

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Département Ingénierie des Systèmes Electriques

**Mémoire de Master**

Présenté par

**BOURNISSA Sarah & KEBOUR Rekia**

**Filière : Génie Biomédical**

**Spécialité : Instrumentation Biomédicale**

---

# Conception et développement d'un dispositif d'oxymétrie intelligent

---

**Soutenu le 03 /07 /2024 devant le jury composé de :**

TRIKI	Yacine	MA	UMBB	Président
DAFEUR	Abdelhakim	MA	UMBB	Examineur
GANNA	Massine	MA	UMBB	Rapporteur

**Année Universitaire : 2023/2024**

## ***REMERCIEMENTS***

*On remercie Allah de tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté de parvenir à la fin de notre parcours universitaire.*

*Nous tenons à remercier tous ceux qui nous aidé, conseillé et encouragé afin de réaliser ce modeste travail.*

*Et aussi on n'oublie pas de remercier nos professeurs et notre encadreur Mr GANA pour tous leurs soutient et leurs conseils qui nous ont apporté de l'aide dans la réalisation de notre projet.*

*Merci à vous.*

## ***DÉDICACES***

*Je dédie ce modeste travail à ce ceux qui quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère :*

*A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : mon adorable mère NABILA.*

*A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect, à celui dont je porte leur nom : mon cher père SADEK*

*A mes chères sœurs : Sérine, Meriem et Wissem,*

*A la mémoire de ma grande mère Fatima et ma tante Fahima qui nous ont quitté,*

*A mes grande mère Malika et mes grands père Said et Omar,*

*A toutes mes tantes paternelles et maternelles avec ses belles familles, à mes oncles,*

*A tous mes cousins et mes cousines et surtout ma belle cousine Amina,*

*Sans oublier mon binôme Rekia,*

*Et bien sûr à moi-même.*

**#SARAH**

## DÉDICACES

*Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes employés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère.*

*À l'homme, mon précieux cadeau du ciel, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père MOHAMED.*

*À la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse : ma chère mère BAYA.*

*À mon mari MOHCEN et MON PRÉCIEUX FILS,*

*Rayons de soleil qui illuminent mes jours et me donnent la force de continuer.*

*À mon cher et unique frère OUSSAMA .*

*À ma sœur ZAHIA, et à ses enfants FAISAL et HOUSSAM .*

*Que Dieu les protège et leur offre la chance et le bonheur.*

*À ma petite sœur SABRINA, qui sait toujours comment procurer la joie et le bonheur pour toute la famille.*

*À ma Belle-mère SALIMA , à ma belle sœur MONA , à ses filles AMINA et MARIA, et la grand-mère de mon mari, DAHILA.*

*À tous mes amis que j'ai connus jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.*

*Sans oublier mon binôme SARAH pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.*

**#REKIA**

# SOMMAIRE

Liste des figures .....	
Liste des tableaux .....	
Liste des abréviations, signes et symboles .....	
Introduction générale.....	1
<i>Chapitre I : État de l'art sur les dispositifs biomédicaux.....</i>	<i>2</i>
Introduction .....	2
1 Généralités sur dispositifs biomédicaux .....	2
1.1 Définition d'un dispositif biomédical.....	2
1.2 Les différentes classes de dispositifs biomédicaux .....	2
1.2.1 Classification par risque.....	2
1.2.2 Classement par domaine d'application .....	3
1.2.3 Classification par mode d'action .....	4
1.2.4 Classification en fonction de leur invasivité .....	4
1.3 Réglementation des dispositifs biomédicaux .....	5
1.3.1 Etapes clés .....	6
1.3.2 L'évolution de la réglementation des dispositifs biomédicaux .....	7
1.3.3 Agences de réglementation gouvernementales .....	7
1.4 Les matériaux et les technologies employés pour la conception et la fabrication des dispositifs biomédicaux.....	8
1.4.1 Matériaux .....	9
1.4.2 Technologies de fabrication .....	9
2 Importance des dispositifs biomédicaux dans la gestion des catastrophes biologiques ...	11
2.1 Les catastrophes biologiques .....	11
2.1.1 Définition.....	11
2.1.2 Agents concernés .....	11
2.2 Le rôle des dispositifs biomédicaux dans la prévention des catastrophes biologiques	12
2.2.1 COVID-19 .....	15
3 Exemples des dispositifs biomédicaux et leurs applications .....	15
3.1 Dispositifs de diagnostic.....	15
3.1.1 L'imagerie médicale.....	15
3.1.2 Tests de laboratoire.....	17
3.1.3 Moniteurs de signes vitaux .....	18
3.2 Dispositifs thérapeutiques implantables .....	20

3.3	Dispositifs de traitement.....	21
3.4	Logiciels et technologies de l'information :.....	21
4	Analyse critique des technologies existantes.....	22
	Conclusion.....	23
	<i>Chapitre II : Étude générale d'un oxymètre</i> .....	24
	Introduction.....	24
1	Introduction à l'oxymétrie.....	24
1.1	Rappel physiologique.....	24
1.1.1	Système cardio-respiratoire.....	24
1.1.2	Hémoglobine.....	26
1.1.3	La saturation en oxygène (SpO <sub>2</sub> ).....	28
2	Oxymètre de Pouls.....	30
2.1	Historique.....	30
2.1.1	Guide Pratique pour Utiliser un Oxymètre de Pouls et Interpréter les Résultats.....	31
2.1.2	Importance de l'oxymètre dans la prévention et le suivi de la santé.....	31
3	Principes de fonctionnement d'un oxymètre.....	32
3.1	Emission et absorption de la lumière :.....	33
3.2	Détection de la Lumière.....	34
4.1.1	Oxymètre en transmission.....	34
4.1.2	Oxymètre en réflexion.....	34
4.1.3	La transparence.....	35
4.1.4	Amplification de la variation.....	37
4.1.5	Composantes AC et DC.....	37
4.2	Loi physique de l'oxymètre de pouls : Loi de Beer-Lambert.....	38
4.3	Taux de saturation d'oxygène.....	39
4.4	Fréquence cardiaque.....	40
4.5	Affichage des Résultats.....	41
4	Évaluation des performances des oxymètres disponibles sur le marché.....	43
4.1	Contexte du Marché.....	43
4.2	Critères d'Évaluation des Oxymètres.....	43
4.3	Sélection et Méthodologie.....	43
4.4	Résultats et Analyse.....	44
4.5	Recommandations.....	45
	Conclusion.....	45
	<i>Chapitre III : Conception et développement du dispositif d'oxymétrie intelligent</i> .....	46

Introduction .....	46
1 Spécifications du dispositif d'oxymètre intelligent .....	46
2 Choix des composants électroniques et matériels.....	48
2.1 LED Rouge.....	48
2.2 LED infrarouge.....	50
2.3 Capteur TSL235R.....	51
2.4 Le capuchon.....	53
2.5 Un écran OLED 0.96" (SSD 1315) .....	53
2.6 Capteur d'empreinte digitale GT511C3 .....	55
3 Présentation de la carte Seeeduino Femto M0+ et de ses fonctionnalités .....	57
3.1 Caractéristiques principales.....	57
3.2 Fonctions et connecteurs : .....	59
3.3 Description des broches de la carte .....	60
4 Assemblage des composants et circuits nécessaires .....	62
5 Architecture Système de l'Oxymètre Intelligent.....	65
6 Les organigrammes de gestion de système.....	67
Conclusion.....	68
<i>Chapitre IV : Réalisation pratique du projet .....</i>	<i>69</i>
1 Introduction.....	70
2 Tests et Validation du Dispositif d'Oxymètre Intelligent .....	70
2.1 Matériels utilisés.....	70
2.1.1 Logiciel : Arduino IDE.....	70
2.1.2 Les appareils .....	71
3 Analyse des résultats obtenus .....	74
<i>Conclusion générale.....</i>	<i>75</i>
Bibliographie.....	76

## Liste des figures

**Figure I.1** : Les différentes classes de dispositifs biomédicaux « par risque »

**Figure I.2** : La Norme 60601-1 sécurité de base et performances essentiels des dispositifs médicaux

**Figure I.3** : Exemple d'étiquette accompagnant les produits marqués CE

**Figure I.4** : Usinage CNC pour la fabrication de dispositif médicale

**Figure I.5** : Technologie médicale, Impression 3D

**Figure I.6** : Moulage par injection pour la fabrication de dispositifs médicaux

**Figure I.7** : Catastrophes biologiques

**Figure I.8** : Le bioterrorisme

**Figure I.9** : Les analyseurs de laboratoire portables

**Figure I.10** : Dispositifs du surveillance portables

**Figure I.11** : Habillements de protection

**Figure I.12** : Scanner CT (Tomodensitométrie TDM)

**Figure I.13** : Les résultats de l'examen IRM sur un ordinateur

**Figure I.14** : Dispositifs d'imagerie médicale, échographe

**Figure I.15** : Résultats fiables dans les laboratoires de biologie médicale

**Figure I.16** : Moniteurs Ambulatoires de Pression Artérielle

**Figure I.17** : Dispositifs d'imagerie médicale, écographe

**Figure I.18** : Dispositif d'oxymètre de pouls

**Figure I.19** : Stimulateur cardiaque, Encyclopédie médicale MedlinePlus

**Figure I.20** : Stimulateur cardiaque, Encyclopédie médicale MedlinePlus

**Figure I.21** : Thérapies au laser de bas niveau

**Figure II.1** : Schéma de l'appareil cardiovasculaire

**Figure II.2** : Schéma de système respiratoire

**Figure II.3** : Schéma de la structure de l'hémoglobine

**Figure II.4** : Mode de transport d'oxygène

**Figure II.5** : Des pourcentages d'hémoglobine dans le sang qui est chargée de molécules d'oxygène.

**Figure II.6 :** Principe d'émission / réception.

**Figure II.7 :** Absorption de lumière rouge et infra rouge

**Figure II.8 :** Oxymètre en transmission

**Figure II.9 :** Oxymètre en réflexion

**Figure II.10 :** Représentation simplifiée de l'absorption de la lumière : Pléthysmographie

**Figure II.11 :** Composantes AC et DC de l'oxymétrie

**Figure II.12 :** Loi de Beer-Lambert.

**Figure II.13 :** la relation entre le rapport R et la saturation en oxygène

**Figure II.14 :** Affichage des résultats d'un oxymètre de pouls

**Figure II.15:** Masimo Radical-7® Pulse CO-Oximeter®

**Figure II.16 :** Oximetro de Pulso NONIN. Onyx Vantage 9590

**Figure III.1 :** Photo du LED rouge

**Figure III.2 :** Electronique théorie du LED

**Figure III.3 :** LED infrarouge « émetteur »

**Figure III.4 :** La placement du LED rouge et infra rouge dans l'oxymètre

**Figure III.5 :** Résistance 220 Ohms.

**Figure III.6 :** Capteur TSL235R

**Figure III.7 :** Placement du capteur TSL235R à l'oxymètre

**Figure III.8 :** Le capuchon

**Figure III.9 :** Afficheur OLED 0.96 I2C

**Figure III.10 :** Capteur d'empreinte digitale

**Figure III.11 :** Les boches du capteur d'empreinte digitale GT511C3

**Figure III.12 :** Carte Seeeduino Femto M0+

**Figure III.13 :** Les broches de la carte Seeeduino

**Figure III.14 :** Assemblage des LED rouge et infrarouge

**Figure III.15 :** Assemblage du photodétecteur TSL235R avec la carte

**Figure III.16 :** Assemblage de capteur d'empreinte digitale GT511C3 avec la Seeeduino

**Figure III.17 :** L'écran OLED relié à la carte Seeeduino

**Figure III.18 :** Assemblage de tous les composants

**Figure III.19 :** Architecture système du dispositif

**Figure III.20 :** Organigramme de gestion de système

**Figure III.21 :** Organigramme de calcul de la SpO<sub>2</sub>

**Figure IV.1 :** Multimètre digital

**Figure IV.2 :** Fenêtre logiciel de programmation Arduino IDE

**Figure IV.3 :** Multimètre digital

**Figure IV.4 :** Affichage des mesures de SpO<sub>2</sub> à l'écran OLED

**Figure IV.5 :** Résultats du patient 1

**Figure IV.6 :** Résultats du patient 2

**Figure IV.7 :** Comparaison des mesures de SpO<sub>2</sub> par l'oxymètre réaliser et l'oxymètre de référence

## **Liste des tableaux**

**Tableau.III.1** : Mesure de la saturation en oxygène

**Tableau III.2** : Mesure de pouls

**Tableau III.3** : Reconnaissance d'empreinte digitale

**Tableau III.4** : Autonomie de la batterie d'oxymètre

**Tableau III.5** : Affichage des résultats d'oxymètre

**Tableau III.6** : Stockage des données de dispositif d'oxymètre

**Tableau III.7** : Les caractéristiques de la LED rouge

**Tableau III.8** : les caractéristiques du LED infrarouge

**Tableau III.9** : les caractéristiques principales du capteur TSL235R.

**Tableau III.10** : Les caractéristiques d'un écran OLED

**Tableau III.11** : Les caractéristiques du capteur d'empreinte digitale GT511C3

**Tableau III.12** : Les caractéristiques principales du carte seeeduino

## **Liste des abréviations, signes et symboles**

**DM** : Dispositif Médical

**UE** : Union Européenne

**CE** : Conformité Européenne

**EMA** : Agence Européenne des médicaments

**EPI** : Equipements de protection individuelle

**FDA** : Food and Drug Administration

**PMD** : Agence japonaise des dispositifs médicaux

**DMDIV** : Dispositif Médical de Diagnostic In Vitro

**COVID-19** : Corona Virus 2019

**ISO** : Organisation Internationale de Normalisation

**PSA** : Antigène Prostatique Spécifique

**IRM** : Imagerie par Résonance Magnétique

**CO<sub>2</sub>** : Carbone Dioxide

**SaO<sub>2</sub>** : Arterial Oxygen Saturation

**SpO<sub>2</sub>** : Saturation Pulsée en Oxygène

**Hb** : Hémoglobine ou dé-oxyhémoglobine

**HbO<sub>2</sub>** : Hémoglobine oxygénée ou oxyhémoglobine

**LED** : Light Emitting Diode

**ADC** : Air Data Computer

**LCD** : Liquid Crystal Display

# *Introduction générale*

## Introduction générale

Dans le contexte actuel de la technologie médicale, la surveillance continue des signes vitaux est cruciale pour le diagnostic précoce et la gestion efficace des maladies. Les dispositifs d'oxymétrie, qui mesurent la saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>) et la fréquence cardiaque, jouent un rôle essentiel dans ce domaine. Leur utilité s'étend de la gestion des patients en soins intensifs à la surveillance des athlètes et des patients atteints de maladies chroniques à domicile.

La conception et le développement d'un dispositif d'oxymétrie intelligent visent à intégrer des fonctionnalités avancées telles que la reconnaissance d'empreintes digitales pour une identification sécurisée des utilisateurs, ainsi que la communication en temps réel des données de santé vers des plateformes de stockage ou des applications dédiées. L'objectif principal est de créer un appareil fiable, précis et accessible qui puisse répondre aux besoins diversifiés des utilisateurs tout en garantissant la sécurité et la confidentialité des données médicales.

Ce travail explore les différentes étapes de la conception d'un oxymètre intelligent, depuis la spécification des exigences jusqu'à la réalisation pratique et l'analyse des résultats. Nous commencerons par une revue de l'état de l'art des dispositifs biomédicaux, suivie d'une étude détaillée des principes de fonctionnement d'un oxymètre. Par la suite, nous décrirons la conception et le développement du dispositif, incluant le choix des composants, l'architecture système, et les organigrammes de gestion. Enfin, nous présenterons les résultats des tests et validations réalisés pour évaluer les performances du dispositif.

