise en œuvre dans le domaine médical ou de la surveillance à distance des patients. Il

faut un algorithme efficace pour transformer un signal instable, bruyant et complexe en une source d'informations propre, fiable et cliniquement précieuse. Il s'agit d'une discipline en constante évolution, qui est actuellement complétée par les apports de l'intelligence artificielle pour faciliter la détection des anomalies, la prédiction des événements physiologiques et l'autocorrection en temps réel des signaux [25].

1.6 Protocoles de communication dans les systèmes téléphoniques

Dans la télémédecine, la qualité et la stabilité de la communication entre les différents composants technologiques sont très importants. Le capteur peut être très précis, la plateforme d'analyse peut être équipée d'algorithmes puissants. Mais si le transfert de données n'est pas bien, précis et sécurisé, l'ensemble du système ne devient pas utile. Pour cette raison, le choix du protocole de communication est une étape importante dans l'architecture d'un dispositif médical connecté, notamment lorsqu'on utilise un smartphone ou un pc comme interface.

1.6.1 Le rôle des protocoles de communication dans les systèmes de santé en réseau

Un protocole de communication définit les structures et les règles à suivre pour que deux appareils, par exemple un capteur biomédical et un smartphone, puissent communiquer. Les protocoles de communication doivent satisfaire certaines exigences propres au domaine médical : faible consommation d'énergie, transmission fiable, protection des données (notamment des données de santé sensibles) et faible latence, notamment en cas d'urgence [26].

Dans le cas d'une utilisation en téléphonie, ces protocoles sont implémentés dans des *wearables* (montres, capteurs PPG, patches, etc.) qui communiquent directement avec une application mobile. Le traitement est local ou envoyé à un serveur via Internet.

1.6.2 Bluetooth Low Energy (BLE) : la norme pour les appareils médicaux portables

Bluetooth Low Energy ou BLE est désormais la technologie la plus courante pour connecter des appareils médicaux à faible consommation aux téléphones mobiles. Il s'agit d'une variante du Bluetooth classique conçue explicitement pour les objets connectés afin de fournir des communications courtes mais périodiques sans consommer la durée de vie de la batterie [27].

Dans un dispositif médical, le BLE (Figure 4.7) convient à l'échange de mesures telles que la fréquence cardiaque, la saturation en oxygène ou la température corporelle. Le capteur PPG, par exemple, envoie sa lecture à l'application du téléphone toutes les secondes, et même plus souvent, sans solliciter le capteur ou la batterie du téléphone.

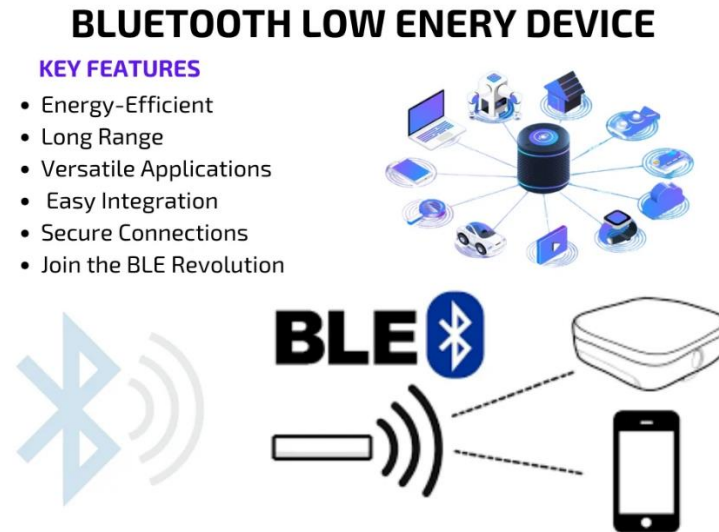


Figure 1. 7 Bluetooth Low Energy device.

De plus, BLE prend en charge une variété de profils d'applications médicales standardisés tels que le profil de fréquence cardiaque ou le profil de thermomètre de santé, permettant une interopérabilité intermarques entre les appareils [28]. Cela permet le développement d'applications fonctionnant sur plusieurs modèles de capteurs sans avoir besoin de recoder chaque intégration à partir de zéro.

1.6.3 Wi-Fi : pour les systèmes de plus grande capacité et l'utilisation stationnaire

Le Wi-Fi reste une alternative viable, même si elle consomme plus d'énergie. Il est utilisé spécifiquement lorsque la disponibilité de l'énergie n'est pas sévèrement limitée, comme dans les établissements de santé, les maisons de retraite ou les environnements résidentiels où le capteur peut être laissé branché [29].



Figure 1. 8 logo de wifi.

Contrairement au BLE, le Wi-Fi est capable de prendre en charge davantage de données, sur de plus grandes distances, à des vitesses de données plus élevées. Cette solution est particulièrement adaptée aux capteurs envoyant des signaux plus importants tels que des ECG multi-dérivations, des enregistrements vocaux ou vidéo ou des signaux bruts à taux d'échantillonnage élevé pour le traitement direct dans le cloud. Un autre avantage du Wi-Fi est sa connexion Internet directe : les capteurs ne sont pas obligés de transmettre des informations à une plateforme éloignée via un smartphone, ce qui limite le rôle du téléphone dans la structure du système. Cela peut améliorer la fiabilité du service et faciliter le flux de données dans les cas de soins de santé à distance continus.

1.6.4 Sécurité des transmissions : une exigence absolue

Quelle que soit la manière dont les données sont transmises via Bluetooth ou Wi-Fi, elles doivent être sécurisées étape par étape. Les données médicales sont sensibles dans la plupart des lois et doivent être placées sous des mesures de protection strictes : cryptage des transmissions (le plus souvent par des protocoles TLS/SSL), authentification mutuelle des appareils, anonymisation des utilisateurs, etc. [30].

Les normes Bluetooth actuelles disposent de fonctionnalités telles que le couplage sécurisé, l'authentification par clé asymétrique et la gestion temporaire des sessions, ce qui améliore réellement la confidentialité des communications. Le protocole WPA2/WPA3 est devenu une exigence obligatoire pour tout appareil médical qui communique sur une plateforme sans fil pour le Wi-Fi.

1.6.5 Vers des protocoles hybrides et intelligents

Avec la 5G, le NB-IoT et le edge computing, les systèmes deviennent plus flexibles. Ils peuvent changer de protocole tout seul selon la batterie, l'environnement, etc. En même temps, des protocoles comme MQTT, HTTP ou HL7 servent pour envoyer les données vers les plateformes de santé, selon si c'est rapide, sécurisé ou non. Dans le futur, les objets pourraient passer de BLE à Wi-Fi ou réseau mobile tout seuls. Ça va rendre le suivi médical plus stable, même quand on bouge.

1.7 Éthique et sécurité des dons par téléphone

Avec les capteurs et applis de télémédecine qui arrivent un peu partout, la question de la sécurité et de l'éthique devient vraiment importante. Quand les données passent du capteur au téléphone, puis à l'appli et ensuite à une plateforme à distance, chaque étape peut poser un risque. Ce ne sont pas juste des informations techniques, mais bien des données personnelles, parfois très sensibles, sur la santé (physique ou mentale).

1.7.1 La place de la confidentialité dans les systèmes de santé mobiles

La confidentialité, c'est un pilier important dans la santé. Par exemple, un capteur comme le PPG envoie des données physiologiques vers une app mobile, et ces informations ne doivent pas être interceptées, modifiées ou partagées sans accord clair de l'utilisateur [32]. Du coup, les développeurs et fabricants doivent intégrer dès le départ des protections comme le cryptage, l'identification ou les accès sécurisés (ce qu'on appelle confidentialité dès la conception).

1.7.2 Consentement éclairé et transparence du traitement

Ce n'est pas juste une question de sécurité technique, mais aussi de respect des gens. Quand quelqu'un utilise une application ou un appareil de santé, il doit savoir clairement ce qui est enregistré, pourquoi, où s'est stocké, et pour combien de temps [33]. Juste afficher des longues conditions que personne lit, ça ne suffit pas. Il faut expliquer les choses simplement, avec des mots clairs, pour que les gens comprennent vraiment ce à quoi ils disent oui. Dans la santé, c'est encore plus important. La personne doit pouvoir garder le contrôle sur ses données, refuser

certaines partages, et retirer son accord quand elle veut. Elle doit aussi savoir exactement qui peut voir ses infos.

1.7.3 Législation actuelle : RGPD, HIPAA et autres réglementations

Beaucoup de pays ont mis en place des lois strictes pour protéger les infos de santé. En Europe, c'est le Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD) qui fixe les règles : on ne garde pas plus de données que nécessaire, elles doivent être protégées, anonymisées, et l'utilisateur doit avoir accès à ses infos, pouvoir les modifier ou les supprimer. Et surtout, on ne peut pas réutiliser les données sans une nouvelle autorisation [34].

Aux États-Unis, c'est la loi HIPAA (*Health Insurance Portability and Accountability Act*) qui s'en charge. Elle dit aussi comment protéger et gérer les données médicales. Si une entreprise ou même une startup ne respecte pas ces règles, ça peut coûter cher. Donc même quand on en est juste au prototype, il faut déjà penser à tout ça. C'est une question de sérieux et de respect des utilisateurs.

1.7.4 Protection contre les intrusions et les accès non autorisés

Un aspect souvent négligé concerne la protection des données en cas de perte ou de vol d'un appareil mobile. En effet, une personne malveillante pourrait accéder à des informations de santé sensibles si aucune mesure de sécurité n'est mise en place. Il est donc essentiel d'intégrer des mécanismes de sécurité dans les applications mobiles [35].

1.7.5 Une responsabilité partagée entre les développeurs, les propriétaires et les utilisateurs

La responsabilité de la protection des données ne repose pas uniquement sur le développeur ou le professionnel de santé. Tous les acteurs impliqués dans la chaîne d'utilisation d'une application de santé ont un rôle à jouer [36]:

- Les concepteurs et développeurs,
- Les gestionnaires de données,
- Les professionnels de santé,
- Et même les utilisateurs eux-mêmes, y compris les patients.

Respecter l'éthique ne signifie pas seulement se conformer aux lois (comme le RGPD ou la HIPAA), mais implique aussi une véritable considération humaine : c'est faire preuve de respect envers les personnes et leurs données personnelles sensibles.

Chapitre 2 : Conception du système et méthodologie

2.1 Aperçu du système proposé

Le système se compose de trois blocs principaux :

- Le capteur PPG MAX30102 est placé sur le doigt dans le boîtier imprimé en 3D et le microcontrôleur ESP32.
- Application mobile multiplateforme et d'application desktop et un site web créé avec ReactNative-Expo, java et java script.
- Infrastructure cloud Firebase pour la connectivité des appareils, le stockage de données à distance, l'authentification et l'analyse.

Ce modèle adopte une approche centrée sur l'utilisateur ou sur le patient. L'utilisateur porte l'appareil, consulte ses données de santé en temps réel sur l'application et ses données sont automatiquement synchronisées avec le cloud, permettant au médecin de les consulter en toute sécurité à distance.

2.2 Design du dispositif portable

2.2.1 Circuit

Microcontrôleur : ESP32

Description :

L'ESP32 Figure (2. 1) est une puce qui fournit une connectivité Wi-Fi et (sur certains modèles) Bluetooth pour les appareils embarqués, c'est-à-dire les appareils IoT. Bien que l'ESP32 ne soit techniquement qu'une puce, les modules et les cartes de développement qui contiennent cette puce sont souvent également appelés « ESP32 » par le fabricant.

La puce ESP32 d'origine était équipée d'un microprocesseur Tensilica Xtensa LX6 à cœur unique. Le processeur avait une fréquence d'horloge supérieure à 240 MHz, ce qui lui conférait une vitesse de traitement des données relativement élevée.