L'intégration de technologies modernes et l'optimisation des fonctionnalités permettront de proposer une solution innovante et efficace pour la surveillance de la santé, adaptée à un large éventail d'applications médicales.

***Chapitre I :***  
***État de l'art sur les***  
***dispositifs biomédicaux***

## Introduction

Ce chapitre présente l'état de l'art sur les dispositifs biomédicaux.

L'état de l'art sur les dispositifs biomédicaux englobe une variété d'articles, instruments, appareils ou équipements utilisés pour prévenir, diagnostiquer, traiter, ou surveiller des affections ou des maladies, ainsi que pour détecter, mesurer, rétablir, corriger ou modifier la structure ou la fonction de l'organisme à des fins de santé. Ces dispositifs médicaux peuvent être actifs, dépendant d'une source d'énergie externe pour leur fonctionnement, ou implantables, conçus pour être partiellement ou totalement introduits dans le corps humain. La classification des dispositifs médicaux en différentes catégories est essentielle pour évaluer leur criticité et leur conformité aux normes réglementaires.[1]

## 1 Généralités sur dispositifs biomédicaux

### 1.1 Définition d'un dispositif biomédical

Un dispositif biomédical est un outil, un produit ou une technologie conçue pour être utilisée dans le domaine de la santé, tout instrument, appareil, équipement, logiciel, matière ou autre article, utilisé seul ou en association, y compris le logiciel destiné par le fabricant à être utilisé spécifiquement à des fins diagnostique et/ou thérapeutique, et nécessaire au bon fonctionnement de celui-ci, destiné par le fabricant à être utilisé chez l'homme à des fins.[2]

Ces dispositifs sont fabriqués et commercialisés dans le but de prévenir, diagnostiquer, traiter ou surveiller des maladies, des affections ou des handicaps chez les êtres humains. Ils peuvent être utilisés dans divers contextes, tels que les hôpitaux, les cliniques, les cabinets médicaux, les laboratoires et même à domicile.[3]

### 1.2 Les différentes classes de dispositifs biomédicaux

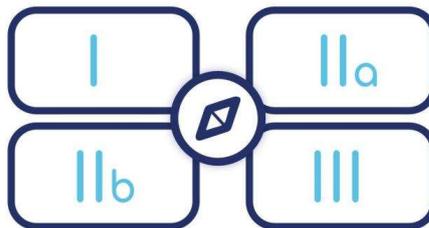
#### 1.2.1 Classification par risque

Les dispositifs biomédicaux peuvent être classés en fonction de leur risque pour la santé humaine, de leur durée d'utilisation prévue et de leur mode d'action. Voici une classification typique basée sur le risque :

- a. **Classe I « classe de risque la plus faible »** : Ce sont des dispositifs de faible risque pour la santé humaine. Ils sont soumis à une réglementation moins stricte et peuvent ne nécessiter qu'une conformité générale aux bonnes pratiques de fabrication.

Par exemple : les thermomètres, les lunettes de protection, béquilles, etc.

- b. Classe IIa « risque potentiel modéré/mesuré » :** Ils sont soumis à une réglementation plus stricte, notamment en termes d'évaluation de la sécurité et de l'efficacité, mais peuvent ne pas nécessiter d'études cliniques préalables à la mise sur le marché.  
Par exemple : les appareils de diagnostic, certains types de prothèses, certains dispositifs de monitoring médical, lentilles de contact, agrafes cutanées, couronnes dentaires, appareils auditifs, les appareils d'échographie, etc.
- c. Classe IIb « risque potentiel élevé/important » :**  
Par exemple : appareils IRM, hémodialyseurs, pompes à perfusion, sutures non absorbables, vis, lentilles intraoculaires, les produits de désinfection des lentilles, etc.
- d. Classe III « classe de haut risque » :** Ce sont des dispositifs de haut risque pour la santé humaine. Ils sont soumis à une réglementation très stricte, nécessitant souvent des essais cliniques pour démontrer leur sécurité et leur efficacité avant la mise sur le marché.  
Par exemple : les implants chirurgicaux, les stimulateurs cardiaques et les dispositifs de support de vie, les dispositifs de support de vie, implants mammaires, les stents, les prothèses de hanche, etc. [4] [5]



**Figure I.1 :** Les différentes classes de dispositifs biomédicaux « par risque » [6]

Il est important de noter que cette classification est générale et peut varier selon les réglementations spécifiques de chaque pays ou région. Les agences de réglementation telles que la FDA aux États-Unis ou l'Agence européenne des médicaments (EMA) en Europe émettent des directives spécifiques pour la classification des dispositifs médicaux dans leurs juridictions respectives.

### 1.2.2 Classement par domaine d'application

- a. Dispositifs médicaux généraux :** Ces dispositifs sont utilisés dans une variété de spécialités médicales et chirurgicales, tels que les hôpitaux, les cliniques et les cabinets médicaux.
- b. Dispositifs médicaux spécialisés :** Ces dispositifs sont conçus pour des applications spécifiques ou des spécialités médicales particulières :
- Dispositifs cardiovasculaires

- Dispositifs orthopédiques
  - Dispositifs neurologiques
  - Dispositifs ophtalmologiques
  - Dispositifs obstétricaux/gynécologiques
- c. Dispositifs médicaux pour usage domestique :** Ces dispositifs sont conçus pour une utilisation par les patients à domicile, tels que les moniteurs de glycémie, les appareils de thérapie respiratoire et les fauteuils roulants motorisés.

### 1.2.3 Classification par mode d'action

La classification des dispositifs biomédicaux par mode d'action se réfère à la manière dont ces dispositifs interagissent avec le corps humain ou accomplissent leur fonction spécifique.

- a. Dispositifs actifs :** Les dispositifs actifs sont capables de délivrer une énergie sous une forme ou une autre pour accomplir leur fonction.[7]
- Les stimulateurs cardiaques
  - Les défibrillateurs
  - Les pompes à insuline
  - Les stimulateurs nerveux.
- b. Dispositifs Passifs :** Les dispositifs passifs n'ont pas besoin d'une source d'énergie externe pour fonctionner. Ils agissent généralement en modifiant les conditions physiques ou en fournissant un support mécanique. Les attelles, les orthèses, les bandages et les prothèses sont des exemples de dispositifs passifs.[8]
- c. Dispositifs de diagnostic :** Ils peuvent inclure des outils tels que les équipements d'imagerie médicale (IRM, scanner CT, échographie), les tests de laboratoire (tests sanguins, tests d'urine) et les dispositifs de surveillance des signes vitaux (oxymètres de pouls, tensiomètres).[8]
- d. Dispositifs de surveillance :** Ces dispositifs permettent la surveillance continue des paramètres physiologiques et peuvent également intervenir pour ajuster certaines fonctions.
- Moniteurs de signes vitaux : Mesurent et affichent des paramètres tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle et la saturation en oxygène.

### 1.2.4 Classification en fonction de leur invasivité

La classification des dispositifs biomédicaux en dispositifs invasifs et non invasifs repose sur la façon dont ils interagissent avec le corps humain.

**a. Dispositifs Invasifs :**

Ces dispositifs pénètrent dans le corps humain, généralement à travers la peau ou les muqueuses, pour effectuer une intervention médicale, surveiller une condition ou fournir un traitement. Ils peuvent être temporaires ou permanents.[7]

- Cathéters vasculaires pour l'administration de médicaments ou le prélèvement de sang.
- Stents coronariens pour ouvrir et soutenir les artères coronaires.
- Prothèses cardiaques implantables pour le traitement des maladies cardiaques.

**b. Dispositifs Non Invasifs :**

Ces dispositifs n'impliquent pas de pénétration dans le corps humain et sont utilisés à l'extérieur du corps ou en contact avec la peau ou les muqueuses. Ils sont conçus pour surveiller, diagnostiquer ou traiter une condition médicale sans causer de dommages significatifs aux tissus ou organes du corps.[9]

- Moniteurs de signes vitaux pour mesurer la fréquence cardiaque, la pression artérielle, la saturation en oxygène, etc.
- Échographes pour visualiser les organes internes sans nécessité d'incision.
- Thermomètres pour mesurer la température corporelle.

Selon le guide MDCG 2021-24<sup>1</sup>, les dispositifs non invasifs relèvent principalement de la classe I, sauf dans certains cas spécifiques où d'autres règles de classification s'appliquent. Par exemple, les dispositifs destinés au soutien externe des patients, tels que les lits d'hôpitaux, les aides à la marche, les fauteuils roulants, etc., sont classés en *classe I*, sauf indication contraire.[9]

### 1.3 Réglementation des dispositifs biomédicaux

La réglementation des dispositifs biomédicaux est un ensemble de normes, de lois et de directives qui gouvernent la fabrication, la commercialisation, l'utilisation et la surveillance post-commercialisation des dispositifs médicaux. Ces réglementations sont conçues pour garantir la sécurité, l'efficacité et la qualité des dispositifs médicaux afin de protéger la santé et la sécurité des patients, des utilisateurs et du public en général. [10]

---

<sup>1</sup> Le Groupe de Coordination en matière de Dispositifs Médicaux (GCDM) vient de publier le guide MDCG 2021-24. Ce document vise à aider les fabricants à déterminer la classe de leurs dispositifs médicaux au titre du Règlement (UE) 2017/745



**Figure I.2 :** La Norme 60601-1 sécurité de base et performances essentiels des dispositifs médicaux.[11]

### 1.3.1 Étapes clés

Différentes étapes jalonnent le parcours d'un dispositif médical, de sa conception à sa mise sur le marché, en passant par les études, évaluations, audits etc. Chaque étape doit répondre à des exigences réglementaires strictement encadrées.

Voici quelques éléments clés de la réglementation des dispositifs biomédicaux :

**1. Autorisation de mise sur le marché :** Avant qu'un dispositif biomédical ne puisse être commercialisé, il doit généralement obtenir une autorisation ou une approbation des autorités réglementaires compétentes. Cela peut impliquer des évaluations de conformité, des examens de documentation technique, des essais cliniques, etc. [12]

**2. Exigences de sécurité :** Les dispositifs médicaux doivent répondre à des normes de sécurité strictes pour minimiser les risques pour les patients et les utilisateurs. Cela inclut la conception sécuritaire du dispositif, la gestion des risques, les tests de sécurité, etc.

**3. Évaluation de l'efficacité :** Les dispositifs biomédicaux doivent démontrer leur efficacité dans la réalisation de leur fonction prévue. Cela peut nécessiter des essais cliniques pour prouver leur performance et leur utilité clinique.

**4. Gestion de la qualité :** Les fabricants de dispositifs médicaux doivent mettre en œuvre des systèmes de gestion de la qualité pour assurer la fabrication cohérente de produits sûrs et efficaces. Les normes de qualité telles que les normes ISO 13485<sup>2</sup> sont souvent utilisées à cette fin.[13]

**5. Étiquetage et documentation :** Les dispositifs médicaux doivent être accompagnés d'un étiquetage clair et précis, fournissant des informations sur leur utilisation sûre et efficace.

---

<sup>2</sup> La norme ISO 13485 est une norme internationale de gestion de la qualité spécifique aux dispositifs médicaux. Elle établit les exigences pour les systèmes de management de la qualité des fabricants de dispositifs médicaux et de leurs fournisseurs dans toute la chaîne d'approvisionnement.

Une documentation technique complète, y compris des rapports d'essais et des données cliniques, est également généralement requise.

**6. Surveillance post-commercialisation** : Une fois sur le marché, les dispositifs médicaux font l'objet d'une surveillance continue pour détecter et signaler les problèmes de sécurité ou d'efficacité qui pourraient survenir. Cela peut inclure la collecte et l'analyse des données d'incidents, les rapports d'effets indésirables, etc.[14]

Ces réglementations varient d'un pays à l'autre, mais elles ont toutes pour objectif commun de garantir que les dispositifs médicaux disponibles sur le marché sont sûrs, efficaces et de haute qualité.[10]

### 1.3.2 L'évolution de la réglementation des dispositifs biomédicaux

- ✓ Utilisation accrue des technologies de pointe, telles que l'intelligence artificielle.
- ✓ Une nouvelle classification des dispositifs médicaux, avec une augmentation du champ d'application et une exclusion de certains produits contenant des substances ou organismes biologiques
- ✓ Une traçabilité des dispositifs médicaux améliorée
- ✓ Un renforcement des exigences et contrôles des organismes notifiés.
- ✓ Des exigences générales de sécurité et de performance plus strictes, ainsi que des obligations des fabricants et des distributeurs.
- ✓ La nécessité de désigner une personne chargée de veiller au respect de la réglementation.
- ✓ Collaboration internationale accrue.[15]

### 1.3.3 Agences de réglementation gouvernementales

Les agences de réglementation gouvernementales jouent un rôle crucial dans la supervision et la réglementation des dispositifs biomédicaux pour assurer leur sécurité, leur efficacité et leur qualité.

Chaque pays ou région a ses propres autorités de réglementation chargées de superviser les dispositifs biomédicaux.

Voici quelques-unes des principales agences de réglementation gouvernementales dans ce domaine :

- Food and Drug Administration (FDA) - États-Unis
- Agence européenne des médicaments (EMA) - Union européenne : Elle supervise le processus d'obtention du marquage CE, qui est nécessaire pour commercialiser les dispositifs médicaux dans l'UE
- Agence japonaise des dispositifs médicaux (PMDA) – Japon

- Therapeutic Goods Administration (TGA) – Australie.
- Health Canada – Canada.

**Marquage CE**

Le marquage CE est une exigence légale pour les dispositifs médicaux commercialisés dans l'Union européenne (UE). Il indique que le dispositif médical répond aux normes de sécurité, d'efficacité et de qualité établies par la législation européenne.

Pour obtenir le marquage CE, les fabricants doivent se conformer aux exigences essentielles de la directive européenne relative aux dispositifs médicaux (93/42/CEE) ou du règlement européen relatif aux dispositifs médicaux (UE) 2017/745, en fonction de la classe de risque du produit. En outre, ils doivent mettre en œuvre un système de gestion de la qualité conforme à la norme ISO 13485 et démontrer la conformité de leur produit par le biais d'une évaluation de la conformité.[10]

Le marquage CE autorise la mise sur le marché et l'utilisation du dispositif médical dans tous les pays de l'Union européenne sans autre approbation nationale.



Figure I.3 : Exemple d'étiquette accompagnant les produits marqués CE.[16]

**1.4 Les matériaux et les technologies employés pour la conception et la fabrication des dispositifs biomédicaux**

Les dispositifs biomédicaux utilisent une variété de matériaux et de technologies en fonction de leur application spécifique, de leurs exigences de performance et de leur interaction avec le corps humain.

La conception et la fabrication des dispositifs biomédicaux nécessitent une large gamme de matériaux et de technologies. Le choix des matériaux et des technologies dépend de plusieurs facteurs, tels que : la fonction du dispositif biomédical, le mode d'action, le site d'implantation ou d'utilisation, les exigences de biocompatibilité et de durabilité, etc.

### 1.4.1 Matériaux

Les matériaux utilisés dans la fabrication des dispositifs médicaux jouent un rôle crucial dans la qualité finale du produit. Ils doivent répondre à des exigences strictes en termes de durabilité, de compatibilité avec l'environnement et de non-toxicité pour le corps humain.

- **Polymères** : Les polymères tels que le polyéthylène, le polypropylène et le polyuréthane sont largement utilisés dans la fabrication de dispositifs médicaux en raison de leur légèreté, de leur flexibilité et de leur biocompatibilité. Pour cathéters, prothèses, membranes.
- **Métaux** : Des métaux tels que l'acier inoxydable, le titane et le cobalt-chrome sont utilisés dans les implants orthopédiques, les dispositifs cardiovasculaires et les instruments chirurgicaux en raison de leur résistance mécanique et de leur biocompatibilité.



**Figure I.4** : Usinage CNC pour la fabrication de dispositif médicale.[17]

- **Céramiques** : Les céramiques telles que l'alumine, le zirconium et le phosphate de calcium sont utilisées dans les implants dentaires, les prothèses osseuses et les revêtements de surface en raison de leur résistance à l'usure et de leur biocompatibilité.
- **Composites** : Les composites biomédicaux, tels que les composites polymère-céramique et les composites polymère-métal, combinent les avantages des différents matériaux pour des applications spécifiques, comme les implants dentaires et les dispositifs de renforcement osseux. Combinant résistance et biocompatibilité.

### 1.4.2 Technologies de fabrication

Les technologies avancées sont appliquées à la conception des dispositifs médicaux pour améliorer la qualité des soins, les moyens de prévention et les outils de diagnostic.



**Figure I.5 :** Technologie médicale : impression 3D.

- **Usinage CNC :** L'usinage par commande numérique par ordinateur (CNC) est utilisé pour fabriquer des composants précis à partir de blocs de matériaux solides tels que les métaux et les polymères.
- **Impression 3D :** L'impression 3D, ou fabrication additive, permet de créer des pièces complexes avec une grande précision à partir de matériaux polymères, métalliques et céramiques.
- **Moulage par Injection :** Le moulage par injection est utilisé pour produire des pièces en plastique de haute qualité en injectant du plastique fondu dans un moule.



**Figure I.6 :** Moulage par injection pour la fabrication de dispositifs médicaux.[17]

- **Revêtements de Surface :** Les revêtements de surface, tels que les revêtements hydrophobes, les revêtements antimicrobiens et les revêtements de libération de médicaments, sont appliqués sur les dispositifs pour améliorer leurs performances et leur biocompatibilité.
- **Bioprinting :** La bioprinting utilise des techniques d'impression 3D pour fabriquer des tissus biologiques et des organes artificiels en utilisant des cellules vivantes et des biomatériaux.

## 2 Importance des dispositifs biomédicaux dans la gestion des catastrophes biologiques

### 2.1 Les catastrophes biologiques

#### 2.1.1 Définition

Connues sous le nom de catastrophes biologiques ou pandémies, font référence à des événements où des agents biologiques, tels que des virus, des bactéries, des parasites ou des toxines, causent des maladies graves ou des décès à grande échelle parmi les humains, les animaux ou les plantes.

Ces événements peuvent être déclenchés par des agents pathogènes nouvellement émergents, des agents pathogènes existants qui subissent des mutations ou des agents biologiques intentionnellement libérés dans l'environnement.

Les catastrophes biologiques peuvent avoir des conséquences dévastatrices sur la santé publique, l'économie et la société dans son ensemble, nécessitant une réponse rapide et coordonnée pour minimiser les dommages.



Figure I.7 : Catastrophes biologiques

#### 2.1.2 Agents concernés

**Virus :** Les virus sont des agents infectieux minuscules qui peuvent causer diverses maladies chez les humains, les animaux et les plantes. Par exemple : le virus de la grippe, le virus Ebola, le virus de la rougeole et le virus du SRAS-CoV-2 responsable de la pandémie de COVID-19.

**Bactéries :** Les bactéries sont des micro-organismes unicellulaires qui peuvent être pathogènes pour les humains, les animaux et les plantes. Par exemple : Escherichia coli entérohémorragique (EHEC), Salmonella spp., et Yersinia pestis, l'agent responsable de la peste.



**Figure I.8 :** Le bioterrorisme.[18]

**Parasites :** Les parasites sont des organismes qui vivent aux dépens d'autres organismes, souvent en leur causant des dommages. Par exemple : Plasmodium spp., le parasite responsable du paludisme, et Trypanosoma brucei, le parasite responsable de la maladie du sommeil.

**Toxines :** Certaines toxines produites par des organismes peuvent être extrêmement nocives pour les humains et les animaux. Par exemple, les toxines produites par certaines souches de bactéries telles que Clostridium botulinum peuvent causer le botulisme, une maladie potentiellement mortelle.

**Agents Biologiques Artificiels :** Créés ou modifiés intentionnellement pour causer des maladies ou des dommages. Cela peut inclure des agents biologiques utilisés dans le bioterrorisme ou des agents biologiques accidentellement libérés lors d'accidents de laboratoire ou d'incidents industriels.

## **2.2 Le rôle des dispositifs biomédicaux dans la prévention des catastrophes biologiques**

Les dispositifs biomédicaux jouent un rôle crucial dans la gestion des catastrophes biologiques en permettant une prise en charge médicale adéquate, une organisation efficace des secours et une réponse rapide aux situations d'urgence. La médecine de catastrophe est une discipline essentielle qui implique un grand nombre de professionnels de la santé, notamment les médecins urgentistes, les chirurgiens, les réanimateurs et les paramédicaux, ainsi que les sapeurs-pompiers spécialisés dans la gestion des catastrophes

### **1) Diagnostic rapide et précis :**

- *Les analyseurs de laboratoire portables et les tests de diagnostic :* Identifier les agents pathogènes et la gravité de l'infection. Les tests de diagnostic rapide basés sur des

dispositifs biomédicaux (tests PCR, tests antigéniques, etc.) sont essentiels pour détecter rapidement les agents pathogènes et identifier les cas.

- *Outils de séquençage génomique* : Suivre les mutations virales et la propagation de la maladie.
- *Appareils d'imagerie médicale* : Détecter les complications et les comorbidités.



**Figure I.9** : Les analyseurs de laboratoire portables.[19]

## 2) Surveillance et suivi des patients :

Les dispositifs de surveillance des maladies, tels que les capteurs de surveillance des infections, les applications de suivi des contacts et les réseaux de surveillance épidémiologique, fournissent des données en temps réel sur la propagation des agents pathogènes et permettent aux autorités de santé publique de prendre des décisions éclairées.



**Figure I.10** : Dispositifs du surveillance portables

- *Moniteurs de santé* : Surveiller les signes vitaux et les paramètres respiratoires.
- *Systèmes de télémédecine* : Permettre le suivi à distance des patients isolés.
- *Bases de données de santé publique* : Collecter et analyser les données épidémiologiques.

## 3) Traitement des patients :

De nombreux dispositifs biomédicaux sont indispensables pour prendre en charge et traiter les patients atteints lors d'une catastrophe biologique : respirateurs, moniteurs de soins intensifs, pompes à perfusion, etc. Leur disponibilité en nombre suffisant est cruciale.

- Ventilateurs : Assister la respiration des patients gravement malades.
- Thérapies respiratoires : Administrer des médicaments et de l'oxygène.
- Traitements antiviraux : Lutter contre les agents pathogènes spécifiques.

#### 4) Protection des professionnels de la santé :

Pour protéger les professionnels de la santé contre les infections nosocomiales lorsqu'ils traitent des patients infectés.

- Équipements de protection individuelle (EPI) : Masques faciaux, gants, blouses de protection, lunettes de sécurité.
- Protocoles de désinfection : Assurer la sécurité des environnements médicaux.
- Vaccins et prophylaxie : Prévenir l'infection chez les personnels exposés.



Figure I.11 : Habillements de protection

#### 5) Recherche et développement :

Le développement accéléré de nouveaux dispositifs de diagnostic, de monitoring ou de traitement peut s'avérer indispensable pour faire face à un nouvel agent pathogène émergent ou à une menace bioterroriste inédite.

Les technologies médicales avancées, telles que l'impression 3D et l'automatisation, permettent une production rapide et personnalisée de dispositifs médicaux adaptés aux besoins spécifiques des situations de catastrophe biologique.

- Outils de diagnostic : Développer de nouveaux tests rapides et précis.
- Vaccins et traitements : Accélérer la recherche et les essais cliniques.
- Modèles de simulation : Prédire l'évolution des épidémies et optimiser les interventions.

Les dispositifs biomédicaux constituent des outils essentiels pour une gestion efficace des catastrophes biologiques. Ils permettent de diagnostiquer, surveiller, traiter et prévenir les maladies, tout en protégeant les populations et les personnels de santé.

L'investissement dans la recherche, le développement et la production des dispositifs biomédicaux est crucial pour renforcer la capacité de réponse aux futures menaces biologiques.

### 2.2.1 COVID-19

Lors de l'épidémie de COVID-19, les tests de diagnostic PCR ont permis d'identifier rapidement les personnes infectées et de limiter la propagation du virus.

Les respirateurs artificiels ont sauvé la vie de nombreux patients gravement malades atteints de COVID-19.

Les EPI ont protégé les personnels de santé du risque d'infection par le COVID-19. Les vaccins contre le COVID-19 ont permis de réduire significativement le nombre de cas graves et de décès.

Voici quelques exemples concrets de l'utilisation de dispositifs biomédicaux dans la gestion des catastrophes biologiques :

- Lors de l'épidémie d'**Ebola** en Afrique de l'Ouest en 2014-2016, les tests de diagnostic rapides ont permis d'identifier les cas de maladie et de suivre la propagation du virus.
- La surveillance biométrique a été utilisée pour détecter les passagers fiévreux à l'entrée des aéroports et des ports maritimes, ce qui a contribué à prévenir la propagation du virus **Zika** en 2016.

Il est clair que les dispositifs biomédicaux jouent un rôle vital dans la lutte contre les catastrophes biologiques. En investissant dans ces technologies, nous pouvons mieux nous préparer aux futures menaces et sauver des vies.

## 3 Exemples des dispositifs biomédicaux et leurs applications

### 3.1 Dispositifs de diagnostic

#### 3.1.1 L'imagerie médicale

Les dispositifs d'imagerie médicale permettent de visualiser les structures internes du corps humain pour diagnostiquer les maladies, évaluer les lésions et guider les interventions chirurgicales. Ces dispositifs utilisent une variété de techniques, y compris les rayons X, les ultrasons, l'IRM et la tomodensitométrie (CT).

1. **Scanner CT (Tomodensitométrie TDM) :** Un scanner, ou tomodensitométrie (TDM), est un examen d'imagerie médicale utilisant des rayons X pour créer des images en coupes fines du corps humain. Il produit des images 3D des tissus mous, des os et des structures anatomiques. Le scanner est largement employé pour examiner la plupart des organes de manière précise, y compris le cerveau, le cœur, les poumons, les artères, le foie et la vésicule biliaire. Il permet de détecter des signes de maladies, d'étudier

l'anatomie, de guider des interventions chirurgicales et de suivre les traitements de cancers et autres pathologies. [20] [21]



Figure I.12 : Scanner CT (Tomodensitométrie TDM)

## 2. IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) :

L'IRM est une technique d'imagerie médicale non invasive qui offre des vues en deux ou trois dimensions de l'intérieur du corps humain. Elle utilise un champ magnétique puissant et des ondes radio pour produire des images détaillées des organes, tissus mous, cerveau, colonne vertébrale, vaisseaux sanguins, os et articulations. L'IRM est utile pour diagnostiquer diverses affections, évaluer les traitements et surveiller certaines pathologies. Contrairement aux rayons X, elle n'émet pas de radiation ionisante, ce qui la rend sûre pour les patients. L'IRM peut également utiliser un agent de contraste pour améliorer la visualisation de certaines structures. [21]



Figure I.13 : Les résultats de l'examen IRM sur un ordinateur [22]

**3. Echographes :** Les échographes utilisent des ultrasons pour créer des images internes du corps humain et sont largement utilisés en abdomen, gynécologie, obstétrique, cardiologie et autres spécialités. Les échographes portables offrent une imagerie pratique et mobile, permettant des examens en dehors des installations hospitalières. Ces dispositifs compacts et fiables offrent une visualisation en temps réel

des organes sans douleur ni risque pour le patient, souvent utilisés pendant la grossesse pour surveiller le développement du fœtus.[23]



**Figure I.14 :** Dispositifs d'imagerie médicale, échographe.

### 3.1.2 Tests de laboratoire

Les tests de laboratoire comprennent une gamme de dispositifs et d'instruments utilisés pour analyser des échantillons biologiques tels que le sang, l'urine, la salive et les tissus. Ils peuvent être utilisés pour diverses raisons telles que le dépistage, le diagnostic, l'évaluation de la sévérité d'une maladie et la surveillance de l'évolution d'un traitement. Ces tests peuvent être réalisés sur différents échantillons biologiques tels que le sang, l'urine, les tissus, etc.

Il est important de noter que ces valeurs normales peuvent varier d'un laboratoire à un autre, ce qui souligne l'importance de consulter un professionnel de la santé pour interpréter les résultats spécifiques à chaque individu



**Figure I.15 :** Résultats fiables dans les laboratoires de biologie médicale.[24]

- Analyseurs de biochimie pour mesurer les niveaux de glucose, de cholestérol, d'électrolytes, etc.
- Hématologie pour compter les cellules sanguines et évaluer la fonction sanguine.
- Tests de coagulation pour évaluer la capacité de coagulation du sang.
- Tests d'immunologie pour détecter les anticorps et les antigènes associés à des maladies spécifiques.

### 3.1.3 Moniteurs de signes vitaux

Les moniteurs de signes vitaux sont des dispositifs portables utilisés pour surveiller en continu les paramètres physiologiques tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle, la saturation en oxygène et la température corporelle. Ces dispositifs sont utilisés dans les hôpitaux, les cliniques et les soins à domicile pour surveiller l'état des patients et détecter les signes de détresse médicale[25]. Certains modèles intègrent des écrans couleur, des capacités de surveillance à distance, des alarmes pour signaler des variations anormales des signes vitaux, et une connectivité pour enregistrer et partager les données collectées.

Les moniteurs de signes vitaux sont conçus pour être faciles à utiliser, précis et fiables, offrant aux professionnels de la santé un outil indispensable pour surveiller et réagir rapidement aux changements dans l'état clinique des patients.

#### 1. Moniteurs de pression artérielle : Tensiomètre [1]

Les moniteurs de pression artérielle sont des dispositifs médicaux utilisés pour mesurer la pression exercée par le sang sur les parois des artères. Ces dispositifs sont essentiels pour surveiller la santé cardiovasculaire, diagnostiquer l'hypertension et évaluer la réponse aux traitements antihypertenseurs[26]. Il existe plusieurs types de moniteurs de pression artérielle, notamment :

- **Moniteurs de Pression Artérielle Automatiques :** Ces moniteurs utilisent un brassard automatique et un mécanisme de gonflage/dégonflage pour mesurer la pression artérielle de manière rapide et précise.[27]
- **Moniteurs de Pression Artérielle Manuels :** Ces moniteurs nécessitent l'intervention d'un professionnel de la santé pour gonfler et dégonfler le brassard à l'aide d'un stéthoscope et d'un manomètre.[28]
- **Moniteurs Ambulatoires de Pression Artérielle :** Ces dispositifs sont portés par le patient pendant une période prolongée (généralement 24 heures) pour enregistrer les variations de pression artérielle tout au long de la journée et de la nuit.[29]



Figure I.16 : Moniteurs Ambulatoires de Pression Artérielle.[30]

2. **Moniteurs de fréquence cardiaque (Cardiofréquence)** : Ils sont des dispositifs utilisés pour mesurer/afficher et surveiller la fréquence cardiaque d'une personne en temps réel ou d'enregistrer la fréquence cardiaque pour une analyse ultérieure. Ces dispositifs sont largement utilisés dans le domaine du fitness, du sport, de la santé et même dans certains contextes médicaux.
- **Montres de Fitness** : De nombreuses montres de fitness et trackers d'activité intègrent des capteurs de fréquence cardiaque qui mesurent le pouls du porteur à partir de son poignet. Ces capteurs utilisent la technologie de photopléthysmographie pour détecter les variations de la lumière réfléchiée par les vaisseaux sanguins sous la peau, ce qui permet de calculer la fréquence cardiaque.
  - **Ceintures de Fréquence Cardiaque** : Les ceintures de fréquence cardiaque sont des dispositifs portés autour de la poitrine qui mesurent la fréquence cardiaque à l'aide de capteurs placés près du cœur. Ces capteurs détectent les variations du rythme cardiaque et transmettent les données à un récepteur, tel qu'une montre ou un téléphone portable, via une connexion sans fil (généralement Bluetooth).[31]



Figure I.17 : Dispositifs médicaux sportifs

### 3. Oxymètres de pouls

Un oxymètre de pouls est un dispositif médical qui permet de mesurer le taux d'oxygène dans le sang.