Plus récemment, de nouveaux modèles ont été ajoutés, notamment les séries ESP32-C et -S, qui comprennent des variantes à cœur unique et à double cœur. Ces deux séries s'appuient également sur un modèle de processeur Risc-V au lieu de Xtensa. Risc-V est similaire à l'architecture ARM, qui est bien prise en charge et bien connue, mais Risc-V est open source et facile à utiliser. Plus précisément, Risc-V et ARM bénéficient d'un bon support de la part des compilateurs GNU, tandis que Xtensa nécessitait un support et un développement supplémentaires pour fonctionner avec les compilateurs.

Les modèles les plus récents sont disponibles avec une connectivité Wi-Fi et Bluetooth combinée, ou uniquement avec une connectivité Wi-Fi. Plusieurs modèles de puces sont disponibles, notamment :

- ESP32-D0WDQ6 (et ESP32D0WD)
- ESP32-D2WD
- ESP32-S0WD
- Système en boîtier (SiP) – ESP32-PICO-D4
- Série ESP32 S
- Série ESP32-C
- Série ESP32-H

L'ESP32 est le plus souvent utilisé pour les appareils mobiles, les technologies portables et les applications IoT, telles que Nabto Edge. De plus, depuis que Mongoose OS a lancé un kit de démarrage IoT ESP32, l'ESP32 s'est forgé une réputation de puce ultime pour les amateurs et les développeurs IoT. Il convient à l'IoT commercial, et ses capacités et ressources ont connu une croissance impressionnante au cours des quatre dernières années.

ESP32 DEV BOARD V1 PINOUT

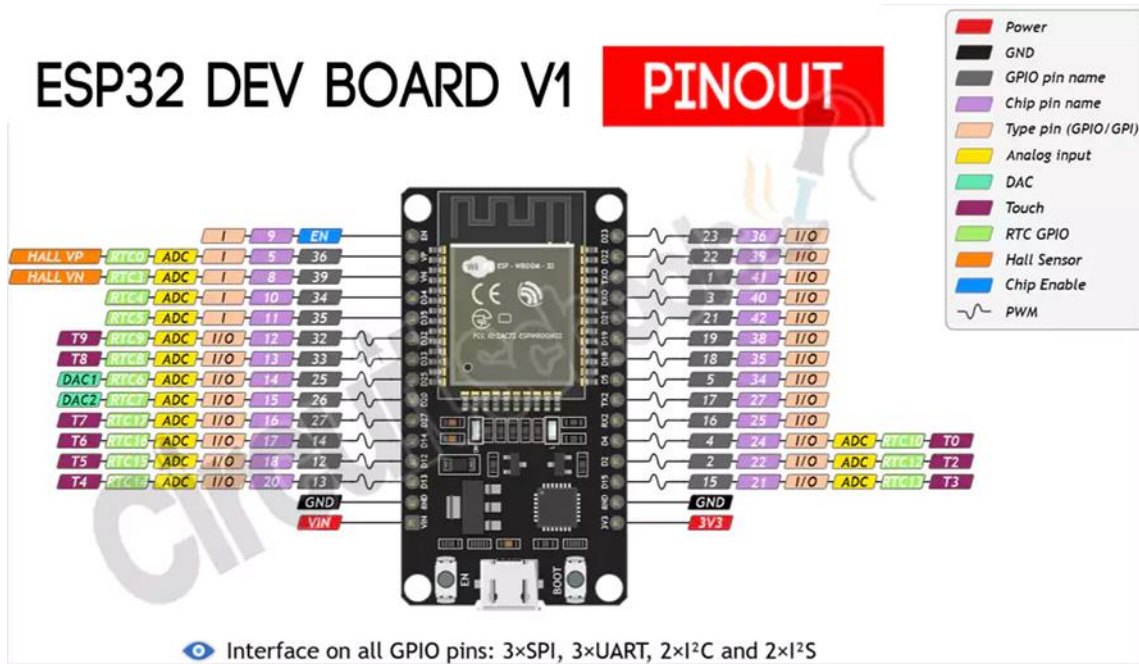


Figure 2. 1 Microcontrôleur ESP32.

Caractéristiques :

Core	2
Architecture	32 bits
Clock	Tensilica Xtensa LX106 160-240MHz
WiFi	IEEE802.11 b/g/n
Bluetooth	Yes - classic & BLE
RAM	520KB
Flash	External QSPI - 16MB
GPIO	22

DAC	2
ADC	18
Interfaces	SPI-I2C-UART-I2S-CAN

Raison de ce choix :

- **Taille et portabilité** : L'ESP32 est compact, ce qui permet de l'intégrer facilement à un appareil portable.
- **Puissance de la computation** : ESP32 (Dual Core @ 160MHz).
- **Connectivité sans fil** : Les connectivités Wi-Fi et Bluetooth assurent la transmission en temps réel des données vers une application mobile ou un serveur cloud.
- **Facilité de programmation** : Compatible avec Arduino IDE et UIFlow, ce module permet un développement et un déploiement rapides de logiciels embarqués, même par des utilisateurs inexpérimentés [36].

Ce choix vise ainsi à minimiser le compromis entre performance, intégration et simplicité d'utilisation, et offre une base matérielle ouverte et documentée.

Le capteur MAX30102

Le MAX30102 (Figure 2.2) est un module intégré d'oxymétrie de pouls et de surveillance de la fréquence cardiaque. Il comprend des LEDs internes, des photodétecteurs, des éléments optiques et une électronique à faible bruit, avec rejet de la lumière ambiante (Figure 2.3).

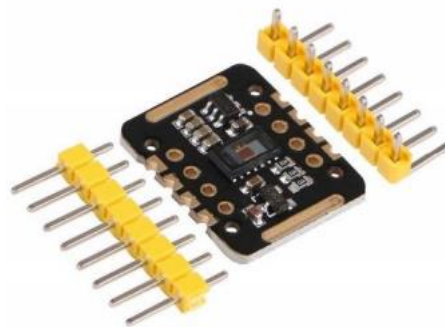


Figure 2. 2 Le capteur MAX30102.

Le MAX30102 fournit une solution système complète pour faciliter le processus de conception pour les appareils mobiles et portables. Le MAX30102 fonctionne sur une alimentation unique de 1.8V et une alimentation séparée de 3.3V pour les LEDs internes. La communication se fait via une interface standard compatible I2C. Le module peut être éteint par logiciel avec un courant de veille nul, ce qui permet aux rails d'alimentation de rester alimentés en permanence. D'alimentation restent alimentés en permanence.[37].

Applications : Appareils portables, les smartphones et les tablettes, etc...

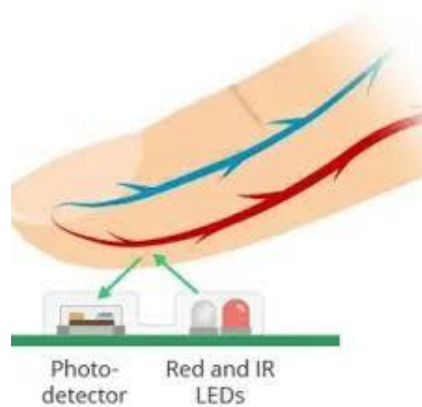


Figure 2. 3 composant de système du capteur.

Le module combine plusieurs éléments clés :

- **Deux sources lumineuses** : une LED rouge (660 nm) et une LED infrarouge (880 nm), toutes deux traversant le tissu cutané. Du bout du doigt à différentes profondeurs.
- **Un photodétecteur photosensible** qui détecte la lumière réfléchiée ou transmise par les tissus en fonction du flux sanguin.
- **Circuits intégrés** de traitement analogique permettant d'extraire un signal clair des variations lumineuses détectées (Figure 2.4).

Le MAX30102 est utilisé dans les oxymètres de pouls et les bracelets connectés. Il s'agit donc d'un composant fiable, bien documenté et éprouvé pour les applications biomédicales amateurs et professionnelles [38].

System Diagram

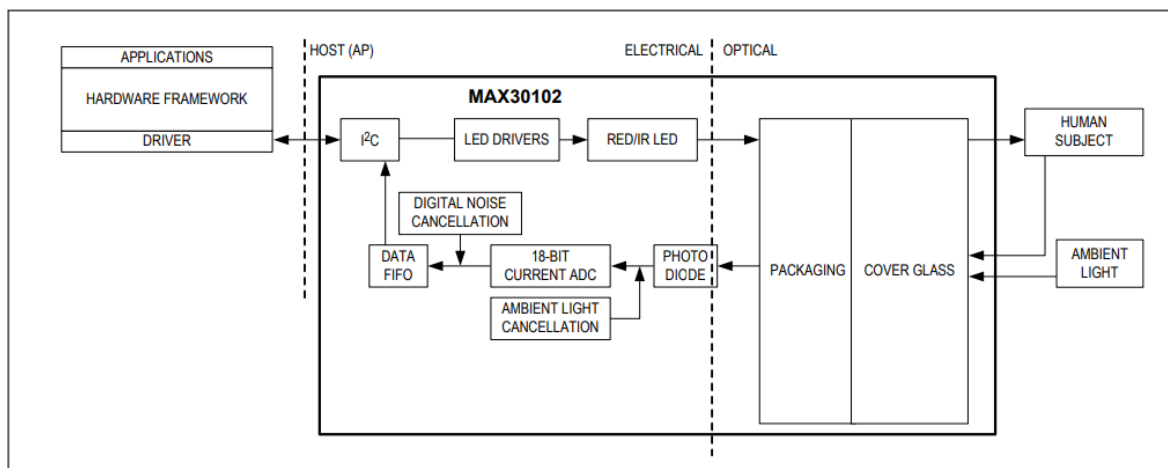


Figure 2. 4 Diagramme du système (MAX30102).

La connexion entre les deux

Maintenant que nous connaissons le module, nous pouvons commencer à le connecter à notre microcontrôleur. Commençons par connecter la broche VCC à l'alimentation (3 V, 3,3 V) et connectons la masse (GND) à la masse commune. Connectons la broche SCL à la broche d'horloge I2C et la broche SDA à la broche de données I2C de notre microcontrôleur. Sur le microcontrôleur, les broches SDA (ligne de données) et SCL (ligne d'horloge) se trouvent sur les embases à broches. Elles sont également appelées (SCL) et (SDA).

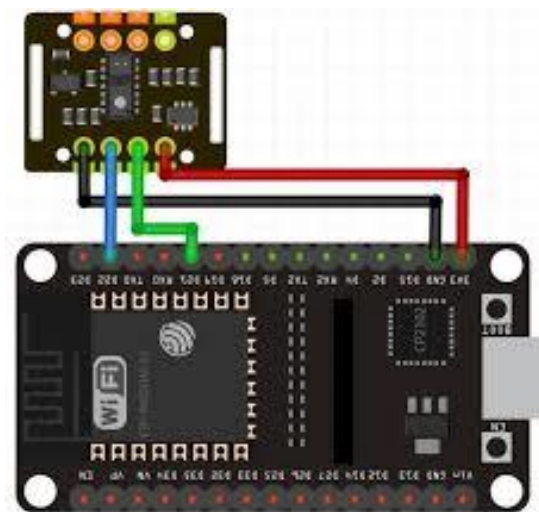


Figure 2. 5 câblage entre MAX30102 et ESP32.

Fiabilité du module

Le MAX30102 est généralement considéré comme un capteur fiable pour la mesure de la fréquence cardiaque et de la saturation en oxygène (SpO₂). Il est conçu pour être robuste face aux artefacts de mouvement, ce qui le rend adapté aux applications mobiles. Toutefois, la fiabilité de ses mesures dépend également de facteurs externes, tels que la qualité de l'adhérence du capteur à la peau et la précision de l'interprétation des signaux.

2.2.2 Conception physique : Boîtier 3D et stabilisation des mesures

Solid Works

Le logiciel SOLIDWORKS est un modéleur volumique permettant de créer des pièces en 3 dimensions. Ces pièces peuvent être ensuite utilisées pour créer des mises en plan en 2D et des assemblages de plusieurs pièces entre elles. Le logiciel SolidWorks comprend : 3 modules élémentaires : Pièce, Assemblage, Mise en plan. (Figure 2.6)

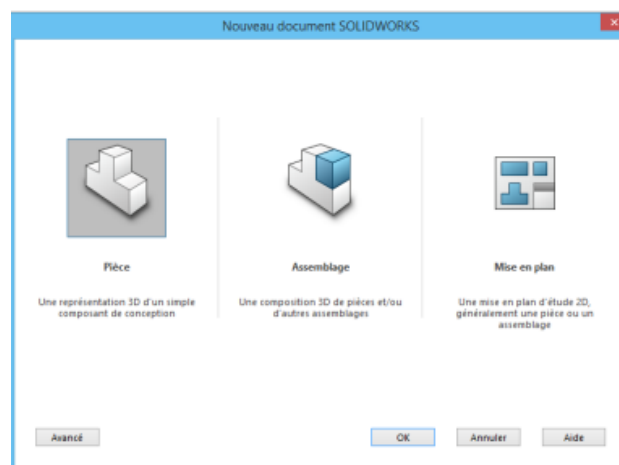


Figure 2. 6 Nouveaux projet dans Solide Works.

Notre model du boîtier pour doigt contient 3 pièces qui nous permettent de laisser ovaire ferme l'enclos du doigt à la manière d'une pince à linge en respectons ces conditions :

- **Lumière ambiante blocage :** Grâce à sa conception opaque, il bloque les interférences lumineuses ambiantes susceptibles d'altérer la lecture du capteur.
- **Poignée :** Il maintient fermement le doigt, ce qui assure un bon alignement optique entre les LED, le tissu et le photodétecteur.

- **Pression contrôlée :** Il offre une pression douce et contrôlée, suffisante pour assurer un contact efficace sans être trop inconfortable ni physiologiquement intrusif.
- **Ergonomie :** Conçu pour s'adapter à différentes tailles de doigts, il peut être utilisé pendant de nombreuses années sans ressentir de gêne.

Cet élément est essentiel pour la stabilisation et la qualité du signal mesuré. À la fin de ça, nous aurons 3 fichiers «.STEP» nous les convertissons en «.STL» pour l'impression 3D.

Impression 3D

L'impression 3D est l'un des développements les plus prometteurs d'aujourd'hui. Il a montré son potentiel dans une large gamme de disciplines, allant du monde médical à l'industrie alimentaire et de l'aérospatiale. Sans surprise, l'industrie du bâtiment a adopté cette technique et vise à l'appliquer à plus grande échelle. Nous avons utilisé l'imprimante 3D Creality (Figure 2.7) du FabLab de la faculté des sciences et de la technologie Abdelhamid ibn Badis Mostaganem. La matière utilisée est Poly-lactic Acid (PLA) filament de couleur noire.



Figure 2. 7 L'imprimante 3D utilisée.

2.3 Développement des applications

Dans ce projet de télémédecine, on a dû créer une application mobile et aussi une autre pour ordinateur. C'est une partie très importante du système. L'application sert de lien entre le capteur et la personne qui l'utilise, que ce soit un médecin ou un patient. Elle permet de garder les données de santé, de les analyser, et de les envoyer de façon sécurisée vers une plateforme en ligne.

Le développement de cette application a été fait en collaboration avec une équipe des informaticiens : M^{lle} Bendaouadji Wahiba, M^{lle} Hallal Hajer et M^{lle} Boudaoud Fatima Elkhansae, du département informatique – ingénierie et systèmes d'information. Nous avons créé une application avec une base solide, et une interface simple à utiliser. Le résultat désirer est une appli fluide et fiable.

2.3.2 Principales fonctionnalités des applications

Suivre les constantes de santé via des appareils connectés :

La phase initiale du projet, un dispositif électronique programmé et connecté a été développé pour renforcer la dimension préventive et en temps réel du suivi médical. Cette machine connectée permet de mesurer automatiquement certaines constantes vitales du patient, telles que :

- La saturation en oxygène (SpO2),
- La fréquence cardiaque

Ces données sont transmises instantanément et de manière sécurisée vers le DSE du patient, permettant ainsi aux médecins d'accéder à des informations actualisées et fiables à distance. Ce système facilite la télé-surveillance, améliore le diagnostic précoce et contribue à une prise en charge personnalisée.

Simplifier la gestion des rendez-vous médicaux : Permettre aux patients de prendre, modifier, ou annuler leurs rendez-vous facilement via une application mobile. Offrir aux médecins et assistants un outil pour organiser leur planning de manière efficace.

Centraliser les dossiers médicaux : via un Dossier de Santé Électronique (DSE) consultable en temps réel par les médecins et les patients.

Faciliter l'ajout de résultats d'examens : Permettre aux assistants spécialistes d'ajouter facilement les résultats d'examens dans les dossiers médicaux, consultables par les patients et médecins.

Intégrer la consultation médicale à distance : Offrir la possibilité aux patients et médecins d'échanger via un système de chat ou de visioconférence sécurisé.

Assister les patients grâce à un Chatbot médical : Proposer un accompagnement intelligent pour orienter les patients vers les services médicaux adaptés à leurs besoins.

Automatiser les rappels et notifications : Envoyer des rappels pour les rendez-vous, la prise de médicaments, ou la mise à jour des dossiers médicaux.

Garantir la sécurité et la confidentialité des données : Respecter les normes pour protéger les informations médicales et personnelles des utilisateurs.

2.4 Serveur infrastructure et stockage cloud (Firebase)

2.4.1 Définition

Firebase (Figure 2.8) est une plateforme de développement d'applications web et mobiles soutenue par Google, pour aider les développeurs à offrir des expériences d'applications. L'objectif de la création de firebase.google.com en 2011 par James Tamplin et Andrew Lee est d'éviter aux professionnels et aux particuliers de s'engager dans un processus complexe de création et de maintenance d'une architecture cloud.



Figure 2. 8 LOGO du Firebase.

Il s'agit d'une plateforme qui permet de développer rapidement des applications pour mobile et pour le web.[39]

2.4.2 Pourquoi le Firebase

Dans Firebase, vous trouverez des API intuitives regroupées dans un SDK unique. Ces API, en plus de vous faire gagner du temps, vous permettent de réduire le nombre d'intégrations que vous devez gérer par le biais de votre application. Vous profiterez ainsi d'une offre sur mesure ainsi qu'une intégration étroite entre les différents produits que vous exploitez. Étant donné que Firebase utilise l'infrastructure de Google, la plateforme n'a aucun mal à s'adapter à l'évolution

d'une application. Ainsi, il est possible de développer Firebase appli dans les meilleures des conditions, d'autant plus que la plateforme met à disposition une solution complète, évolutive et boostée par Google [39].

2.4.3 Le service utilisé depuis notre côté

Pour le développement, nous avons choisi Firebase en raison de ses fonctionnalités et de sa base de données en temps réel. Il a rassemblé tous les exemples, la documentation et les explications pour les API que nous devons utiliser avec l'IDE Arduino, plus que d'autres services tels que le stockage et la sécurité des données, la connexion de différentes applications entre eux et bien sûr avec notre appareil. On transmet les données dans la RTDB (real time data base) dans le cas de connexion en Wi-Fi.

2.5 Méthodologie d'acquisition des données PPG

Le signal PPG est recueilli à l'aide du capteur MAX30102 selon un protocole bien défini : la mesure se déroule en séances de quelques secondes à quelques minutes durant lesquelles l'utilisateur doit être inerte. Les données sont échantillonnées à raison de 100 Hz, cela permettant d'enregistrer avec exactitude les variations cardiovasculaires.

Un algorithme de filtrage est nécessairement utilisé pour ignorer les segments de signal bruité par une instabilité de la main ou du doigt.

2.6 Traitement du signal PPG

2.6.1 Filtrage et prétraitement

Le signal brut est généralement bruité, notamment à cause des mouvements ou de la lumière environnementale. Un filtre passe-bas et un filtre passe-haut sont employés pour extraire la composante voulue du signal. Un filtre de moyenne mobile est également utilisé pour aplanir les fluctuations abruptes.

2.6.2 Extraction des caractéristiques

Les pics systoliques sont identifiés par un algorithme de détection de première dérivée. Ensuite, à partir de ces pics, différents paramètres sont récupérés :

- Fréquence cardiaque,
- Amplitude de l'onde PPG,
- Temps entre les pics (intervalle RR),

Quelques autres méthodes plus complexes, comme l'analyse de la pente systolique ou l'indice d'onde réfléchi, sont également prévues pour augmenter la précision [40].

2.7 Données transmises entre les éléments du système

La communication entre l'application mobile et le capteur se fait à l'aide de Bluetooth Low Energy (BLE). Cette technologie est optimisée pour les objets connectés à faible consommation. L'application se connecte automatiquement sur l'ESP32 quand celui-ci est allumé, puis reçoit constamment les données mesurées.

Aussi, les données sont formatées et transmises en temps réel vers Firebase par une connexion Wi-Fi. Il s'agit d'une centralisation sécurisée des données, sans intervention manuelle de l'utilisateur. Ce modèle est caractéristique des systèmes actuels d'Internet des objets médicaux (IoMT) [41].

2.8 Outils et environnements de développement utilisés

Donc le développement a été basé sur plusieurs outils appropriés à chaque composante du système :

Arduino IDE pour programmer l'esp32 en utilisant le langage de programmation C++.

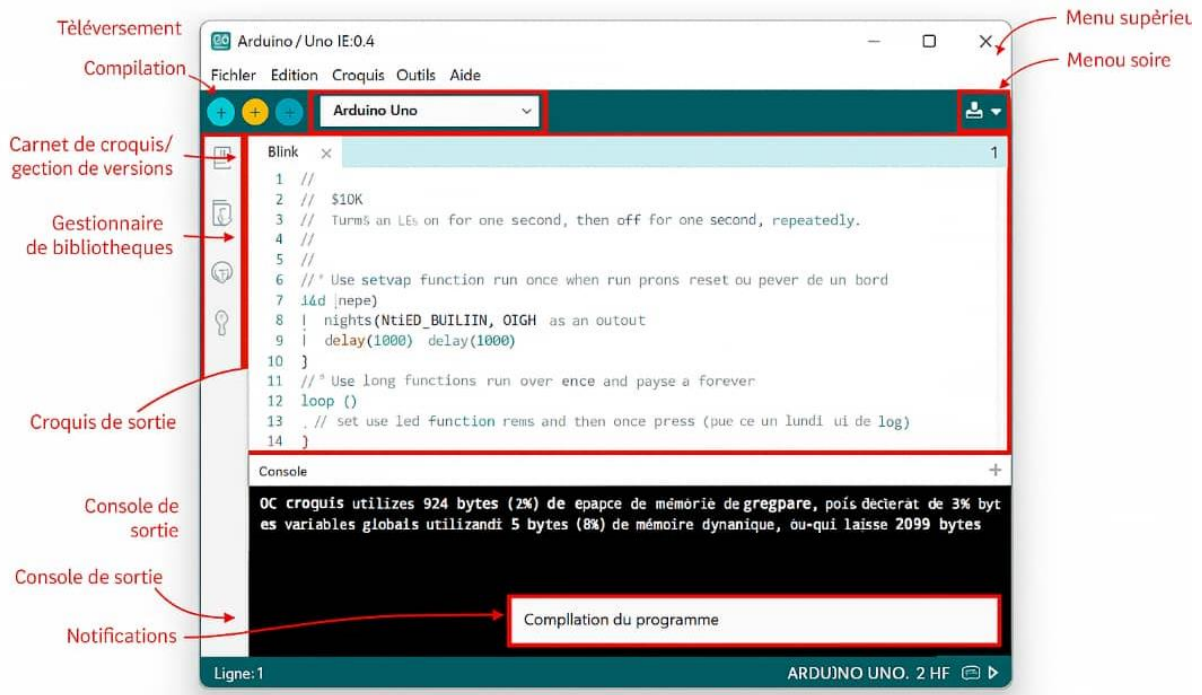


Figure 2. 9 Interface de « Arduino IDE ».