Les oxymètres de pouls sont largement utilisés dans les hôpitaux pour surveiller l'oxygénation des patients pendant et après les interventions chirurgicales, ainsi que pour les patients atteints de maladies pulmonaires ou cardiaques.



Figure I.18 : Dispositif d'oxymètre de pouls

### 3.2 Dispositifs thérapeutiques implantables

Les dispositifs thérapeutiques implantables sont des dispositifs conçus pour être implantés dans le corps humain, soit en totalité, soit en partie, par une intervention chirurgicale ou médicale, et destinés à rester après l'intervention. Ces dispositifs peuvent être actifs ou passifs, et sont utilisés pour traiter une variété de conditions médicales, telles que les maladies cardiaques, les maladies pulmonaires, les maladies neurologiques, et les maladies orthopédiques.

1. **Pacemakers** : Les pacemakers sont des dispositifs implantables utilisés pour traiter les troubles du rythme cardiaque en délivrant des impulsions électriques pour réguler le rythme cardiaque. [32]

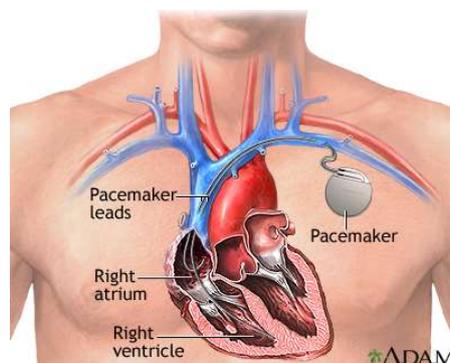


Figure I.19 : Stimulateur cardiaque, Encyclopédie médicale MedlinePlus.[33]

2. **Prothèses orthopédiques** : Les prothèses orthopédiques, telles que les prothèses de hanche ou de genou, sont utilisées pour remplacer les articulations endommagées ou usées, améliorant ainsi la mobilité et la qualité de vie des patients souffrant d'arthrite ou de blessures articulaires graves.[34]



Figure I.20 : Prothèse orthopédique

### 3. Implants dentaires et implants cochléaires :

Les implants dentaires sont utilisés pour remplacer les dents manquantes. Ils offrent une solution permanente et stable pour restaurer l'esthétique et la fonction dentaire.

Les implants cochléaires sont utilisés pour restaurer l'audition chez les personnes atteintes de surdité sévère à profonde en convertissant les signaux sonores en impulsions électriques directement envoyées au nerf auditif.

### 3.3 Dispositifs de traitement

1. **Respirateurs artificiels** : Aident les patients à respirer.
2. **Dialyseur** : La dialyse est un traitement médical utilisé chez les personnes dont les reins ne fonctionnent pas correctement, généralement en raison d'une insuffisance rénale. L'hémodialyse est le processus par lequel le sang est nettoyé en utilisant une machine appelée dialyseur.[35]
3. **Pompes à insuline** : Administrent de l'insuline aux personnes diabétiques.
4. **Thérapies par la lumière** : sont des approches médicales qui utilisent la lumière pour traiter diverses conditions médicales ou pour promouvoir la guérison et le bien-être, par exemple la thérapie laser.

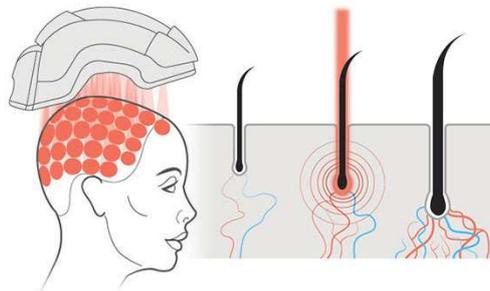


Figure I.21 : Thérapies au laser de bas niveau.[36]

### 3.4 Logiciels et technologies de l'information :

1. **Dossiers médicaux électroniques** : Stockent les informations médicales des patients.
2. **Télémédecine** : Permet aux patients de consulter des médecins à distance.

3. **Intelligence artificielle** : Aide au diagnostic des maladies et au développement de nouveaux traitements.

## 4 Analyse critique des technologies existantes

L'évaluation critique des technologies biomédicales est essentielle dans le domaine de la santé, où l'innovation rapide et les progrès technologiques offrent de nouveaux moyens de diagnostic, de traitement et de suivi des patients. Cette analyse vise à examiner attentivement les aspects positifs et négatifs des technologies existantes, mettant en lumière leurs avantages potentiels ainsi que les défis et les risques associés à leur utilisation. Dans cette optique, cette introduction explore plusieurs domaines clés d'analyse critique, notamment la complexité d'utilisation, les risques pour la sécurité des patients, la fiabilité des données, la dépendance excessive aux technologies et les considérations financières. En comprenant pleinement ces aspects, les professionnels de la santé peuvent prendre des décisions éclairées sur l'adoption et l'utilisation des technologies biomédicales, contribuant ainsi à fournir des soins de qualité et sûrs pour les patients.

Voici quelques-unes des analyses critiques courantes de la technologie existante dans le domaine biomédical :

1. **Complexité et manque de convivialité** : Certaines technologies biomédicales peuvent être complexes à utiliser pour les professionnels de la santé, ce qui peut entraîner une courbe d'apprentissage longue et des erreurs potentielles lors de leur utilisation. Une interface utilisateur peu conviviale peut également entraîner une utilisation inefficace ou inappropriée de la technologie.
2. **Risques pour la sécurité des patients** : Comme dans le domaine médical plus général, la collecte et le stockage de données sensibles sur des appareils biomédicaux peuvent poser des risques pour la sécurité des patients. Les cyberattaques et les failles de sécurité peuvent compromettre l'intégrité des données et la confidentialité des patients.
3. **Fiabilité et validation des données** : Il est essentiel que les technologies biomédicales fournissent des données fiables et précises pour garantir des diagnostics et des traitements appropriés. Cependant, certains systèmes peuvent souffrir de problèmes de fiabilité, de calibrage inadéquat ou de résultats erronés, ce qui peut entraîner des erreurs médicales et des conséquences néfastes pour les patients.
4. **Dépendance excessive aux technologies** : La technologie biomédicale peut également entraîner une dépendance excessive des professionnels de la santé aux machines et aux

logiciels pour diagnostiquer et traiter les patients. Cela peut entraîner une perte de compétences cliniques et une diminution de l'attention portée aux patients.

- 5. Coûts élevés :** L'adoption de nouvelles technologies biomédicales peut être coûteuse pour les établissements de santé, ce qui peut entraîner une augmentation des coûts pour les patients. De plus, les coûts de maintenance et de mise à jour des équipements biomédicaux peuvent être élevés.

## **Conclusion**

En conclusion, ce chapitre a mis en lumière l'évolution, la diversité et l'importance des dispositifs biomédicaux dans le domaine médical contemporain. La convergence des avancées technologiques, des matériaux innovants et des réglementations rigoureuses assure la production de dispositifs sûrs, efficaces et capables de répondre aux défis de santé actuels et futurs. L'importance accrue des dispositifs biomédicaux dans la gestion des catastrophes biologiques, comme la pandémie de COVID-19, souligne leur rôle essentiel dans la préservation de la santé publique. La recherche continue et l'innovation dans ce domaine restent primordiales pour améliorer la qualité des soins de santé et la gestion des patients à travers le monde.

*Chapitre II :*  
*Étude générale d'un*  
*oxymètre*

## **Introduction**

Le chapitre II de cette étude se concentre sur une analyse approfondie de l'oxymètre, un dispositif essentiel dans le domaine médical pour évaluer la saturation en oxygène dans le sang. Dans cette introduction, nous explorerons plusieurs aspects clés liés à l'oxymétrie, notamment son importance dans la prévention et le suivi de la santé, les méthodes existantes pour la réalisation d'un oxymètre, les principes de fonctionnement de cet appareil vital, ainsi que l'évaluation des performances des oxymètres disponibles sur le marché. En comprenant ces éléments fondamentaux, nous pourrons mieux appréhender le rôle crucial de l'oxymètre dans la pratique médicale moderne et son impact sur la prise en charge des patients.

### **1 Introduction à l'oxymétrie**

Dans le domaine médical, la surveillance de la saturation en oxygène dans le sang est une composante cruciale de l'évaluation de la santé respiratoire d'un individu. L'oxymétrie est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour effectuer cette mesure de manière non invasive et efficace. Cette technique repose sur des principes optiques simples mais puissants pour fournir des informations vitales sur le niveau d'oxygène dans le sang sans nécessiter de prélèvements invasifs.

#### **1.1 Rappel physiologique**

Le corps humain établit plusieurs fonctions et en même temps il est exposé à plusieurs maladies, et parmi ces fonctions la respiration est obligatoire pour que l'être humain survive.

D'une part, pour la réalisation de cette fonction on a besoin de deux opérations essentielles qui sont l'inspiration et l'expiration, ces derniers sont effectués grâce à la combinaison d'un système cardio-respiratoire (poumons, le cœur) et le système cardiovasculaire (le cœur et le sang) basé sur la circulation du sang chargé des gaz respiratoires.

D'autre part, le dysfonctionnement de ce système provoque quelques maladies parmi elles l'hypoxémie.

Pour la surveillance du patient on a proposé un système qui sert à calculer le taux d'oxygénation et le rythme cardiaque dans le corps humain, et cela se fait avec un appareil médical qui est l'Oxymètre de pouls. Cet appareil a de nombreuses applications en pneumologie, anesthésie et surtout en médecine d'urgence.[37]

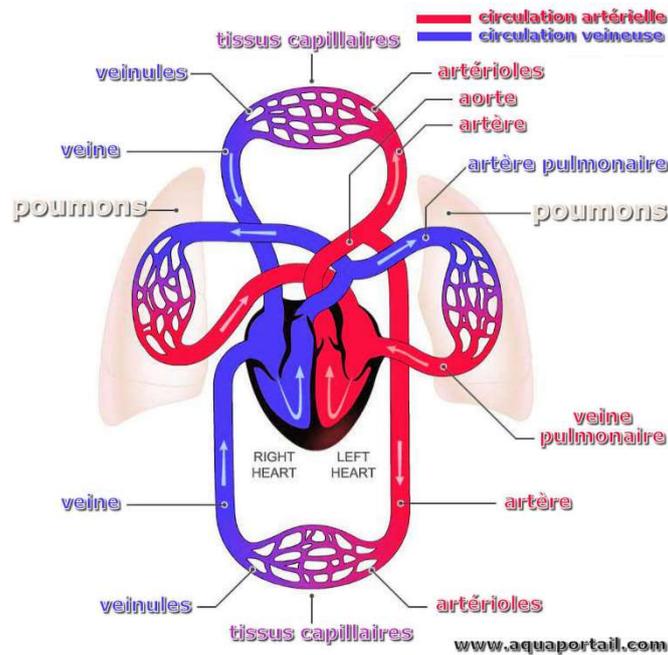
##### **1.1.1 Système cardio-respiratoire**

Le système cardio-respiratoire est une combinaison des systèmes cardiovasculaire et respiratoire. Il joue un rôle crucial dans l'apport d'oxygène aux tissus et l'élimination du dioxyde

de carbone (CO<sub>2</sub>) du corps. Ce système est essentiel pour maintenir l'homéostasie et le métabolisme cellulaire.

**1) Système Cardiovasculaire :** Le système cardiovasculaire comprend le cœur et les vaisseaux sanguins, et assure la circulation du sang.[38]

- Cœur : Organe musculaire qui pompe le sang à travers les vaisseaux sanguins.
  - ✧ Oreillettes et Ventricules : Chambres du cœur qui reçoivent et expulsent le sang.
  - ✧ Valves Cardiaques : Assurent le flux unidirectionnel du sang.[38]
- Vaisseaux Sanguins :
  - ✧ Artères : Transportent le sang oxygéné du cœur vers les tissus.
  - ✧ Veines : Ramènent le sang désoxygéné vers le cœur.
  - ✧ Capillaires : Sites d'échange de gaz et de nutriments entre le sang et les tissus.[38]



**Figure II.1 :** Schéma de l'appareil cardiovasculaire.[39]

**2) Système respiratoire :** Le système respiratoire est responsable de l'apport d'oxygène (O<sub>2</sub>) et de l'élimination du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Il comprend les voies respiratoires, les poumons et les structures associées.[40]

- Voies Respiratoires Supérieures :
  - Nez : Filtre, réchauffe et humidifie l'air.
  - Pharynx et Larynx : Conduisent l'air vers les poumons.
- Voies Respiratoires Inférieures :

- Trachée : Conduit l'air vers les bronches.
- Bronches et bronchioles : Distribuent l'air dans les poumons.
- Alvéoles : Sites d'échange gazeux entre l'air et le sang.

Lorsqu'un individu inspire l'air, celui-ci passe par la trachée, rentre dans les bronches, passe par les bronchioles et se rend jusqu'aux alvéoles. C'est là que les échanges gazeux se font. Les alvéoles relient le système respiratoire aux capillaires du système circulatoire. Le sang qui circule dans les capillaires libère du CO<sub>2</sub> et extrait l'O<sub>2</sub> de l'air.[37]

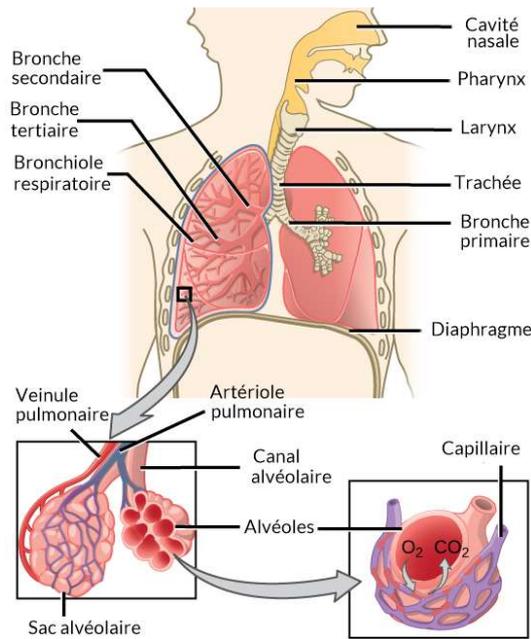


Figure II.2 : Schéma de système respiratoire.[24]

### 1.1.2 Hémoglobine

L'hémoglobine est une protéine essentielle présente dans les globules rouges du sang, responsable de la couleur rouge du sang [41], jouant un rôle crucial dans le transport de l'oxygène (O<sub>2</sub>) des poumons vers les tissus et de retour du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des tissus vers les poumons. Sa structure et son fonctionnement sont fondamentaux pour la physiologie humaine.

- ❖ **Les globules rouges** : Les globules rouges, également appelés hématies, jouent un rôle crucial dans le transport de l'oxygène dans le corps.
  - ✓ Les globules rouges sont composés d'environ 33 % d'hémoglobine
  - ✓ Chaque molécule d'hémoglobine contient quatre atomes de fer, essentiels pour la liaison de l'oxygène.

### 1.1.2.1 Structure de l'hémoglobine

L'hémoglobine est une protéine tétramérique, composée de quatre sous-unités. Chaque sous-unité comprend une chaîne polypeptidique et un groupe hème.