Infrastructure cloud **Firebase** console (<https://console.firebase.google.com/>).

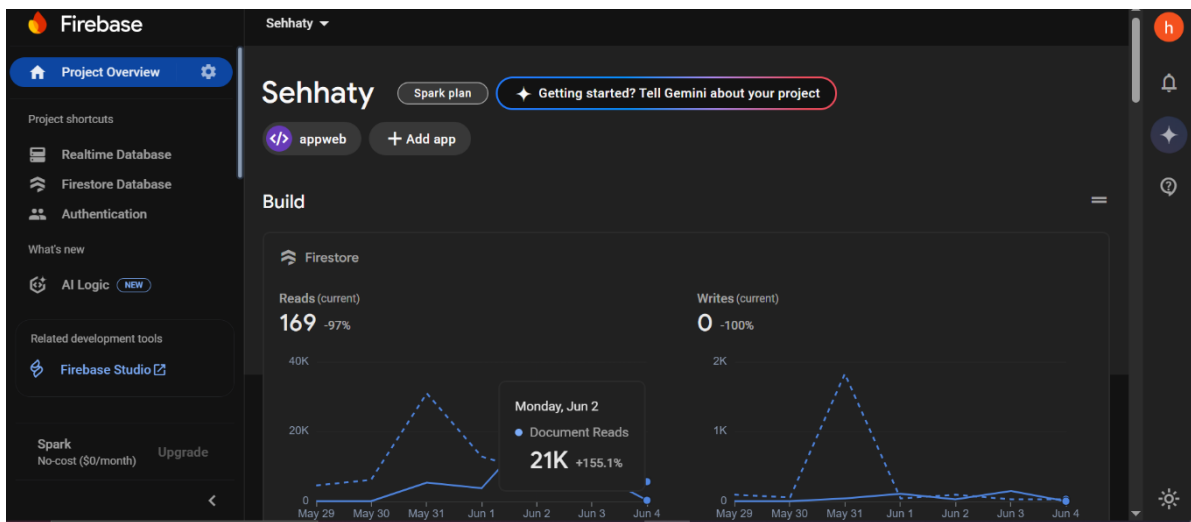


Figure 2. 10 Firebase console.

SolidWorks pour la conception et l'impression en 3D de l'adaptateur de capteur.

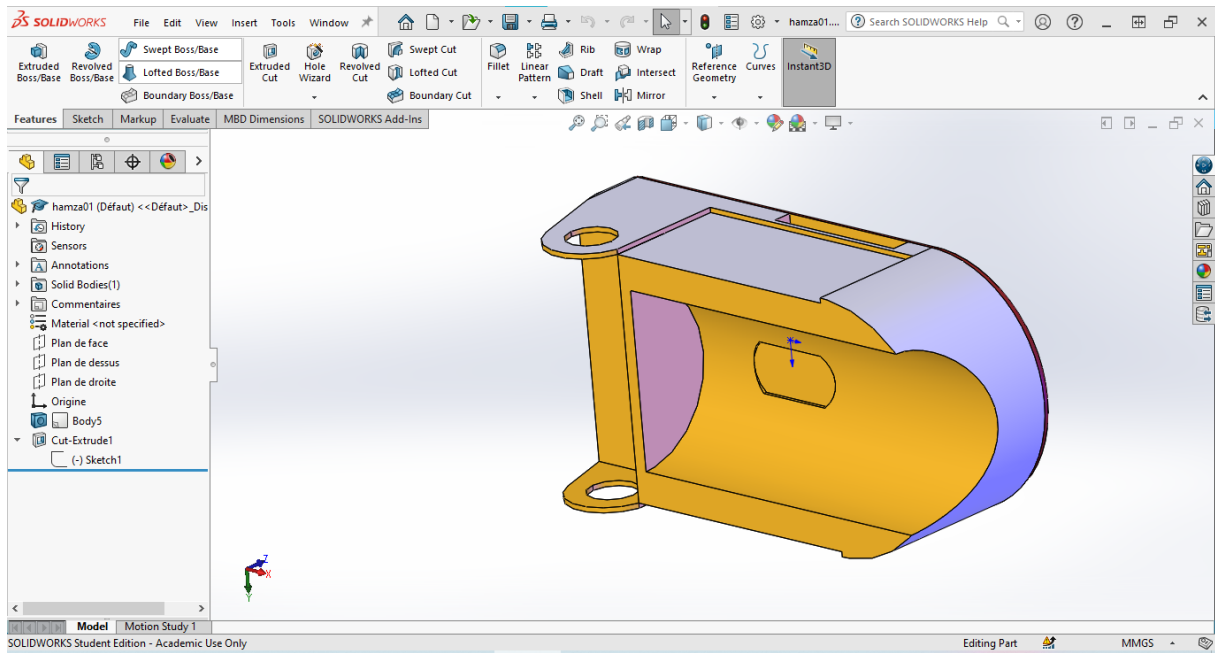


Figure 2. 11 Solid Works éditeur.

Chapitre 3 : Mise en œuvre et résultats expérimentaux

3.1 Mise en œuvre du système

3.1.1 Aperçu du matériel

La compacité, la faible consommation d'énergie et l'acquisition de données en temps réel ont été les lignes directrices pour le développement du prototype portable. Les principaux composants matériels, l'agencement de la connectivité, les protocoles de communication et les techniques de gestion de l'énergie utilisés dans l'appareil sont expliqués dans cette section.

A. Unité de microcontrôleur : ESP32-WROOM-32

Le cœur de notre dispositif portable est l'ESP32-WROOM-32 une carte de développement compacte et à faible consommation. Il présente les caractéristiques suivantes

Wi-Fi et Bluetooth intégrés

USB-B pour les mises à jour du micrologiciel.

Ce module constitue une plateforme compacte et efficace pour les applications wearables, en particulier pour celles qui nécessitent à la fois un traitement local et une communication sans fil.

B. Capteur PPG : MAX30102

Pour capturer les signaux photopléthysmographiques (PPG), le prototype intègre le capteur MAX30102. Le module du capteur permet de mesurer :

La fréquence cardiaque (Fc),

La saturation en oxygène du sang (SpO₂),

Par la méthode optique basée sur des LEDs rouges et infrarouges.

C. Intégration du capteur et protocole de communication I²C :

Le MAX30102 communique avec l'ESP32 par le biais du protocole I²C (Inter-Integrated Circuit). Le câblage de communication est le suivant :

SDA (données) vers GPIO21 du ESP32,

SCL (horloge) vers GPIO22 du ESP32,

Les deux lignes sont tirées vers le haut à l'aide de résistances de 4,7kΩ à 3,3V pour des signaux stables.

Le MAX30102 est le dispositif esclave I²C, et le microcontrôleur est le maître.

En général, 4 fils sont nécessaires : 2 pour la source d'alimentation (VCC 3.3V, GND) et les 2 autres pour la communication (SDA, SCL).

3.2 Développement du logiciel embarqué pour ESP32

Le programme du ESP32 a été fait en C++ avec Arduino. On a choisi de faire une programmation par objets parce que c'est plus facile à comprendre et à modifier après. Comme ça si on veut ajouter des trucs plus tard, ce n'est pas trop compliqué. Le logiciel s'occupe de tout : lire les capteurs, envoyer les données, afficher les infos sur l'écran et économiser la batterie.

3.2.1 Comment on a organisé le code avec les objets

Pour que ce soit plus clair et que chaque partie fasse son boulot, on a séparé le programme en plusieurs classes :

SensorManager : Cette classe initialise le capteur MAX30102 et lit les données PPG qu'il envoie.

DataTransmitter : Elle s'occupe d'envoyer les données par Wi-Fi ou Bluetooth selon ce qui marche.

DisplayManager : Cette partie met à jour l'écran avec l'heure, la qualité du signal, si on est connecté et les mesures du coeur.

StateMachine : C'est elle qui gère tous les états du système et les changements entre eux.

OTAManager : Nouveau composant qui vérifie s'il y a des mises à jour du programme disponible.

MaintenanceManager : S'occupe de l'entretien automatique du système.

Chaque classe fait son travail et communique simplement avec les autres. Le contrôle principal se fait depuis la boucle principale du programme (Figure 3.1).

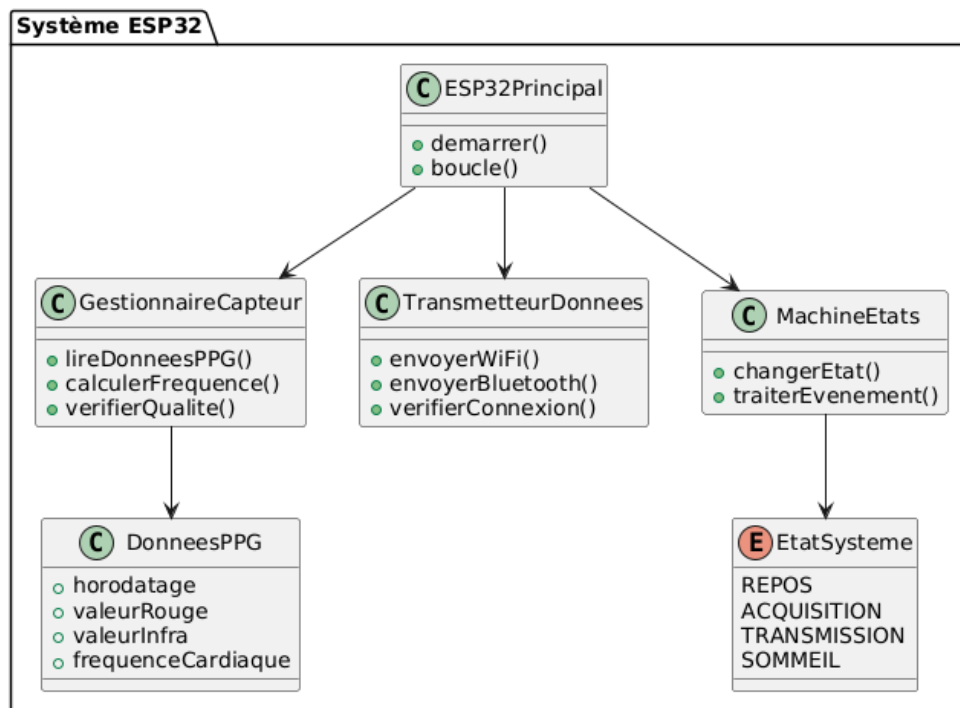


Figure 3. 1 digramme de classe du système

3.2.2 Machine à états pour gérer le système

On utilise une machine à états finis (FSM) pour bien gérer comment l'appareil fonctionne. Ça force l'appareil à suivre un ordre logique, ce qui rend le système plus fiable et consomme moins de batterie. Voici les états principaux :

Repos : C'est l'état de base où l'appareil attend qu'on appuie sur un bouton ou qu'il se réveille tout seul.

Initialisation du capteur : Ici on configure le MAX30102, on vérifie que la communication I²C marche bien et on prépare tout pour collecter les données.

Acquisition : L'appareil collecte les signaux PPG depuis le doigt posé dessus. On vérifie aussi si le signal est de bonne qualité.

Transmission des données : Une fois qu'on a assez de données, elles sont envoyées vers l'application mobile et Firebase par Wi-Fi (pour monter dans le cloud) ou par Bluetooth vers le téléphone.

Sommeil : Après avoir transmis, l'appareil se met en veille pour économiser la batterie pendant un temps défini.

Configuration : État spécial qui s'active quand on fait un appui long sur le bouton Power. Permet d'accéder au menu de configuration et aux paramètres avancés.

Mise à jour OTA : Nouvel état qui gère les mises à jour automatique du firmware quand une nouvelle version est disponible.

Maintenance : État pour faire l'entretien périodique du système (nettoyage mémoire, synchronisation heure, etc.).

3.2.3 Comment les états changent

Les changements d'état se produisent à cause de plusieurs choses :

- Le capteur envoie un signal quand il a fini son travail
- On a récupéré assez de données
- Le Wi-Fi ou le Bluetooth sont dispo (sinon on stocke en mémoire)
- Les minuteurs internes lancent les mesures régulières
- Il y a des vérifications automatiques tous les jours
- Et aussi des cycles de maintenance qu'on a programmés

Ce genre de gestion est super important pour les systèmes embarqués temps réel, et franchement ça nous a bien aidés pour le débiter et le développement des fonctionnalités(Figure 3.1).

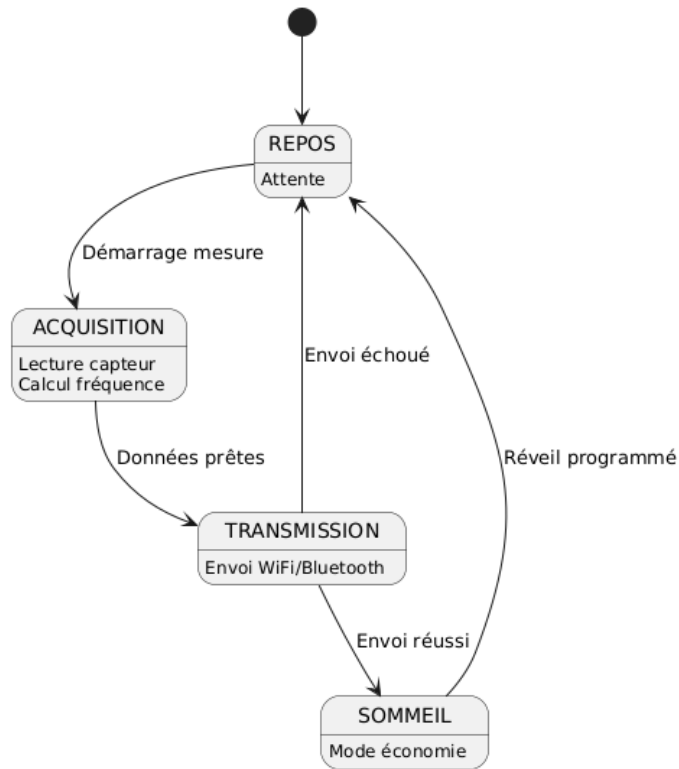


Figure 3. 2 Diagramme machine d'état.

3.2.4 Utilisation de l'écran TFT

L'écran TFT de 1,14 pouces est très important pour communiquer avec l'utilisateur. Pendant le fonctionnement, il montre :

- L'heure actuelle, récupérée par NTP si on a du Wi-Fi
- Le mode de connexion : icônes Wi-Fi ou Bluetooth
- Les mesures vitales : fréquence cardiaque (Fc) et saturation oxygène (SpO₂)
- L'état du système : icônes ou texte pour savoir si on acquiert, transmet ou dort
- Les alertes visuelles en cas de valeurs anormales
- La progression des mises à jour OTA

Ce retour visuel en temps réel est vraiment pratique pour l'utilisabilité et la transparence, surtout pour un appareil autonome qu'on porte sur soi.

3.2.5 Stratégie de communication sans fil

L'appareil utilise en même temps les modules Bluetooth et Wi-Fi mais pour des choses différentes :

WiFi Manager : Au premier démarrage, le système ouvre un portail de configuration WiFi automatique. L'utilisateur peut se connecter au point d'accès temporaire pour configurer les paramètres réseau. Ces infos sont sauvegardées et utilisées pour les connexions automatiques suivantes.

Bluetooth (BLE) : Permet d'envoyer en continu avec peu de délai vers un smartphone proche.

Wi-Fi : Permet d'envoyer les données de façon sécurisée vers Firebase Cloud si il y a une connexion réseau.

Une classe DataTransmitter personnalisée contrôle les deux systèmes, elle vérifie quelles connexions sont disponibles et priorise les chemins de transmission. Le WiFi Manager facilite la configuration initiale sans avoir besoin de programmer les identifiants réseau en dur. Même si les deux interfaces peuvent marcher en même temps pour transmettre, le système optimise la durée de vie de la batterie en éteignant les modules pas utilisés après la transmission.

3.2.6 Gestion des mises à jour automatiques (OTA) :

Le système vérifie tout seul s'il existe une nouvelle version du programme :

- Il fait une vérif toutes les 24 heures en arrière-plan
- Si une mise à jour est dispo, il la télécharge de façon sécurisée depuis un serveur
- L'installation se fait automatiquement, avec un redémarrage à la fin
- L'utilisateur peut voir où en est la mise à jour grâce à une petite interface
- Et s'il veut, il peut aussi forcer une vérification manuelle

3.2.7 Maintenance automatique du système :

Le programme fait son entretien tout seul :

- Diagnostic de la mémoire et de la batterie
- Nettoyage des logs et libération mémoire
- Synchronisation de l'heure via NTP

- Sauvegarde des calibrations en EEPROM
- Vérification de l'intégrité des données

Cette approche garantit un fonctionnement stable et fiable du système sur le long terme, avec une intervention minimale de l'utilisateur.

3.2.8 Diagramme d'activité

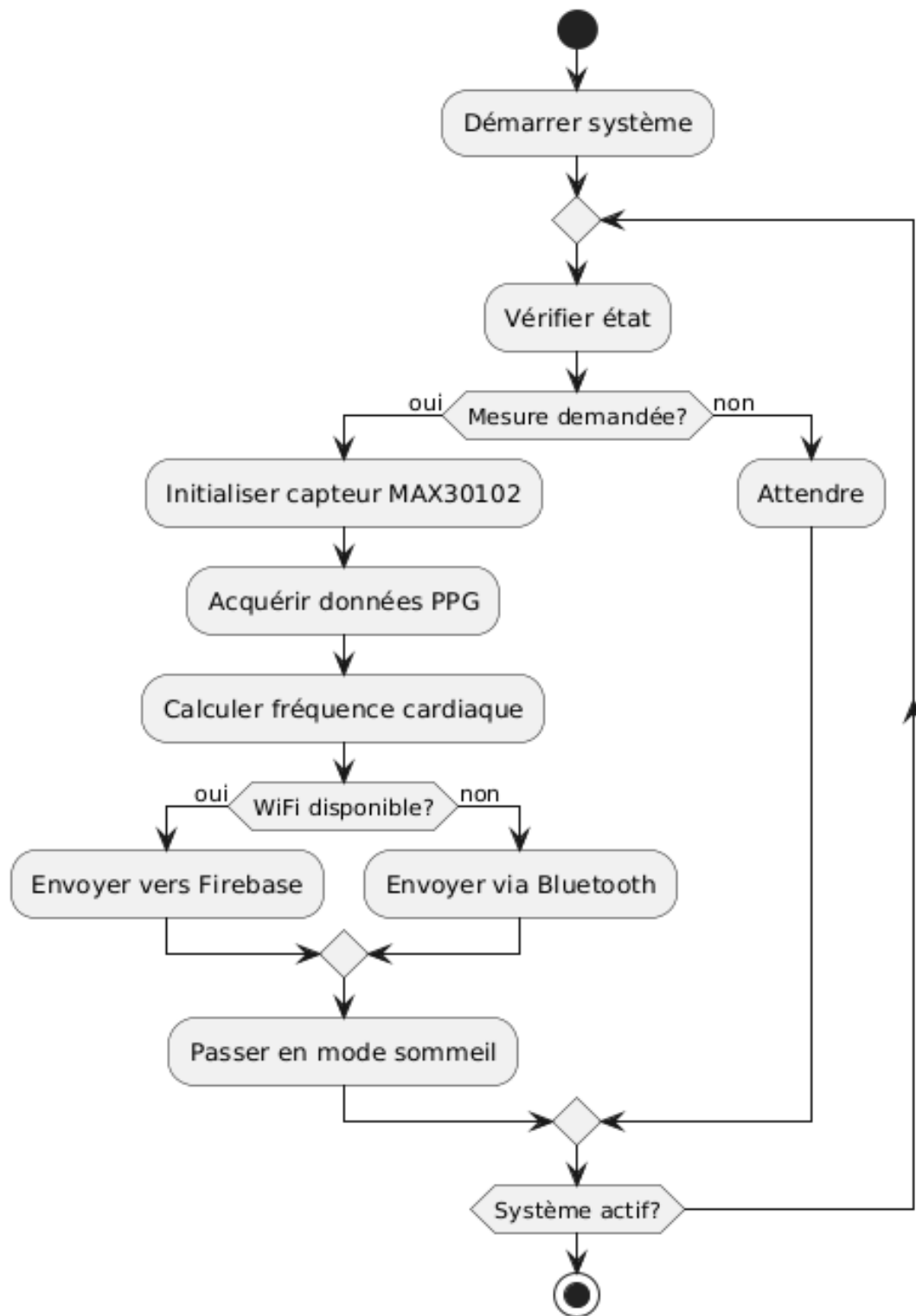


Figure 3. 3 Diagramme d'activité

3.2.9 Configuration et prérequis

- Fichier en-tête et bibliothèque externe utiliser pour le dev :

```
final_dev.ino
1  #include <M5StickCPlus2.h>
2  #include <WiFi.h>
3  #include <WiFiManager.h>
4  #include <FirebaseESP32.h>
5  #include <addons/TokenHelper.h>
6  #include <addons/RTDBHelper.h>
7  #include <NTPCClient.h>
8  #include <WiFiUdp.h>
9  #include <ArduinoJson.h>
10 #include <EEPROM.h>
11 #include <BluetoothSerial.h>
12 #include <Wire.h>
13 #include <HTTPClient.h>
14 #include <Update.h>
15 #include <HTTPUpdate.h>
16 #include "MAX30105.h"
17 #include "spo2_algorithm.h"
18 #include "heartRate.h"
```

Figure 3. 4 fichier en-tête et bibliothèque

- Configuration du OTA et Firebase :

```
20 // Configuration Firebase et OTA
21 #define API_KEY "AIzaSyBck6f6f2jzVJJGkyyIjtntuIWPimhd_Ac"
22 #define DATABASE_URL "https://sehhaty-c31dc-default-rtdb.firebaseio.com/"
23 #define USER_EMAIL "hamzabenyamina2002@gmail.com"
24 #define USER_PASSWORD "06122002"
25 #define FIRMWARE_VERSION "1.0.0"
26 #define OTA_URL "https://raw.githubusercontent.com/hamzabenyamina/telemet-firmware/main/firmware.bin"
27 #define VERSION_CHECK_URL "https://raw.githubusercontent.com/hamzabenyamina/telemet-firmware/main/version.json"
28
```

Figure 3. 5 Configuration Firebase et OTA

3.3 Connectivité : Wi-Fi, Bluetooth et intégration de Firebase

Pour que le système reste simple à utiliser, on a utilisé le Wi-Fi et le Bluetooth. La bibliothèque "WiFi Manager" a aidé à faire une configuration du réseau directement depuis l'écran de l'appareil. L'utilisateur pouvait choisir son réseau Wi-Fi facilement grâce à une page web qui s'affiche. Après la connexion, l'appareil envoie les données vers la base Firebase en temps réel, ce qui permet de garder les données dans le cloud et de les voir sur l'application mobile [43].