- Chaînes Polypeptidiques : L'hémoglobine adulte (HbA) est composée de deux chaînes alpha ( $\alpha$ ) et deux chaînes bêta ( $\beta$ ). [37] D'autres formes, comme l'hémoglobine fœtale (HbF), contiennent des chaînes gamma ( $\gamma$ ) à la place des chaînes bêta.
- Groupes Hème : Chaque chaîne polypeptidique contient un groupe hème, une structure organique complexe avec un atome de fer ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en son centre. C'est cet atome de fer qui lie l'oxygène. [37]

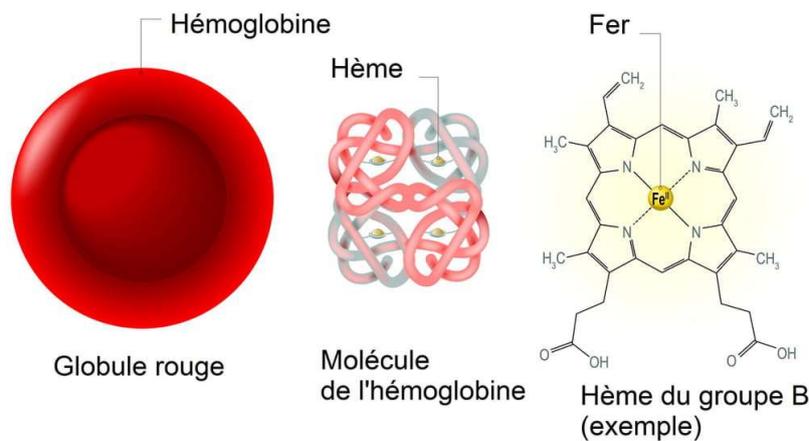


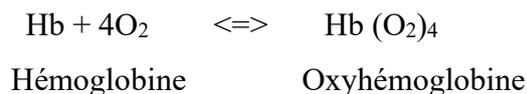
Figure II.3 : Schéma de la structure de l'hémoglobine [41]

### 1.1.2.2 Mode de transport des gaz

Le transport des gaz s'effectue en deux modes :

#### 1) Mode de transport de l'oxygène

- L'oxygène est transporté majoritairement (98%) sous forme liée à l'hémoglobine dans les globules rouges. [42] [43]
- Dans les poumons, les globules rouges captent l'oxygène. Chaque molécule d'hémoglobine se lie à quatre molécules d'oxygène, formant de **l'oxyhémoglobine**. Cela donne aux globules rouges leur couleur rouge vif caractéristique.



- Le pourcentage restant (2%) est transporté sous forme dissoute dans le plasma. [42]

#### 2) Mode de transport de dioxyde de carbone $\text{CO}_2$ :

Le produit par les cellules est transporté aux poumons pour être expulsé. Il est également dégagé sous trois formes différentes :

- 60-70% sous forme d'acide carbonique ( $H_2CO_3$ ) dans le plasma et le cytoplasme des érythrocytes.[43]
- 5-10% sous forme dissoute dans le plasma et le cytoplasme des érythrocytes.[43]
- 30% sous forme liée à l'hémoglobine.[43] Lors de la circulation à travers les tissus, l'oxyhémoglobine libère l'oxygène, qui est alors utilisé par les cellules pour les processus métaboliques. Après avoir libéré l'oxygène, l'hémoglobine devient de **la désoxyhémoglobine**, et les globules rouges prennent une teinte plus bleutée.

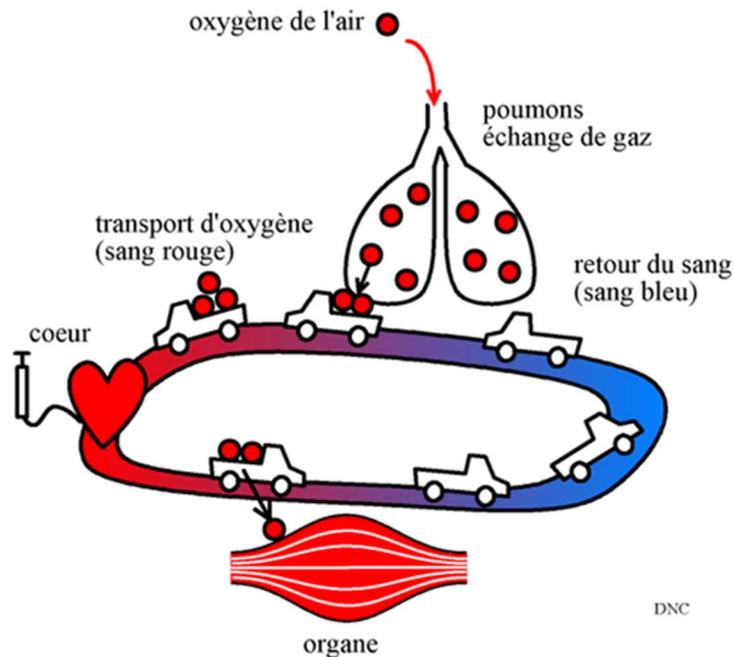


Figure II.4 : Mode de transport d'oxygène [44]

### 1.1.3 La saturation en oxygène ( $SpO_2$ )

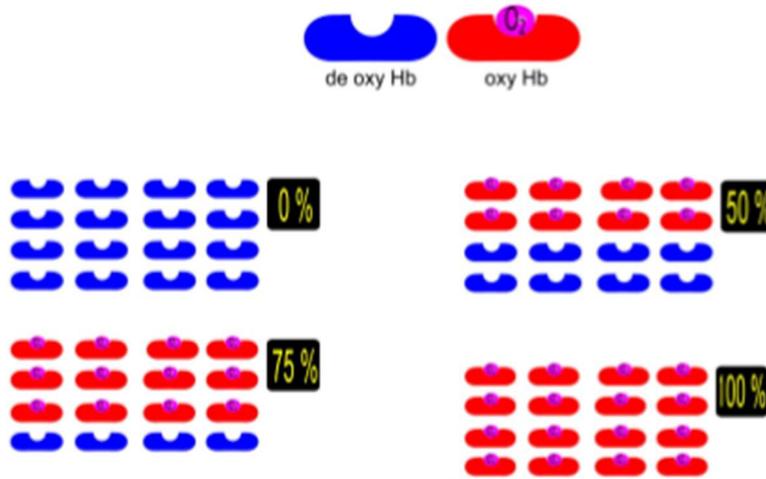
L'oxygène est le substrat le plus nécessaire à la vie. Une insuffisance d'oxygène (hypoxie) entraîne des handicaps neurologiques dévastateurs, voire la mort.

La saturation en oxygène du sang artériel est un paramètre très utile à connaître pour les cliniciens, en particulier chez les patients souffrant de troubles respiratoires.

La saturation du sang artériel en oxygène se définit simplement comme le pourcentage d'hémoglobine transportant l'oxygène[45]. Normalement, il est de 95 % à 99 % dans le sang artériel.[46]

**La saturation artérielle en oxygène ( $SpO_2$ )** est une méthode de mesure non invasive (sans introduire d'instruments dans la peau) qui rend du taux d'hémoglobine oxydée sur l'hémoglobine totale contenue dans le sang artériel.

Prenez les situations ci-dessous. Il existe 16 unités d'hémoglobine :



**Figure II.5 :** Des pourcentages d'hémoglobine dans le sang qui est chargée de molécules d'oxygène.

Si la saturation artérielle en oxygène est mesurée de manière **invasive** (par une prise une quantité de sang) elle est notée (**SaO2**) :

$$SaO2 = \frac{[HbO2]}{[Hémoglobine\ total]} \times 100\%$$

- ✓ [Hémoglobine total] = [HbO2 + Hb]
- ✓ HbO2 = Oxyhémoglobine
- ✓ Hb = Désoxyhémoglobine

Si la saturation est mesurée de manière non invasive à l'aide de l'oxymétrie de pouls, elle est généralement appelée SpO2 « la Saturation périphérique en oxygène ». Dans des conditions physiologiques normales, le sang artériel est saturé à 97%, tandis que le sang veineux est saturé à 75%.

**Exemple numérique :**

- Si la concentration d'[HbO2] est de 15 g/dL et la concentration totale d'hémoglobine est de 20 g/dL dans un échantillon de sang artériel,
- $SaO2 = (15\text{ g/dL}) / (20\text{ g/dL}) \times 100 = 75\%$

Donc, si 75% de l'hémoglobine totale est oxygénée dans le sang artériel, la saturation artérielle en oxygène est de 75%.

## 2 Oxymètre de Pouls

L'oxymètre de pouls, également appelé le saturomètre est un dispositif médical permet la détection de manière non –invasive, fiable et simple de la saturation pulsée en oxygène de l'hémoglobine ( $SpO_2$ ) ainsi que de la fréquence cardiaque.

Le dispositif présente sous la forme d'un petit boîtier généralement sous forme de doigtier contenant des diodes émettant de la lumière qui contient un capteur, d'un moniteur (ECG) avec affichage. L'émetteur doit être placé sur l'ongle pour de meilleurs résultats. Certains moniteurs affichent également une courbe en plus des paramètres mesurés.[47]

Il existe différents modèles d'oxymètres, tels que des pinces à doigts, des doigtiers souples ou rigides, des bandes autocollantes pour les différentes parties du corps. Ces appareils sont largement utilisés dans divers services hospitaliers et sont essentiels pour surveiller la saturation en oxygène des patients de manière continue.

### 2.1 Historique

L'oxymètre de pouls est un outil de diagnostic utilisé dans le monde entier en médecine pour surveiller l'oxygénation du taux sanguin d'un patient. Son histoire remonte aux années 1800, avec des contributions de scientifiques tels que Pierre Bouger, Jean Henri Lambert, Johann Christian Friedrich Hölder, et August Beer. Ces scientifiques ont posé les bases de la loi de Beer-Lambert, qui est au cœur du principe de l'oxymétrie de pouls. Cette loi, qui décrit la relation entre l'absorption de lumière par un milieu et la concentration de substances absorbantes dans ce milieu, est au cœur du principe de l'oxymétrie de pouls.[48]

1860, la découverte de la modification de la couleur de l'hémoglobine par l'oxygène a ouvert la voie à la possibilité de mesurer la saturation en oxygène dans le sang. En 1874, la première mesure de la saturation sanguine chez l'homme a été réalisée, marquant une avancée majeure dans le domaine.

Le premier monitoring de la saturation en oxygène du sang a été développé en 1935 par Carl Matthes sous forme d'un saturomètre d'oreille non invasif et non pulsatile. Cette technologie utilise une technique d'absorption de lumière rouge et infrarouge pour mesurer la saturation en oxygène.[49]

En 1942, Millikan a inventé un saturomètre d'oreille portable et a utilisé pour la première fois le terme "oxymètre". Cependant, ces premiers oxymètres étaient encore insuffisamment fiables pour une utilisation courante en pratique clinique et étaient principalement utilisés à des fins de recherche.

En 1974, Aoyagi, un bio-ingénieur japonais, a découvert par hasard lors de ses recherches que la modification de l'oxygénation du sang modifiait les rapports entre les fractions pulsatiles des lumières rouge et infrarouge. Cela a conduit à la création du premier oxymètre de pouls, qui mesurait la saturation pléthysmographique en oxygène (SpO<sub>2</sub>).[50]

À la fin des années 1970, la firme japonaise Minolta a repris le concept d'Aoyagi pour développer un oxymètre de pouls digital à fibre optique. Grâce aux progrès technologiques, les oxymètres de pouls sont devenus courants dans les moniteurs de surveillance en anesthésie et en réanimation dès 1982.[50]

### 2.1.1 Guide Pratique pour Utiliser un Oxymètre de Pouls et Interpréter les Résultats

Pour mesurer la saturation en oxygène du sang avec un oxymètre de pouls, suivez ces étapes simples :

- Avant de commencer la mesure, assurez-vous que l'ongle est propre et exempt de vernis à ongles, car cela pourrait fausser les résultats.
- Placez le capteur de l'oxymètre de pouls à l'extrémité d'un doigt, en veillant à ne pas le mettre de travers et à ne pas vous tromper de sens.
- Pendant la mesure, évitez de bouger, car cela pourrait altérer les résultats. La mesure est généralement très rapide.
- Lecture des mesures : L'écran de l'oxymètre affichera deux données principales :
  - 📊 SpO<sub>2</sub> (Saturation en Oxygène) : Ce pourcentage indique la saturation en oxygène dans le sang. Une valeur normale se situe entre 95% et 100%. Une valeur inférieure à 90% est considérée comme une désaturation, nécessitant une attention médicale.
  - 📊 Fréquence Cardiaque (Pouls) : En plus de la saturation en oxygène, l'oxymètre affiche également la fréquence cardiaque.
- Interprétation des résultats : Une saturation en oxygène normale varie entre 95% et 100%. Une valeur entre 90% et 95% indique une insuffisance respiratoire, tandis qu'une valeur inférieure à 90% peut indiquer une détresse respiratoire nécessitant une intervention médicale.

### 2.1.2 Importance de l'oxymètre dans la prévention et le suivi de la santé

**Dépistage précoce des problèmes respiratoires :** L'oxymètre de pouls peut aider à détecter précocement les problèmes respiratoires tels que l'hypoxémie (niveau insuffisant d'oxygène dans le sang), ce qui est crucial pour prendre des mesures rapides et éviter des complications graves.

**Suivi des maladies pulmonaires chroniques :** Pour les personnes atteintes de maladies pulmonaires chroniques telles que la BPCO (bronchopneumopathie chronique obstructive) ou la fibrose pulmonaire, un oxymètre de pouls peut être utilisé pour surveiller régulièrement leur saturation en oxygène, permettant ainsi un ajustement approprié du traitement et une intervention rapide en cas de détérioration.

L'oxymétrie permet de surveiller des personnes atteintes de tous types de pathologies affectant l'oxygène dans le sang comme :

- L'asthme
- Une pneumonie
- Un cancer du poumon
- L'anémie
- Une crise cardiaque ou insuffisance cardiaque
- Des malformations cardiaques congénitales. [51]

**Gestion de l'apnée du sommeil :** Les personnes souffrant d'apnée du sommeil peuvent bénéficier de l'utilisation de l'oxymètre de pouls pendant le sommeil pour évaluer la gravité de leur condition et l'efficacité du traitement tel que la thérapie par pression positive continue (PPC).

**Surveillance à domicile des patients atteints de COVID-19 :** Pendant la pandémie de COVID-19, les oxymètres de pouls sont devenus des outils précieux pour surveiller les patients atteints de la maladie à domicile. Une baisse de la saturation en oxygène peut être un signe précoce de complications sévères nécessitant une attention médicale immédiate. [52]

**Suivi de la condition physique :** Les athlètes et les amateurs de fitness peuvent utiliser l'oxymètre de pouls pour évaluer leur niveau de condition physique et leur capacité à s'entraîner à des intensités spécifiques en surveillant leur saturation en oxygène pendant l'exercice.

### 3 Principes de fonctionnement d'un oxymètre

Les principes de fonctionnement d'un oxymètre sont les bases théoriques et techniques qui expliquent comment un oxymètre mesure la saturation en oxygène du sang (SpO<sub>2</sub>) et la fréquence cardiaque.

L'oxymétrie de pouls est basée sur deux principes :

- L'hémoglobine (Hb) circule dans le sang sous deux formes différentes (oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine) et qui est une protéine permettant la liaison entre l'oxygène et le sang. En effet le sang étant composé de 55% à 60% d'eau ce qui fait que l'oxygène est peu soluble dans ce dernier.

- Le sang circule sous deux flux différents l'un pulsatile, l'autre continu.[53] [54]

Le principe de fonctionnement est basé sur :

- ✓ L'émission de deux lumières (rouge et infrarouge).
- ✓ L'absorption par le flux pulsatile du sang (Hb, HbO<sub>2</sub>).[37]

### 3.1 Emission et absorption de la lumière :

Pour obtenir la quantité globale d'hémoglobine qui n'absorbent pas dans le même spectre, l'oxymètre est doté de deux voyants à deux longueurs d'onde spécifiques :

- Voyant infrarouge (invisible, 960 nm)
- Voyant rouge (660 nm).