En plus du Wi-Fi, on a aussi mis le Bluetooth (version BLE – Bluetooth Low Energy). C’est utile surtout quand il n’y a pas de Wi-Fi, comme dans certaines zones. Avoir les deux (Wi-Fi et Bluetooth) rend le système plus stable et agréable pour l’utilisateur [44].

3.4 Architecture logicielle de l’application mobile

L’application mobile a été développée à l’aide de **React Native**, permettant une compatibilité multiplateforme (iOS et Android). Les SDK Firebase ont été intégrés pour faciliter la synchronisation en temps réel des données utilisateur et l’authentification.

L’interface utilisateur permet à l’utilisateur de

- Visualiser les données physiologiques en temps réel et les données historiques,
- Gérer leur profil et la connexion de leur appareil,
- Recevoir des alertes en cas de baisse de la qualité du signal ou d’échec de la transmission des données.

La conception de l’application a privilégié la simplicité et la clarté, en particulier pour les utilisateurs non techniques. La visualisation des données a été réalisée à l’aide de graphiques légers et d’indicateurs codés par couleur afin d’améliorer l’interprétation.

3.5 Composants côté serveur et architecture en nuage

Le **backend Firebase** a servi d’infrastructure principale côté serveur. Il gère :

- Mise à jour des données en temps réel,
- Authentification de l’utilisateur (via Firebase Auth),
- Stockage sécurisé des données (Firebase Realtime Database),
- Services de notification (Firebase Cloud Messaging).

Ce choix a permis d’éviter le développement d’un back-end personnalisé tout en offrant une évolutivité, une sécurité et une facilité d’intégration avec le front-end mobile [45].

3.6 Dispositif expérimental et collecte de données

3.6.1 Environnement d'essai et participants :

La validation expérimentale a été réalisée dans un environnement intérieur calme avec un éclairage contrôlé. Les participants devaient rester immobiles et placer leur index à l'intérieur du capuchon imprimé en 3D et monté sur le capteur MAX30102. Chaque session a duré 60 secondes et les signaux PPG ont été échantillonnés à 100 Hz.

L'objectif était de collecter une gamme de signaux PPG auprès de différents utilisateurs, dans des conditions physiologiques (par exemple, après un exercice, au repos) et dans des conditions environnementales (par exemple, différents niveaux de lumière) afin d'évaluer la robustesse du système.

3.6.2 Processus de collecte des données

Une fois que l'utilisateur a lancé une session, le système passe automatiquement à l'état "Acquisition", enregistre les données PPG du MAX30102 et les transmet soit par Wi-Fi à Firebase, soit par Bluetooth à une application mobile connectée.

Les données collectées comprenaient les valeurs brutes de la lumière rouge et infrarouge, les horodatages et les indicateurs de qualité du signal. Toutes les entrées ont été stockées avec un identifiant de session unique à des fins de traçabilité et de comparaison.

3.7 Analyse des données et extraction des paramètres physiologiques

3.7.1 Prétraitement et filtrage du signal

Les signaux PPG bruts ont été prétraités pour éliminer la dérive de la ligne de base et le bruit à l'aide d'une combinaison de lissage de la moyenne mobile et d'un filtre passe-bande de Butterworth (généralement 0,5-5 Hz), qui isole les fréquences physiologiques pertinentes [46]. Les signaux ont été visualisés pour évaluer la clarté, la cohérence des pics et les artefacts potentiels causés par le mouvement.

3.7.2 Fréquence cardiaque et autres mesures

La fréquence cardiaque a été calculée à partir de l'analyse de l'intervalle pic à pic (PPI) de la forme d'onde PPG filtrée. Un algorithme personnalisé de détection des pics a été implémenté dans microcontrôleur pour identifier les pics systoliques et calculer les battements par minute (BPM). La précision a été comparée à celle d'un oxymètre de pouls certifié.

Nous avons également extrait les caractéristiques de la variation de l'amplitude du pouls et de la variabilité de la fréquence du pouls en vue d'une corrélation future avec la pression artérielle, bien que ces analyses soient en cours.

3.8 Évaluation des performances

3.8.1 Évaluation de la qualité du signal

Pendant nos tests, on a observé la qualité du signal chez nous et sur différentes sessions. Quand le signal était bon, on voyait bien les pics, ils étaient réguliers et il y avait peu de bruit. Le petit boîtier qu'on a imprimé en 3D pour le doigt a vraiment aidé à avoir un signal plus stable, surtout quand la lumière dans la pièce changeait beaucoup.

3.8.2 Fiabilité de la transmission

Quand le Wi-Fi était bon, les données passaient presque toujours sans problème vers Firebase. On a eu très peu de pertes. Le Bluetooth marchait aussi pas mal, même s'il y avait parfois des petits retards à cause d'interférences. Mais au final, avoir les deux modes de communication (Wi-Fi et Bluetooth) a rendu le système plus solide [47].

3.8.3 Précision et temps de latence

Les mesures du rythme cardiaque étaient assez proches de celles d'un appareil de référence. En moyenne, l'erreur était autour de ± 3 battements par minute. Le temps total entre la mesure et l'affichage dans l'application variait de 1,5 à 3 secondes, selon si c'était en Wi-Fi ou Bluetooth.

3.9 Défis et collaboration

3.9.1 Défis techniques

Pendant la réalisation, on a eu pas mal de petits soucis techniques. Par exemple, le capteur bougeait un peu si la personne bougeait le doigt, donc il fallait bien caler le doigt dans le support. La configuration du Wi-Fi n'a pas toujours été simple, surtout dans les endroits avec des réseaux compliqués (comme ceux qui demandent une page web pour se connecter). Il y avait aussi parfois un petit décalage dans les données sur Firebase, donc on a dû bien faire attention aux horodatages.

3.9.2 Collaboration interdisciplinaire

Le projet n'aurait pas pu avancer sans l'aide de l'équipe informatique. On a travaillé main dans la main avec eux pour l'architecture de l'appli mobile et la base Firebase. Ils nous ont beaucoup aidés à mieux organiser le code, à gérer la logique de l'application (avec la machine à états), et à faire fonctionner la communication avec le cloud et le Bluetooth. Cette collaboration entre nos compétences (électronique, données, appli) a vraiment été un gros plus.

3.10 Résultats finaux

L'acquisition et la transmission des données était effectuée en temps réel d'une manière acceptable

- Dans la base de données RTDB (Figure 3.6) avec l'affichage sur serial moniteur d'Arduino IDE (Figure 3.7)



Figure 3. 6 RTDB Firebase.

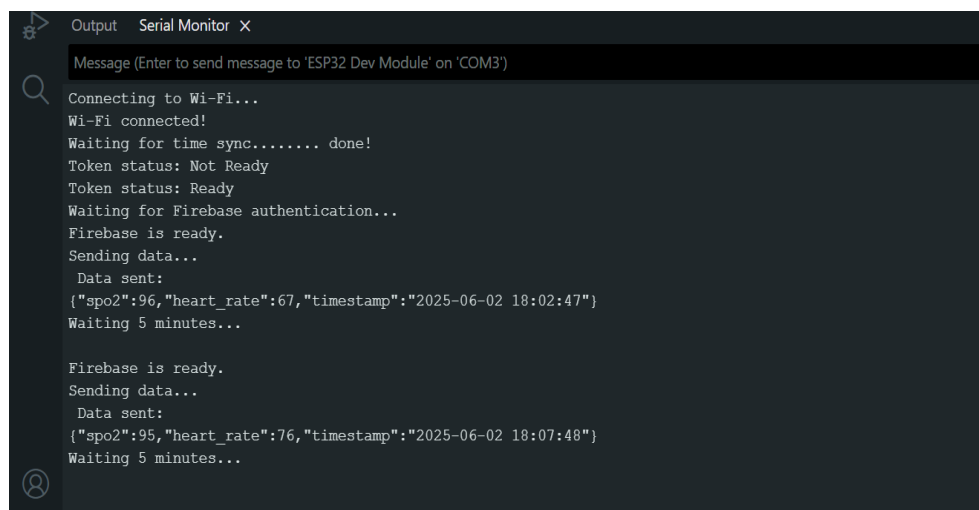


Figure 3. 7 Déroulement de la démonstration du système via le moniteur série

Voici l'accueil dans l'application :

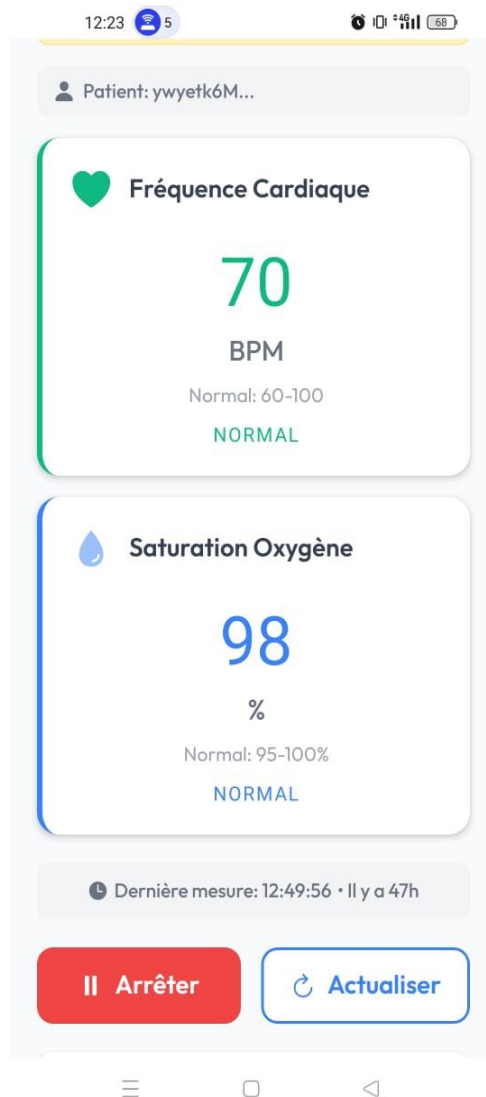


Figure 3. 8 les résultats sur l'application.



Figure 3. 9 résumer des données.



Figure 3. 10 graph de SpO2 et FC.

3.11 Perspectives d'amélioration avec le M5Stick C Plus2

Notre système actuel fonctionne bien avec l'ESP32, mais nous pouvons l'améliorer avec le M5Stick C Plus2. Cette petite carte a plusieurs avantages intéressants :

- Un écran couleur intégré : Avec le M5Stick C Plus2, nous n'avons plus besoin d'une application mobile pour voir les résultats. L'utilisateur peut regarder sa fréquence cardiaque directement sur l'écran de l'appareil. C'est beaucoup plus pratique !
- Des boutons simples : Le M5Stick a trois boutons faciles à utiliser. Un bouton pour démarrer la mesure, un autre pour changer les paramètres, et le troisième pour éteindre l'appareil. Plus besoin de configurations compliquées.
- Une batterie plus durable : La batterie du M5Stick dure plus longtemps que notre prototype actuel. L'utilisateur peut porter l'appareil toute la journée sans problème.
- Un boîtier compact : Le M5Stick est déjà dans un petit boîtier solide. Nous n'avons pas besoin d'imprimer des pièces en 3D. L'appareil est prêt à porter au poignet.
- Facilité de programmation : Le M5Stick utilise les mêmes bibliothèques que l'ESP32. Nous pouvons garder notre code actuel et juste ajouter les fonctions pour l'écran et les boutons.