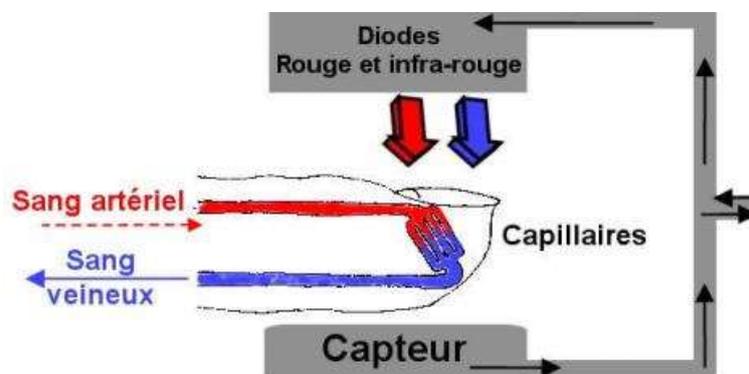


Figure II.6 : Principe d'émission / réception.[55]

L'oxymètre de pouls calcule la saturation en oxygène en comparant la quantité de lumière rouge et de lumière infrarouge absorbée par le sang. En fonction des quantités d'oxygène Hb et de désoxyhémoglobine Hb présentes, le rapport entre la quantité de lumière rouge absorbée et la quantité de lumière infrarouge absorbée change.

Ces deux formes absorbent la lumière différemment :

- L'HbO<sub>2</sub> (oxyhémoglobine) absorbe davantage la lumière infrarouge et moins la lumière rouge.
- L'Hb (désoxyhémoglobine) absorbe davantage la lumière rouge et moins la lumière infrarouge.

La différence d'absorption permet de déterminer la saturation en oxygène du sang.

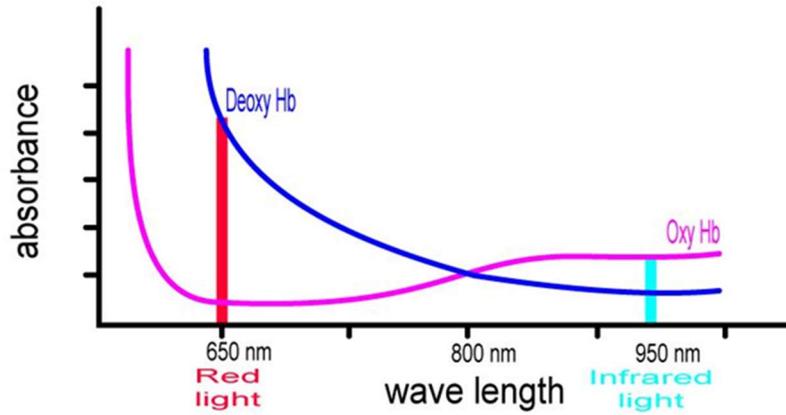


Figure II.7 : Variations de l'intensité de la lumière en fonction de la longueur d'onde.[53]

### 3.2 Détection de la Lumière

La lumière non absorbée traverse les tissus et est captée par une photodiode dans la méthode de transmission ou est réfléchiée et captée par une photodiode dans la méthode de réflexion. La photodiode convertit la lumière en un signal électrique.

#### 4.1.1 Oxymètre en transmission

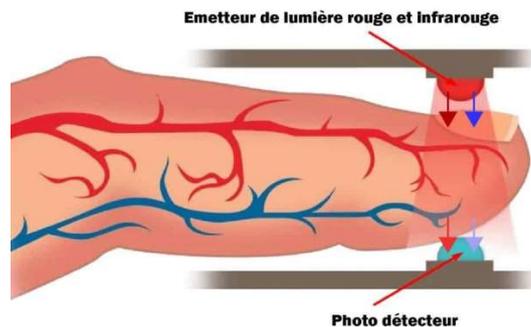


Figure II.8 : Oxymètre en transmission.

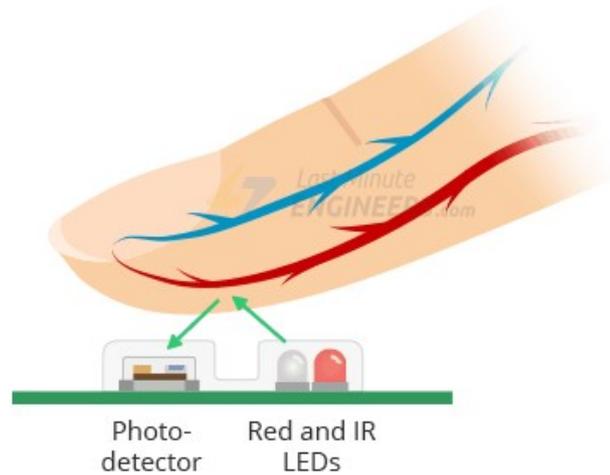
L'appareil en mode transmission a un côté émetteur et un côté récepteur. Les deux lumières vont traverser le doigt en passant notamment à travers la peau et les os car le doigt est irrigué en sang à chaque battement du cœur. De l'autre côté le récepteur (avec une photodiode) va capter et amplifier la transparence de la lumière ce qui va nous permettre de calculer le taux de saturation artérielle en oxygène :

$$SpO_2 = \frac{HbO_2}{(HbO_2 + Hb)}. [56]$$

#### 4.1.2 Oxymètre en réflexion

L'appareil lorsqu'il est en mode réflexion, son émetteur et son capteur se situent sur le même côté. Les lumières envoyées vont traverser le doigt comme pour l'appareil en

transmission mais vont être réceptionnées par le capteur du même côté. Le capteur (photo détecteur) va récupérer le flux lumineux reflété par le milieu traversé. Ce flux lumineux sera plus faible car il aura fait un aller-retour ainsi il aura subi une double absorption. Il faudra donc une amplification plus importante pour pouvoir exploiter le taux de saturation artérielle en oxygène.[54]



**Figure II.9 :** Oxymètre en réflexion.[57]

#### Avantage de l'oxymètre en réflexion :

La double absorption du flux lumineux permet d'améliorer la précision de la fréquence cardiaque, la lumière sera fortement absorbée par le sang et faiblement par les autres tissus ce qui va créer un contraste important. Il y a quelques avantages par rapport à l'oxymètre en transmission, en effet ce dernier dispose d'une résistance mécanique plus forte et également le fait qu'il est utilisable sur une surface de corps plus importante car une peau plus ou moins fine n'interfère pas dans l'utilisation de l'appareil à cause de son système qui repose sur le retour de la lumière rétrodiffusée à la surface de la peau.[54]

#### 4.1.3 La transparence

L'oxymètre est mis au niveau du bout du doigt pour des questions de transparence, en effet l'extrémité du doigt la peau est plus fine et ainsi nous obtenons un coefficient de saturation plus exploitable. Ce principe de transparence a été établi par la loi de Beer-Lambert.

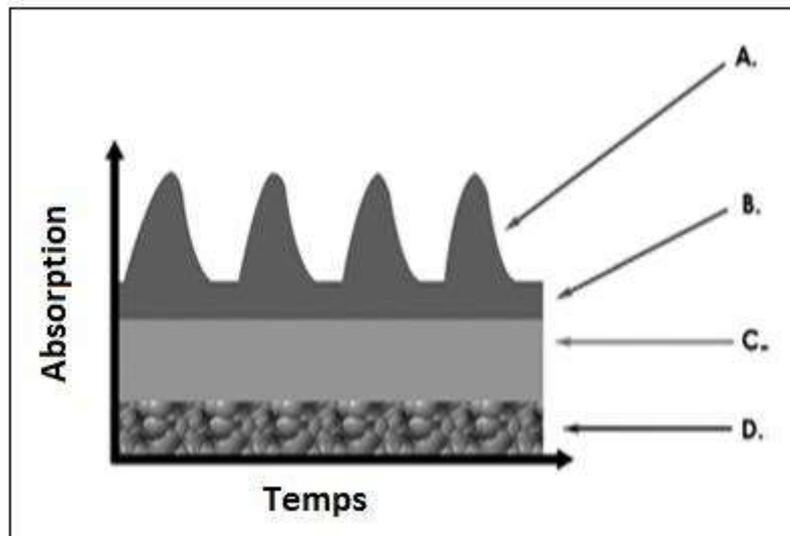
Cette transparence de lumière correspond à la lumière qui n'a pas été absorbée par le milieu traversé. Cette transparence nous donne des indications sur l'absorption des tissus et des os, du sang veineux ou encore sur l'absorption artérielle constante, cependant ici ce qui nous intéresse c'est la variation de l'absorption artérielle. Cette variation étant très faible, elle va être amplifiée.[54]

La quantité de lumière qui atteint le détecteur dépend de l'absorption des différents composants du tissu.

→ **Absorption des Tissus :**

- **Tissus et Os :** Ces composants du corps absorbent une certaine quantité de lumière, mais cette absorption est relativement constante et n'est pas influencée par les variations du pouls.
- **Sang Veineux :** Comme pour les tissus et les os, l'absorption par le sang veineux est également constante et ne varie pas avec chaque pulsation cardiaque.
- **Sang Artériel :** C'est ici que la variation intervient. Le volume de sang artériel change avec chaque pulsation cardiaque, entraînant une variation de l'absorption de la lumière.

*La variation de l'absorption de la lumière par le sang artériel* est ce qui nous intéresse pour mesurer la saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>). À chaque pulsation, il y a une augmentation temporaire du volume de sang artériel, ce qui entraîne une augmentation de l'absorption de la lumière.



**Figure II.10 :** Représentation simplifiée de l'absorption de la lumière :  
Pléthysmographie.[58]

- A :** Absorption lumineuse variable liée à la variation du volume de sang artériel.
- B :** Absorption lumineuse constante liée à la partie non pulsatile du sang artériel.
- C :** Absorption lumineuse constante liée au sang veineux.
- D :** Absorption lumineuse constante lié aux tissus, os...

#### 4.1.4 Amplification de la variation

Cette variation de l'absorption (la variation de l'absorption de la lumière par le sang artériel) est très faible par rapport à l'absorption totale par les tissus, les os et le sang veineux. Pour détecter et mesurer cette petite variation, l'oxymètre de pouls utilise des techniques d'amplification. Voici comment cela fonctionne :

- 1) Filtrage des Signaux : L'oxymètre filtre les signaux pour se concentrer sur les variations périodiques correspondant aux pulsations cardiaques, éliminant ainsi les composants constants de l'absorption (tissus, os, sang veineux).  
Les signaux électriques de la photodiode sont envoyés à un microcontrôleur.
- 2) Amplification : Le signal correspondant aux variations de l'absorption artérielle est amplifié pour le rendre suffisamment grand pour être mesuré avec précision.
  - a. Calcul des Ratios : L'oxymètre calcule ensuite les ratios entre les variations de la lumière rouge et infrarouge absorbée, ce qui est utilisé pour déterminer la saturation en oxygène du sang. Ce ratio est ensuite converti en une valeur de saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>) à l'aide d'une équation calibrée sur des modèles cliniques

Le SpO<sub>2</sub> obtenue à partir d'absorption lumineuse a la formule suivante :

$$SpO_2 = R = \frac{AC_{660}/DC_{660}}{AC_{960}/DC_{960}}$$

#### 4.1.5 Composantes AC et DC

Le signal photodétekté par la photodiode contient deux composantes :

- La composante continue (DC) qui correspond à l'absorption de la lumière par les tissus, le sang veineux et les pulsations veineuses. Cette composante est constante.
- La composante alternative (AC) qui correspond aux variations d'absorption dues aux pulsations artérielles. C'est cette composante qui varie en fonction de la saturation en oxygène du sang artériel.

L'oxymètre de pouls mesure le rapport des amplitudes des composantes AC aux deux longueurs d'onde. Ce rapport est directement lié à la saturation en oxygène du sang artériel (SpO<sub>2</sub>) selon la loi de Beer-Lambert.

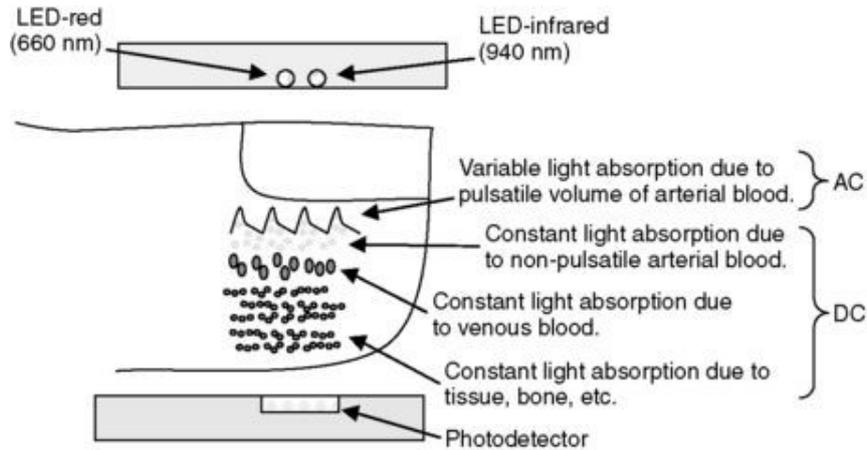


Figure II.11 : Composantes AC et DC de l'oxymétrie.

## 4.2 Loi physique de l'oxymètre de pouls : Loi de Beer-Lambert

Le concept de l'oxymètre de pouls repose sur la loi de Beer-Lambert, également connue sous le nom de loi de Beer ou loi de Bouguer. Cette loi stipule que la concentration d'un soluté dans un solvant peut être déterminée par l'absorption de la lumière. Beer et Lambert ont démontré que l'atténuation d'un faisceau lumineux permet de prédire la concentration d'un composé. [59]

Cette loi exprime la relation de proportionnalité existant entre l'absorbance  $A$  et les trois paramètres qui sont :

- L'absorptivité ( $\epsilon$  en  $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ ) de l'analyte absorbant la lumière.
- L'épaisseur de la cellule de mesure (cm)
- La concentration  $c$  ( $mol/L$ ) de l'analyte.

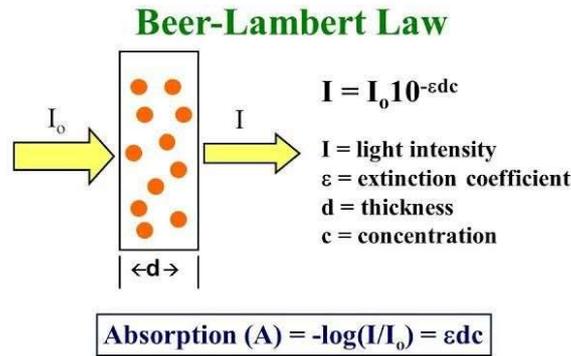
La forme mathématique sous laquelle est habituellement présentée cette loi.

$$A = \epsilon \ell c$$

- $A$  : l'absorbance ou densité optique à une longueur d'onde  $\lambda$  (sans unité).
- $\epsilon$  : le coefficient d'extinction molaire, exprimée en  $L \cdot mol^{-1} \cdot cm^{-1}$ .
- $\ell$  : la longueur du trajet optique dans la solution traversée, elle correspond à l'épaisseur de la cuvette utilisée (en cm).
- $c$  : la concentration molaire de la solution (en  $mol \cdot L^{-1}$ ).

La loi de Beer-Lambert décrit également la variation de l'intensité lumineuse en fonction de la distance parcourue dans un milieu transparent. Lorsqu'une lumière monochromatique d'intensité initiale  $I_0$  traverse un milieu homogène, l'intensité de la lumière émergente  $I$  diminue exponentiellement avec l'augmentation de l'épaisseur du milieu absorbant. [37]

$$I = I_0 e^{-\epsilon \ell c}$$



**Figure II.12 :** Loi de Beer-Lambert.

L'absorbance d'une lumière par une substance peut être donnée par le logarithme négatif du rapport de l'intensité de la lumière incidente et transmise  $I_0$  et  $I$  tel que :

$$A = -\log \frac{I_0}{I}$$

Chaque substance a un coefficient extinction (absorptivité) spécifique pour l'absorption de la lumière à une longueur d'onde spécifique.[60]

L'absorbance est parfois considérée comme la densité optique d'un milieu.

De cette relation on déduit la transmittance  $T$  qui définit comme le rapport de l'intensité de la lumière transmise  $I$  à l'intensité de la lumière incidente  $I_0$

$$T = \frac{I}{I_0} ; \log T = -A$$

- $T$  : la transmittance (sans unité)

**La transmission  $T$  :** est un concept clé en spectrophotométrie et dans le contexte de la loi de Beer-Lambert. Elle décrit la fraction de la lumière incidente qui passe à travers un échantillon sans être absorbée.

Dans le contexte de l'oxymètre de pouls, la transmittance est utilisée pour mesurer la quantité de lumière rouge et infrarouge qui traverse les tissus et le sang. En analysant les variations de la transmittance à ces deux longueurs d'onde, l'appareil peut déterminer les niveaux d'absorbance correspondants, puis calculer la saturation en oxygène ( $SpO_2$ ) en utilisant la loi de Beer-Lambert.

### 4.3 Taux de saturation d'oxygène

Les premiers oxymètres d'impulsions, qui ont été fabriqués au début des années 80, ont employé pour calculer les valeurs de l'équation empirique suivante [53] :

$$SpO_2 = 110 - 25R$$

Cette formule est une relation empirique utilisée pour convertir le rapport des absorbances ( $R$ ) en pourcentage de  $SpO_2$ . La formule  $SpO_2 = 110 - 25R$  est dérivée de l'analyse empirique des données cliniques et expérimentales. Les coefficients 110 et 25 ont été ajustés pour correspondre aux mesures de saturation en oxygène obtenues par des méthodes directes plus précises.

- $SpO_2$  : Saturation en oxygène, exprimée en pourcentage.
- Constante 110 : La valeur de 110 est un point de départ qui correspond à une saturation en oxygène idéale ou maximale observée.
- Terme  $-25R$  : Ce terme ajuste la saturation en oxygène en fonction du rapport des absorbances ( $R$ ). Chaque unité de  $R$  réduit la  $SpO_2$  de 25 unités de pourcentage.

$R$  : L'oxymètre calcule le rapport des absorbances  $R$  des deux longueurs d'onde.

$$R = \frac{A_{\text{rouge}}}{A_{\text{infrarouge}}}$$

Où  $A_{\text{rouge}}$  et  $A_{\text{infrarouge}}$  sont les absorbances de la lumière rouge et infrarouge, respectivement.

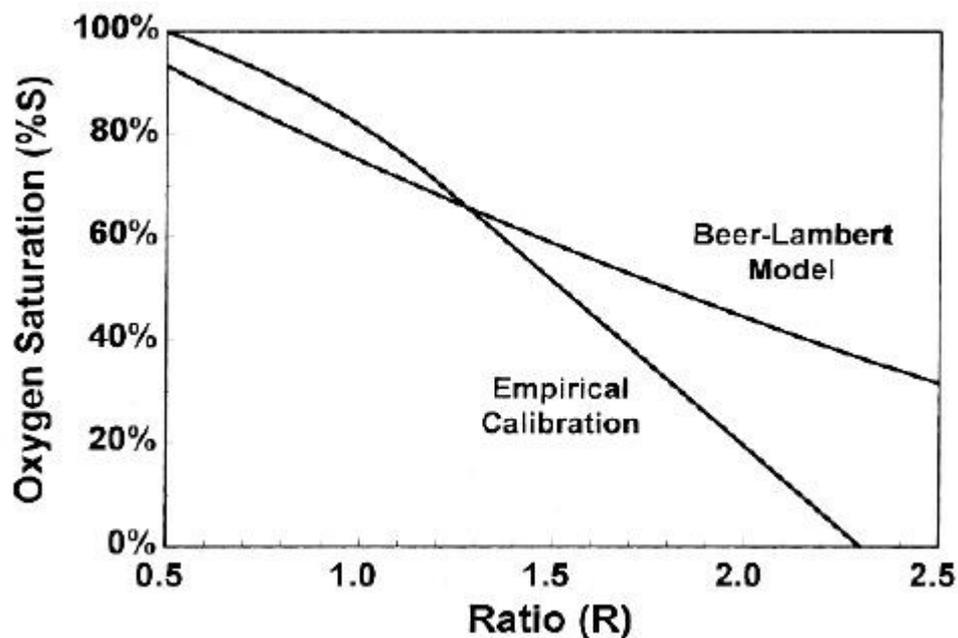


Figure II.13 : la relation entre le rapport  $R$  et la saturation en oxygène.[53]

#### 4.4 Fréquence cardiaque

En plus de mesurer la saturation en oxygène ( $SpO_2$ ), les oxymètres de pouls mesurent également la fréquence cardiaque (pouls). L'oxymètre de pouls utilise la photopléthysmographie pour détecter les variations du volume sanguin dans les tissus. Cette

technique repose sur la transmission et la réflexion de la lumière pour mesurer les changements dans la circulation sanguine. [54]

- 1) Les LED de l'oxymètre émettent des longueurs d'onde spécifiques de lumière rouge et infrarouge à travers la peau.
- 2) Variations de Volume Sanguin : Chaque battement cardiaque provoque une augmentation temporaire du volume sanguin dans les capillaires, ce qui modifie la quantité de lumière absorbée et réfléchiée par les tissus.
- 3) Des photodétecteurs situés de l'autre côté du capteur mesurent la lumière transmise ou réfléchiée. Les variations de lumière sont corrélées avec les pulsations du sang dans les vaisseaux sanguins.

### Calcul du Pouls

Les variations de la lumière absorbée, dues aux changements de volume sanguin causés par les battements cardiaques, sont converties en signaux électriques. Le dispositif analyse ces signaux pour calculer le nombre de battements par minute (BPM).

- 1) Conversion en Signaux Électriques : Les variations de lumière détectées sont transformées en signaux électriques.
- 2) Analyse des Signaux : Le dispositif analyse ces signaux pour identifier les pics correspondant aux battements cardiaques.
- 3) Calcul de la Fréquence Cardiaque : Le nombre de pics détectés sur une période donnée est utilisé pour calculer la fréquence cardiaque en BPM.

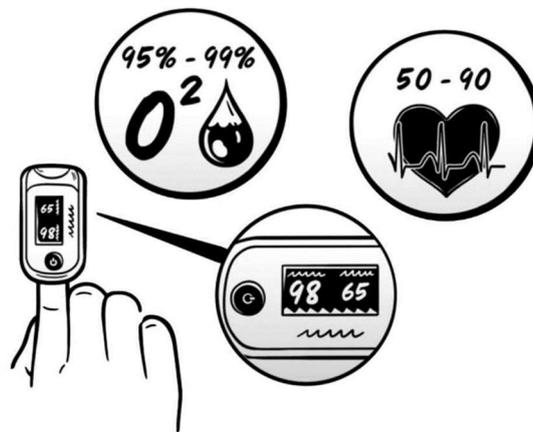
## 4.5 Affichage des Résultats

La valeur de SpO<sub>2</sub> est affichée sur l'écran de l'oxymètre, souvent accompagnée de la fréquence cardiaque. Les dispositifs modernes peuvent également transmettre ces données à des appareils mobiles via Bluetooth pour une surveillance continue et des analyses ultérieures.

**Écran de l'Oxymètre de Pouls :** Les oxymètres de pouls modernes utilisent des écrans LED ou OLED pour afficher les résultats de manière claire et lisible. Les informations principales affichées incluent :

- ✧ SpO<sub>2</sub> : La saturation en oxygène, généralement affichée en pourcentage.
- ✧ Pouls : La fréquence cardiaque, affichée en battements par minute (BPM).
- ✧ Courbe de Pléthysmographie : Une représentation graphique de l'onde de pouls, qui peut fournir des informations sur la forme d'onde du flux sanguin.

- 1) **Affichage de la SpO<sub>2</sub>** : La SpO<sub>2</sub> est affichée en pourcentage, par exemple, "98%". Certains oxymètres utilisent des codes couleurs pour indiquer les niveaux de SpO<sub>2</sub>.
- 2) **Affichage de la Fréquence Cardiaque** : La fréquence cardiaque est affichée en BPM, par exemple, "75 BPM". Certains oxymètres utilisent un symbole de cœur battant peut être affiché à côté de la valeur pour indiquer le pouls.
- 3) **Courbe de Pléthysmographie** : La courbe montre les variations de la lumière absorbée par le flux sanguin, correspondant aux battements cardiaques. La forme et la régularité de la courbe peuvent fournir des informations sur la qualité du signal et la circulation sanguine.



**Figure II.14** : Affichage des résultats d'un oxymètre de pouls.[61]

#### **Interprétation des Niveaux de SpO<sub>2</sub>** :

- 95%-100% : Saturation normale en oxygène.
- 90%-94% : Saturation en oxygène légèrement réduite ; peut nécessiter une évaluation supplémentaire.
- 85%-89% : Saturation en oxygène modérément réduite ; souvent associée à des troubles respiratoires ou cardiaques.
- <85% : Saturation en oxygène sévèrement réduite ; nécessite une attention médicale immédiate.[62]

#### **Interprétation de la fréquence cardiaques :**

- Fréquence Cardiaque Normale (60-100 BPM)
- Bradycardie (<60 BPM)
- Tachycardie (>100 BPM). [63]

## 4 Évaluation des performances des oxymètres disponibles sur le marché

### 4.1 Contexte du Marché

Le marché des oxymètres de pouls périphériques était évalué à 750 millions de dollars en 2022 et devrait croître à un taux de croissance annuel composé (TCAC) d'environ 6 % entre 2023 et 2030. Cette croissance est principalement influencée par plusieurs facteurs :

- 1) **Prévalence des Maladies Respiratoires** : La prévalence croissante de maladies respiratoires telles que la maladie pulmonaire obstructive chronique (MPOC) et l'apnée du sommeil joue un rôle crucial. Selon les données du NIH, l'incidence mondiale estimée de la pneumonie communautaire varie entre 1,5 et 14 cas pour 1000 personnes.
- 2) **Progrès Technologiques** : Les avancées technologiques ont conduit au développement d'oxymètres de pouls portables et plus efficaces. Ces améliorations ont augmenté leur adoption, en particulier dans les soins de santé à domicile, où la surveillance continue est essentielle.

### 4.2 Critères d'Évaluation des Oxymètres

Pour évaluer les performances des oxymètres disponibles sur le marché, nous nous baserons sur plusieurs critères :

- ❖ **Précision des Mesures de SpO<sub>2</sub> et de Fréquence Cardiaque** : Évaluation de l'exactitude des mesures par rapport aux étalons de référence.
- ❖ **Fiabilité et Consistance** : Test des performances dans des conditions variées (différentes températures, niveaux de mouvement, etc.).
- ❖ **Facilité d'Utilisation** : Ergonomie, interface utilisateur, facilité de mise en place et d'interprétation des résultats.
- ❖ **Durée de Vie de la Batterie** : Autonomie pour les modèles portables.
- ❖ **Compatibilité et Adaptabilité** : Performance avec différents types de peau, conditions médicales et populations d'âge varié.
- ❖ **Coût et Rapport Qualité-Prix** : Analyse des coûts par rapport aux fonctionnalités et aux performances.

### 4.3 Sélection et Méthodologie

**Sélection des Oxymètres :**

- ✓ Des oxymètres de différentes gammes de prix et de différents fabricants (ex. : Masimo, Nonin, Contec, etc.).
- ✓ Des modèles utilisés en milieu clinique et domestique.

**Méthodologie :**

- ✧ Collecte de Données : Réalisation de tests en laboratoire et en conditions réelles sur des volontaires en bonne santé et des patients atteints de maladies respiratoires.
- ✧ Analyse des Performances : Comparaison des résultats avec les étalons de référence et analyse statistique des écarts.
- ✧ Évaluation de l'Ergonomie : Tests d'utilisation par des utilisateurs non professionnels et des professionnels de santé.
- ✧ Test de Durée de Vie de la Batterie : Mesure de l'autonomie en utilisation continue et intermittente.
- ✧ Compatibilité : Tests sur des groupes divers (âges, types de peau, etc.).

**4.4 Résultats et Analyse**

Les résultats seront compilés pour chaque critère d'évaluation et analysés pour identifier les points forts et les faiblesses de chaque modèle. Par exemple :

**Masimo Radical-7 :**

- ✓ Précision : Très haute précision avec une erreur marginale par rapport aux étalons cliniques.
- ✓ Fiabilité : Performances stables dans des conditions variées.
- ✓ Ergonomie : Interface intuitive, mais complexité accrue pour les utilisateurs non formés.
- ✓ Durée de Vie de la Batterie : Autonomie modérée, adaptée à un usage clinique.
- ✓ Compatibilité : Excellente compatibilité avec différents types de peau et conditions médicales.
- ✓ Coût : Plus élevé, mais justifié par les performances et les fonctionnalités avancées.



**Figure II.15 :** Masimo Radical-7® Pulse CO-Oximometer®.[64]

**Nonin 9590 Onyx Vantage :**

- ✓ Précision : Bonne précision, légère variation dans des conditions extrêmes.
- ✓ Fiabilité : Très fiable, résistant aux mouvements et aux interférences.
- ✓ Ergonomie : Très facile à utiliser, adapté aux utilisateurs domestiques.
- ✓ Durée de Vie de la Batterie : Longue autonomie, excellent pour un usage domestique.
- ✓ Compatibilité : Bonne compatibilité, quelques limitations sur les peaux très foncées.
- ✓ Coût : Moyen, excellent rapport qualité-prix pour les soins à domicile.



Figure II.16 : Oximetro de Pulso NONIN. Onyx Vantage 9590.[65]

#### 4.5 Recommandations

- 1) **Choix Clinique** : Pour un usage clinique, privilégiez des modèles haut de gamme comme le Masimo Radical-7, offrant une précision et une compatibilité exceptionnelles.
- 2) **Usage Domestique** : Pour les soins à domicile, des modèles comme le Nonin 9590 Onyx Vantage offrent une excellente fiabilité et facilité d'utilisation à un coût modéré.
- 3) **Innovation et Adoption** : Encouragez l'adoption des modèles innovants portables et sans contact pour une surveillance continue et non invasive.

### Conclusion

Les oxymètres de pouls représentent une avancée technologique majeure dans le domaine de la santé, offrant des moyens simples et efficaces pour surveiller des paramètres vitaux critiques. Leur importance dans la prévention, le suivi et le traitement des maladies respiratoires et cardiovasculaires ne peut être sous-estimée. Grâce à l'innovation continue dans les méthodes de réalisation et les principes de fonctionnement, ainsi qu'à une évaluation rigoureuse des performances, les oxymètres de pouls continuent de sauver des vies et d'améliorer la qualité des soins médicaux dans le monde entier.

***Chapitre III :***  
***Conception et***  
***développement du dispositif***  
***d'oxymétrie intelligent***

## Introduction

La conception d'un dispositif d'oxymétrie intelligent représente un défi technique et une opportunité d'innovation dans le domaine des dispositifs médicaux portables. Ce projet vise à développer un appareil capable de mesurer la saturation en oxygène du sang (SpO<sub>2</sub>) et la fréquence cardiaque de manière précise et fiable, tout en intégrant une fonctionnalité de reconnaissance d'empreintes digitales pour sécuriser l'accès aux données et personnaliser l'expérience utilisateur.