Avec ces améliorations, notre système devient plus simple à utiliser et plus autonome. L'utilisateur n'a besoin que de l'appareil au poignet pour surveiller sa santé.

Conclusion générale

Ce projet de fin d'études nous a permis de combiner théorie et pratique pour répondre à un problème concret : rendre les soins de santé plus accessibles grâce à la technologie. En nous appuyant sur les principes de la télémédecine, nous avons conçu une solution qui combine un capteur portable, un microcontrôleur, une application mobile et un stockage dans le cloud. Ce système nous permet de mesurer certains signes vitaux tels que la fréquence cardiaque et la saturation en oxygène, puis d'envoyer ces données de manière sécurisée pour une surveillance à distance.

Ce projet nous a posé quelques défis. Nous avons dû comprendre le fonctionnement du capteur PPG et du signal PPG, maîtriser l'environnement de développement Arduino, apprendre à gérer les communications sans fil et créer une application stable, intuitive et sécurisée. Mais chaque obstacle que nous avons surmonté nous a permis d'approfondir nos connaissances et de renforcer nos compétences.

Ce projet montre qu'avec des ressources modestes mais bien utilisées, il est possible d'innover et d'offrir des solutions concrètes, utiles et adaptables au monde médical d'aujourd'hui. Notre système n'est peut-être qu'un début, mais il ouvre des perspectives passionnantes pour la santé connectée, en particulier dans les régions où les ressources médicales sont limitées.

En résumé, ce projet nous a permis d'acquérir une expérience concrète tout en nous sensibilisant aux questions éthiques, techniques et humaines liées à la santé numérique. Il marque une étape importante pour nous, et peut-être même un point de départ pour de futurs projets dans le domaine de la santé en ligne.

Chapitre 4 : Business Model Canvas (BMC) avec Business plan(BP)

Afin de structurer la proposition de valeur de notre solution de télémédecine, nous avons adopté le modèle Business Model Canvas (BMC), qui permet de visualiser les principaux éléments économiques et organisationnels du projet. Le tableau suivant présente les neuf blocs du BMC appliqués à notre application de suivi de santé connectée.

Business Model Canvas (BMC) :

1.1 Partenariats clés :

Notre solution repose sur la collaboration avec :

- Les professionnels de la santé
- Les laboratoires d'analyses
- Les entreprises de fabrication des dispositifs électroniques
- Les services de livraison pour notre produit

1.2 Activités clés :

Les activités principales incluent :

- Le développement de l'application mobile et de l'électronique embarquée
- La gestion des bases de données patients (Firebase)
- L'intégration de capteurs de santé (PPG)
- La communication avec les professionnels de santé
- Le support technique et la maintenance

1.3 Ressources clés :

Les ressources indispensables au fonctionnement de notre modèle sont :

- Une équipe de développeurs (mobile et embarqué)
- Des médecins comme des partenaires
- Le capteur biométriques (ex. : MAX30102)
- Le microcontrôleur embarqué

- Un serveur pour base de données sécurisé
- Une plateforme de communication (Firebase, WiFi, Bluetooth)

1.4 Proposition de valeur :

Nous proposons :

- Un suivi de santé à distance simple, rapide et fiable
- Une réduction des déplacements pour les consultations
- Une application mobile facile à utiliser
- Des mesures physiologiques en temps réel (fréquence cardiaque, SpO2)
- Un accompagnement médical basé sur des données précises et continues
- Un accès à l'historique médical depuis n'importe où

1.5 Relations avec les clients :

- Assistance technique via chatbot ou l'email
- Rendez-vous médicaux en ligne
- Notifications automatiques et rappels
- Interface conviviale pour les patients et les médecins

1.6 Canaux de distribution :

- Application mobile (iOS/Android)
- Site Web pour informations et téléchargements
- Réseaux sociaux pour visibilité et support

1.7 Segments de clients :

Nos utilisateurs cibles sont :

- Les patients chroniques ou en suivi régulier
- Les professionnels de santé souhaitant optimiser le suivi à distance

1.8 Structure des coûts :

Les principaux postes de dépenses comprennent :

- Le développement logiciel et la maintenance
- La fabrication des dispositifs électroniques
- L'hébergement cloud sécurisé
- Les coûts de distribution et marketing
- Le support client

1.9 Sources de revenus :

Les revenus seront générés par :

- Des abonnements pour les professionnels de santé
- Un abonnement à l'acte pour les consultations à distance
- La vente de dispositifs médicaux connectés
- Un suscription Premium pour certaines fonctionnalités

Business plan (BP)

Qui sommes-nous :

On est une équipe de 5 étudiants, chacun avec un vrai intérêt pour les systèmes d'info et un peu aussi dans l'électronique. En plus, on a acquis pas mal d'expériences sur l'IoMT (objets médicaux connectés) et aussi l'analyse de données (même si ce n'est pas toujours simple). Avec tout ça, on a voulu créer une appli de télémédecine, un truc utile qui peut aider les gens à avoir des soins sans devoir se déplacer tout le temps. L'idée c'est de faire un outil simple à prendre en main, qui permet genre de prendre un RDV, faire une téléconsultation vidéo (en sécurité bien sûr), suivre ses dossiers médicaux électroniques et recevoir des rappels pour pas oublier les trucs importants. Y'a aussi une partie mesure des constantes vitales en temps réel grâce à des petits appareils connectés (qu'on a bricolé/testé). On essaye que ça soit le plus fluide possible, même si ce n'est pas toujours évident

Nos Objectifs

- **Suivie médical connecté** : Mesure en temps réel des constantes vitales avec des objets connecté intelligents.
- **Accessibilité facilitée** : Les patients peuvent réserver, consulter et suivre leurs soins quand ils veulent depuis un téléphone ou bien un PC.
- **Consultation en ligne** : Moins de déplacements grâce à des visions médicales (sécurisée mais facile d'accès).
- **Résultat rapide** : Les donnée médicales sont envoyer tout de suite dans le DSE (dossier électronique).
- **Rappel automatique** : Les gens reçoivent des notifs pour leurs RDV ou pour prendre des médicaments à l'heure.
- **Orientation intelligente** : Un bot médical peut aider les patients à trouver rapidement un bon docteur ou spécialiste.
- **Optimisation du travail médical** : Des outils sont prévu pour aider les médecins et assistante à bien gérer leurs horaires et les patients.
- **Sécurité des données** : L'accès est protégé, seuls les utilisateurs autorisés peuvent voir les infos.
- **Réduction des délais** : On gagne du temps avec une gestion automatique des horaires.
- **Analyse des signes vitaux** : On récupère et traite des données comme le rythme du cœur ou le SpO2 pour mieux suivre la santé des gens.

Analyse FFOM (SWOT)

Forces de notre plateforme

- Nous nous distinguons par notre engagement en faveur de l'innovation et la fourniture de solutions médicales tout en un de qualité, ce qui renforce la confiance des utilisateurs dans la fiabilité de notre plateforme.
- Nous nous engageons à constituer une équipe talentueuse composée de chercheurs, d'ingénieurs en informatique, en électronique et de professionnels de santé, ce qui nous confère un avantage concurrentiel pour le développement et la commercialisation de nos services.

- Nous mettons en place une stratégie de marché solide, axée sur la différenciation et la satisfaction des besoins spécifiques des utilisateurs.
- Nous intégrons des technologies de pointe, telles que l'intelligence artificielle, l'IoMT et l'analyse de données en temps réel, pour offrir des services personnalisés et prédictifs, répondant aux attentes les plus élevées du secteur médical.
- Notre plateforme se caractérise par une grande flexibilité et une capacité d'adaptation aux évolutions rapides du domaine médical et technologique, assurant ainsi sa pérennité et sa pertinence à long terme.
- Nous accordons une attention particulière à la sécurité et à la confidentialité des données, garantissant la protection des informations sensibles de nos utilisateurs.
- Notre interface conviviale et intuitive permet une expérience utilisateur fluide, favorisant l'adoption rapide de la plateforme par les professionnels comme par les patients.

Faiblesses de notre service

L'investissement initial et les coûts : L'un des principaux défis pour les startups dans le domaine de la télémédecine est le coût important lié au développement, à la mise en conformité réglementaire et au lancement de la plateforme.

Le manque de notoriété : En tant que nouvelle entreprise, nous devons relever le défi de faire connaître notre Marque et de convaincre les professionnels et les patients de la fiabilité de notre service.

La concurrence intense : Le marché de la télémédecine est très concurrentiel, avec des acteurs déjà établis et de nouveaux entrants, ce qui peut compliquer notre différenciation.

Chaîne des ressources : Dépend principalement du marché chinois, ce qui engendre des délais de livraison plus longs et une réactivité réduite. De plus, la qualité des produits peut manquer de régularité, posant un risque pour la fiabilité des approvisionnements.

Opportunités

- **Demande croissante de soins à distance** : Post-COVID, les téléconsultations sont de plus en plus acceptées et recherchées.
- **Équipement technologique en hausse** : Taux de pénétration des smartphones élevé, même en zones rurales.

- **Partenariats locaux possibles** : Cliniques, hôpitaux, universités et mutuelles ouvertes à la digitalisation.
- **Sensibilisation croissante à la santé connectée** : Intérêt croissant pour les objets de santé connectés.
- **Exploitation des données de santé** : Analyse prédictive et épidémiologique possible à long terme.

Menaces

- **Réglementation stricte** :

Le secteur de la santé est **fortement encadré par des lois**, notamment sur la protection des données personnelles (comme les dossiers médicaux), la sécurité des dispositifs médicaux, et les actes médicaux à distance

- **Méfiance des utilisateurs** :

Les patients comme les professionnels peuvent **douter de la sécurité**, de la fiabilité des objets connectés ou de l'efficacité des consultations à distance.

Stratégie marketing et concurrentielle

Bien que des plateformes comme Daba Doc Algérie ou DoctoZone offrent déjà des services de télémédecine, notre plateforme se distingue par :

- L'intégration avancée des objets médicaux connectés (IoMT) pour un suivi en temps réel des données de santé.

-Analyse des données provenant des appareils connectés, notamment la saturation en oxygène (SpO₂) et la fréquence cardiaque, afin d'évaluer l'état de santé des patients.

- Intégration un assistant IA sous forme de chatbot pour guider et orienter les patients vers les services de santé adaptés.

- Une application intuitive, localisée et pensée pour le marché algérien.

-Une approche partenariale forte avec les professionnels de santé locaux pour une meilleure

adoption. Ces éléments font de notre solution un choix unique et efficace, capable de transformer l'accès aux soins en Algérie, de réduire la charge sur le système de santé et de favoriser une population plus informée et en meilleure santé.

Plan financière

Les figure ci dessus montre la résulta du business plane

INVESTISSEMENT			
		<u>Année 01</u>	<u>Total Période</u>
E Q U I P E M E N T S D E P R O D U C T I O N	MATERIEL INFORMATIQUE	455 000	455 000
	EQUIPEMENTS BUREAU	214 500	214 500
	Matériel N°03	0	0
	PLATEFORME (mobile web desktop)	700 000	700 000
	Matériel N°05	0	0
	Matériel N°06	0	0
	Matériel N°07	0	0
	Matériel N°08	0	0
	Matériel N°09	0	0
	Matériel N°10	0	0
	Matériel N°11	0	0
	Matériel N°12	0	0
	Matériel N°13	0	0
	Matériel N°14	0	0
	Matériel N°15	0	0
	Matériel N°16	0	0
	Matériel N°17	0	0
	Matériel N°18	0	0
	Matériel N°19	0	0
Sous-Total (01)		1 369 500,00	1369500

Figure 4. 1 cout d'investissement

MASSE SALARIALE			
		<u>ETP</u>	<u>Total</u>
P E R M A N E N T S	Poste N°01	1,00	0
	Ingenieur	1,00	1 750 800
	Ingenieur	0,00	0
	Ingenieur	0,00	0
	Ingenieur	0,00	0
	Poste N°06	0,00	0
	Poste N°07	0,00	0
	Poste N°08	0,00	0
	Poste N°09	0,00	0
	Poste N°10	0,00	0
Sous-Total (2)			1 750 800

Figure 4. 2 masse salariale.

CHARGES EXTERNES

	Libellé	Total
C h a r g e s e x t e r n e s	Sous-traitance	40000
	Loyers	240000
	Energie/eau/gaz	20000
	Frais Marketing	600000
	Honoraires d'avocat	0
	Honoraires du Notaire	20000
	Honoraires d'expert-comptable	200000
	Honoraires Commissaire aux Comptes	0
	Frais du transit	0
	Frais télécom	60000
	Divers fournitures	0
	Frais de formation	0
	R&D	0
	Sous-Total (04)	1 180 000,00

Figure 4. 3 les charges externes.

Achat directs

	Prestation	Total
A c h a t s d i r	Produit/Service N°01	3 500 000
	Produit/Service N°02	0
	Produit/Service N°03	0
	Produit/Service N°04	0
	Produit/Service N°05	0
		Sous-Total (03)

Figure 4. 4 les achats directs

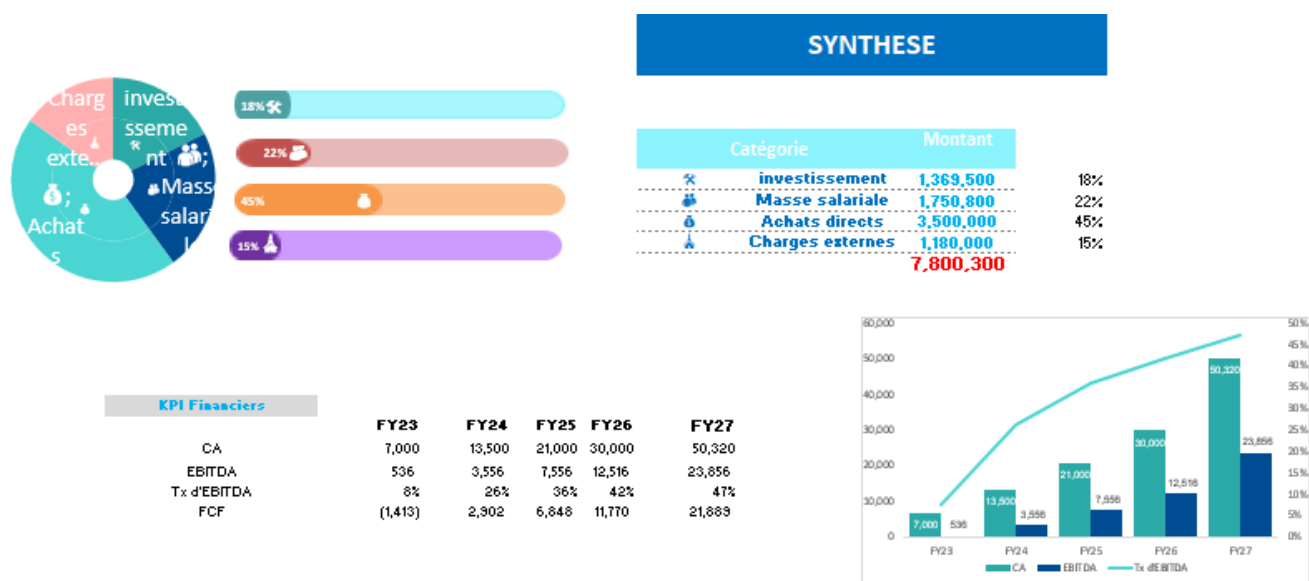


Figure 4. 5 La synthèse finale.

Références

- [1]. Ministère des Solidarités et de la Santé. La télémédecine : cadre légal et organisation. [En ligne] : <https://solidarites-sante.gouv.fr>
- [2]. Scalvini, S., et al. (2005). Télémédecine : applications actuelles et perspectives d’avenir. Journal cardiovasculaire d’Afrique.
- [3].ISO/IEEE 11073 - Normes pour la communication des dispositifs médicaux.
- [4]. Topol, E. (2019). Médecine profonde : comment l’intelligence artificielle peut rendre les soins de santé à nouveau humains. Livres de base.
- [5]. Piwek, L., Ellis, D. A., Andrews, S., & Joinson, A. (2016). The Rise of Consumer Health Wearables: Promises and Barriers. PLOS Medicine.
- [6]. Apple Inc. (2022). Apple Watch Series 8 – Health Features. [En ligne] : <https://www.apple.com/apple-watch-series-8/>
- [7]. Oura Health. (2023). Oura Ring: Health Tracking Redefined. [En ligne] : <https://ouraring.com/>
- [8]. VitalConnect. (2023). VitalPatch® Biosensor – Clinical-Grade Wearable Monitoring. [En ligne] : <https://vitalconnect.com/>
- [9]. Allen, J. (2007). Article Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. Physiological Measurement.
- [10]. Maxim Integrated. (2021). MAX30102 Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor.
- [11]. CNAM – Assurance Maladie. (2023). Télésurveillance médicale : dispositifs et conditions de prise en charge. [En ligne] : <https://www.ameli.fr/>
- [12]. Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014). Wearable photoplethysmographic sensors—past and present. Electronics.
- [13]. Allen, J. (2007). Article Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. Physiological Measurement.
- [14]. Elgendi, M. (2012). On the analysis of fingertip photoplethysmogram signals. Current Cardiology Reviews.

- [15]. Sun, Y., & Thakor, N. (2016). Photoplethysmography Revisited: From Contact to Noncontact, From Point to Imaging. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*.
- [16]. Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014). Wearable Photoplethysmographic Sensors—Past and Present. *Electronics*.
- [17]. Chan, E. D., Chan, M. M., & Chan, M. M. (2013). Pulse oximetry: understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations. *Respiratory Medicine*.
- [18]. Luks, A. M., & Swenson, E. R. (2020). Pulse oximetry for monitoring patients with COVID-19 at home. *Annals of the American Thoracic Society*.
- [19]. Shaffer, F., & Ginsberg, J. P. (2017). An Overview of Heart Rate Variability Metrics and Norms. *Frontiers in Public Health*.
- [20]. Tamura, T., Maeda, Y., Sekine, M., & Yoshida, M. (2014). Wearable Photoplethysmographic Sensors—Past and Present. *Electronics*.
- [21]. Elgendi, M. (2012). On the Analysis of Fingertip Photoplethysmogram Signals. *Current Cardiology Reviews*.
- [22]. Zhang, Z. (2015). Photoplethysmography-Based Heart Rate Monitoring in Physical Activities via Joint Sparse Spectrum Reconstruction. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*.
- [23]. Gil, E., Orini, M., Bailón, R., Vergara, J. M., Mainardi, L., & Laguna, P. (2010). Photoplethysmography pulse rate variability as a surrogate measurement of heart rate variability during non-stationary conditions. *Physiological Measurement*.
- [24]. Monte-Moreno, E. (2011). Non-invasive estimate of blood glucose and blood pressure from a photoplethysmograph by means of machine learning techniques. *Artificial Intelligence in Medicine*.
- [25]. Nemcova, A., et al. (2021). Monitoring of Cardiac Activity with Wearable Devices: Methodological Aspects and Clinical Implications. *Sensors*.
- [26]. Liu, C., et al. (2018). A review of wearable devices for telemedicine applications. *Telemedicine and e-Health*.

- [27]. Gomez, C., Oller, J., & Paradells, J. (2012). Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology. *Sensors*.
- [28]. Bluetooth SIG. (2024). Bluetooth Low Energy Profiles. [En ligne] : <https://www.bluetooth.com/specifications/assigned-numbers/>
- [29]. Varchola, M., et al. (2020). Wireless Technologies in Healthcare: A Review. *Journal of Medical Systems*.
- [30]. European Union Agency for Cybersecurity (ENISA). (2023). Cybersecurity of health data: Data protection and privacy. [En ligne] : <https://www.enisa.europa.eu/>
- [31]. Ferreira, A., Correia, R., & Antunes, L. (2014). Privacy and data protection in mobile health systems: A review. *Health Informatics Journal*.
- [32]. Beauchamp, T. L., & Childress, J. F. (2013). *Principles of Biomedical Ethics*. Oxford University Press.
- [33]. Union Européenne. (2016). Règlement Général sur la Protection des Données (RGPD). [En ligne] : <https://eur-lex.europa.eu>
- [34]. ENISA – European Union Agency for Cybersecurity. (2022). Security guidelines for mobile health applications. [En ligne] : <https://www.enisa.europa.eu>
- [35]. Lupton, D. (2016). *The Quantified Self: A Sociology of Self-Tracking*. Polity Press.
- [36] EspressifSystems, "ESP32SeriesDatasheet," <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/resources>, consulté en mai 2025.
- [37]. Analog Devices. Capteur de fréquence cardiaque et d'oxymétrie de pouls haute sensibilité pour dispositifs portables (MAX30102). En ligne : <https://www.analog.com/en/products/max30102.html>
- [38]. Maxim Integrated, "MAX30102 Pulse Oximeter and Heart-Rate Sensor for Wearable Health," <https://www.analog.com/en/products/max30102.html>, consulté en mai 2025.
- [39] Etienne Alcouffe, « A quoi sert Firebase, la plateforme mobile de Google ? », Junto, avr. 25, 2019. <https://junto.fr/blog/firebase/> (consulté le sept. 02, 2020).
- [40]. Allen, J. (2007). Photoplethysmography and its application in clinical physiological measurement. *Physiological Measurement*, 28(3), R1–R39.

- [41].Islam, S. M. R., Kwak, D., Kabir, M. H., Hossain, M., & Kwak, K. S. (2015). The Internet of Things for Health Care : A Comprehensive Survey. *IEEE Access*, 3, 678–708.
- [42].Liu, Y. et al. (2020). Embedded Finite State Machines in Wearables. *Journal of Embedded Systems*, 12(3), 45-58.
- [43].Google. (n.d.). Base de données en temps réel Firebase. Extrait de <https://firebase.google.com/products/realtime-database>
- [44].Texas Instruments. (2019). Pile de protocole BLE pour les appareils IoT. Livre blanc technique.
- [45].Smith, A. et Zhao, H. (2021). Mobile Cloud Integration with Firebase. *Mobile Computing Journal*, 8(2), 91-103.
- [46].Allen, J. (2007). La photopléthysmographie et son application dans les mesures physiologiques cliniques. *Physiological Measurement*, 28(3), R1-R39.
- [47].Zhang, M. et al. (2022). Evaluating IoT Transmission Reliability in Health Monitoring Systems (Évaluation de la fiabilité de la transmission de l’IdO dans les systèmes de surveillance de la santé). *IEEE Access*, 10, 106221-106233