Les oxymètres de pouls sont largement utilisés dans divers environnements, y compris les hôpitaux, les cliniques, et même à domicile, pour surveiller les paramètres vitaux des patients. La saturation en oxygène et la fréquence cardiaque sont des indicateurs cruciaux de l'état de santé d'une personne, et leur surveillance continue peut aider à détecter rapidement les problèmes de santé potentiels.

Ce projet tire parti des avancées technologiques récentes en matière de capteurs optiques, de microcontrôleurs et de dispositifs d'affichage pour offrir une solution compacte, portable et facile à utiliser. En ajoutant une couche de sécurité biométrique via un capteur d'empreintes digitales, le dispositif garantit que seules les personnes autorisées peuvent accéder aux données sensibles, ce qui est essentiel pour protéger la confidentialité des utilisateurs.

## 1 Spécifications du dispositif d'oxymètre intelligent

Pour assurer une conception efficace et fonctionnelle, les spécifications techniques du dispositif d'oxymétrie intelligent doivent être clairement définies.

### 1) Mesure de la saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>)

<b>Plage de mesure</b>	70% à 100% (conforme aux normes ISO 80601-2-59:2017 et IEC 60601-2-61:2020).[66]
<b>Précision</b>	±2% pour des valeurs entre 80% et 100%
	±3% pour des valeurs entre 70% et 80%
<b>Technologie de mesure</b>	Photopléthysmographie (PPG) en utilisant des LED rouge et infrarouge
<b>Algorithme de calcul</b>	SpO <sub>2</sub> dérivé de la forme d'onde PPG, validé cliniquement

**Tableau.III.1** : Mesure de la saturation en oxygène

### 2) Mesure du pouls :

<b>Plage de mesure</b>	30 à 250 bpm
<b>Précision</b>	±2 bpm ou ±2%

**Tableau III.2 : Mesure de pouls**

**3) Reconnaissance d’empreinte digitale :**

<b>Capteur d’empreinte</b>	Capacitif, avec une précision de correspondance de 99% (certifié ISO/IEC 27001 : 2013).[67]
<b>Temps de reconnaissance</b>	<1 seconde

**Tableau III.3 : Reconnaissance d’empreinte digitale**

**4) Connectivité :**

- Bluetooth Low Energy (BLE) v5.0 ou ultérieur :
  - Pour la transmission des données vers des appareils mobiles (iOS et Android)
  - Portée de communication jusqu’à 10 mètres
  - Protocoles de sécurité Bluetooth pour protéger les données
- USB Type-C :
  - Pour la recharge de la batterie
  - Pour la synchronisation des données avec un ordinateur

**5) Autonomie de la batterie :**

<b>Durée de fonctionnement</b>	Jusqu’à 24 heures en usage continu
<b>Temps de recharge</b>	2 heures maximum
<b>Type de batterie</b>	Batterie lithium-ion rechargeable

**Tableau III.4 : Autonomie de la batterie d’oxymètre**

**6) Affichage :**

<b>Écran OLED</b>	Taille : 1.3 pouces
	Résolution : 128 x 64 pixels
	Bonne lisibilité dans des conditions d’éclairage variées
<b>Affichage des informations</b>	SpO2 en grand format
	Pouls
	Courbe pléthysmographique
	Niveau de batterie
	Indicateur de connexion Bluetooth

<b>Personnalisation</b>	Possibilité de personnaliser l'affichage (taille des caractères, couleurs, etc.)
-------------------------	--

**Tableau III.5 :** Affichage des résultats d'oxymètre

**7) Stockage des données :**

<b>Mémoire interne</b>	4 Mo pour stocker jusqu'à 30 jours de données
<b>Sécurité des données</b>	Cryptage des données pour garantir la confidentialité et la sécurité
<b>Intégration avec des applications mobiles</b>	Visualisation de l'historique des données et des tendances
	Analyse des données et suivi de l'évolution de la SpO2
	Partage des données avec des professionnels de santé (avec le consentement de l'utilisateur)

**Tableau III.6 :** Stockage des données de dispositif d'oxymètre

**8) Conception et ergonomie :**

❖ Compact et portable :

- Dimensions : Environ 60 x 40 x 18 mm
- Poids : Moins de 40 grammes
- Clip pour doigt confortable
- Design ergonomique
- Matériaux durables : Polycarbonate résistant aux chocs

❖ Résistance aux environnements :

- Étanchéité à l'eau et à la poussière : IP67
- Résistance aux chocs et vibrations
- Protection contre les décharges électrostatiques (ESD)

## 2 Choix des composants électroniques et matériels

### 2.1 LED Rouge

Les LED rouges sont des dispositifs semi-conducteurs qui convertissent l'électricité directement en lumière rouge visible. Elles sont généralement construites à partir de matériaux semi-conducteurs tels que le phosphore d'indium-gallium (InGaP) ou l'arséniure de gallium

(GaAs), dopés pour émettre des photons dans la gamme du spectre visible, typiquement entre 620 nm et 750 nm.



Figure III.1 : Photo du LED rouge.[49]

**Fonctionnement :**

Lorsqu'un courant électrique traverse une LED rouge, il excite les électrons dans le matériau semi-conducteur. Ces électrons sautent vers un niveau d'énergie plus élevé, puis redescendent vers leur état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de photons, ou particules de lumière. La longueur d'onde de ces photons correspond à la lumière rouge visible.

La LED rouge est utilisée pour mesurer l'absorption de la lumière par l'hémoglobine oxygénée (oxyhémoglobine, HbO<sub>2</sub>) et désoxygénée (hémoglobine désoxygénée, Hb). L'oxyhémoglobine absorbe moins la lumière rouge que l'hémoglobine désoxygénée, permettant ainsi de déterminer la proportion d'hémoglobine oxygénée par rapport à l'hémoglobine totale.

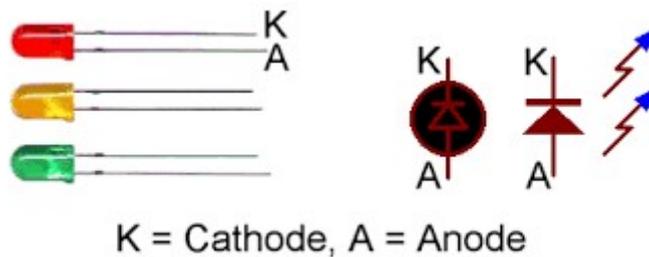


Figure III.2 : Electronique théorie du LED

**Caractéristiques :**

<b>Longueur d'onde</b>	620 à 750 nm
<b>Couleur</b>	Rouge visible
<b>Tension de fonctionnement</b>	1,8 à 2,2 volts
<b>Courant</b>	10 à 20 milliampères
<b>Efficacité énergétique</b>	Élevée

Durée de vie	Longue
--------------	--------

Tableau III.7 : Les caractéristiques de la LED rouge

## 2.2 LED infrarouge

Une LED infrarouge (IR), aussi appelée diode électroluminescente infrarouge, est un composant électronique semi-conducteur qui émet de la lumière à une longueur d'onde invisible à l'œil humain. Cette longueur d'onde se situe généralement entre 700 nanomètres (nm) et 1 millimètre (1000 nm), ce qui correspond à la région infrarouge du spectre électromagnétique.



Figure III.3 : LED infrarouge « émetteur ».[68]

### Fonctionnement :

Le fonctionnement d'une LED infrarouge est similaire à celui d'une LED rouge. La différence réside dans le matériau semi-conducteur utilisé, qui est conçu pour produire des photons d'une longueur d'onde plus longue, dans la région infrarouge du spectre.

La LED infrarouge est également utilisée pour mesurer l'absorption de la lumière par l'hémoglobine oxygénée et désoxygénée.

Contrairement à la lumière rouge, l'oxyhémoglobine absorbe plus la lumière infrarouge que l'hémoglobine désoxygénée.

### Caractéristiques :

<b>Longueur d'onde</b>	700 à 1000 nm
<b>Couleur</b>	Invisible à l'œil humain
<b>Tension de fonctionnement</b>	1,2 à 1,8 volts
<b>Courant</b>	10 à 20 milliampères
<b>Efficacité énergétique</b>	Élevée

Durée de vie	Longue
--------------	--------

Tableau III.8 : les caractéristiques du LED infrarouge



Figure III.4 : La placement du LED rouge et infra rouge dans l'oxymètre

❖ Les résistances

Les résistances sont des composants électroniques conçus pour introduire une résistance électrique déterminée dans un circuit. Elles limitent le courant qui passe à travers les autres composants du circuit, protégeant ainsi les composants sensibles comme les LEDs et les capteurs contre les courants excessifs qui pourraient les endommager. Leur résistance est mesurée en ohms ( $\Omega$ ).



Figure III.5 : Résistance 220 Ohms.[69]

### 2.3 Capteur TSL235R

Le TSL235R est un capteur de lumière à haute sensibilité qui convertit l'intensité lumineuse en un signal de fréquence.

Le TSL235R fonctionne en convertissant la lumière incidente en un courant électrique proportionnel à l'intensité lumineuse. Ce courant peut ensuite être mesuré et converti en une valeur numérique représentant la luminosité ambiante. Le capteur utilise une photodiode poly

silicium pour détecter la lumière et un circuit intégré pour amplifier et conditionner le signal.[70]



Figure III.6 : Capteur TSL235R.[70]

**Caractéristiques principales :**

<b>Type</b>	Convertisseur lumière-fréquence
<b>Plage de détection</b>	320 nm à 1050 nm (couvrant le spectre visible et proche infrarouge)
<b>Sortie</b>	Signal carré dont la fréquence est proportionnelle à l'intensité lumineuse
<b>Alimentation</b>	2.7V à 5.5V
<b>Temps de réponse rapide</b>	Typiquement 10 $\mu$ s

Tableau III.9 : les caractéristiques principales du capteur TSL235R.

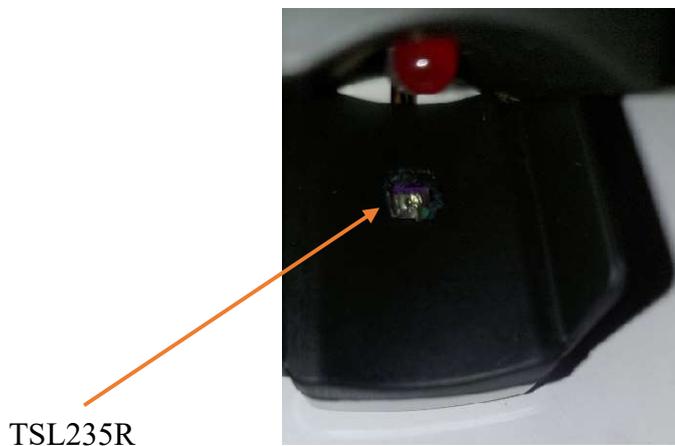


Figure III.7 : Placement du capteur TSL235R à l'oxymètre

## 2.4 Le capuchon

Le capuchon est un accessoire qui permet de protéger et de maintenir les connexions entre les fils et les composants de l'oxymètre.

Le capuchon joue un rôle essentiel dans le bon fonctionnement du capteur optique pour mesurer la saturation en oxygène du sang (SpO<sub>2</sub>). Voici son rôle :

### ❖ Créer un environnement sombre

Lorsque le doigt est inséré dans le capuchon, celui-ci crée un environnement sombre autour du doigt. Cela permet de limiter les interférences de la lumière ambiante qui pourrait perturber les mesures du capteur optique.

### ❖ Améliorer la détection de la lumière transmise :

Dans cet environnement sombre, le capteur optique peut détecter plus précisément la lumière rouge et infrarouge qui est transmise à travers le tissu du doigt. Cette lumière transmise est directement liée à la concentration en oxyhémoglobine (HbO<sub>2</sub>) et désoxyhémoglobine (Hb) dans le sang.

### ❖ Stabiliser la position du doigt

Le capuchon maintient le doigt dans une position stable, ce qui réduit les mouvements et les artefacts qui pourraient affecter la qualité du signal de photopléthysmographie (PPG) utilisé pour calculer la SpO<sub>2</sub>.



Figure III.8 : Le capuchon

## 2.5 Un écran OLED 0.96" (SSD 1315)

Un écran OLED (Organic Light Emitting Diode) de 0,96 pouce avec une résolution de 128x64 pixels est un petit module d'affichage utilisé dans divers projets électroniques et dispositifs intelligents. Grâce à la technologie OLED, chaque pixel de l'écran s'illumine indépendamment, offrant ainsi un contraste élevé et une image nette.

On utilise l'écran OLED pour afficher les résultats de la saturation d'oxygène et la fréquence cardiaque.

**Caractéristiques :**

<b>Dimensions</b>	Taille de l'écran : 0.96 pouces en diagonale.
	Résolution : 128 x 64 pixels.
<b>Interfaces de Communication</b>	<b>I2C</b> : Cet écran utilise une interface I2C pour la communication avec le microcontrôleur.
	<b>Les broches visibles sont</b> : GND (Ground), VCC (Alimentation), SCL (Horloge I2C), SDA (Données I2C).
<b>Caractéristiques Électriques</b>	<b>Tension de fonctionnement</b> : 3.3V à 5V, compatible avec la plupart des microcontrôleurs.
	<b>Consommation d'énergie</b> : Faible consommation d'énergie grâce à la technologie OLED.
<b>Compatibilité</b>	Compatible avec divers microcontrôleurs comme Arduino, Raspberry Pi, ESP8266, etc.

**Tableau III.10** : Les caractéristiques d'un écran OLED de 0.96 pouce

**Fonctionnement :**

❖ **Principe de Base :**

- Les écrans OLED sont composés de diodes électroluminescentes organiques qui émettent de la lumière lorsqu'un courant électrique passe à travers elles.
- Chaque pixel de l'écran OLED est constitué de petites sous-diodes organiques qui produisent de la lumière lorsqu'elles sont activées par le courant électrique.

❖ **Contrôle des Pixels :**

- Le contrôleur SSD1315 pilote chaque pixel de l'écran en envoyant les signaux nécessaires pour activer les diodes électroluminescentes.
- Le SSD1315 reçoit les données d'affichage via les interfaces I2C et les traduit en commandes électriques pour chaque pixel.

❖ **Affichage des Images :**

- Les données d'affichage (images, texte, graphiques) sont envoyées au SSD1315 par un microcontrôleur.

- Le contrôleur organise ces données et active les pixels correspondants pour former l'image sur l'écran OLED.
- ✧ **Consommation d'Énergie :**
- Les écrans OLED sont très efficaces en énergie car seuls les pixels activés consomment de l'énergie.
- Les pixels noirs (éteints) ne consomment pratiquement pas d'énergie, ce qui permet une économie d'énergie significative par rapport aux écrans LCD traditionnels.
- ✧ **Flexibilité et Interface :**
- Les écrans OLED avec SSD1315 sont très flexibles en termes d'interfaçage avec différents microcontrôleurs, y compris les cartes Arduino, Raspberry Pi, et autres plateformes de développement.

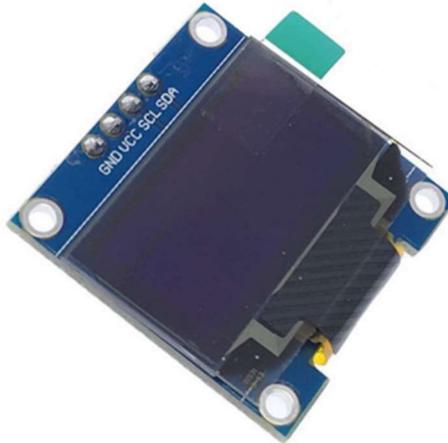


Figure III.9 : Afficheur OLED 0.96 I2C.[71]

## 2.6 Capteur d’empreinte digitale GT511C3

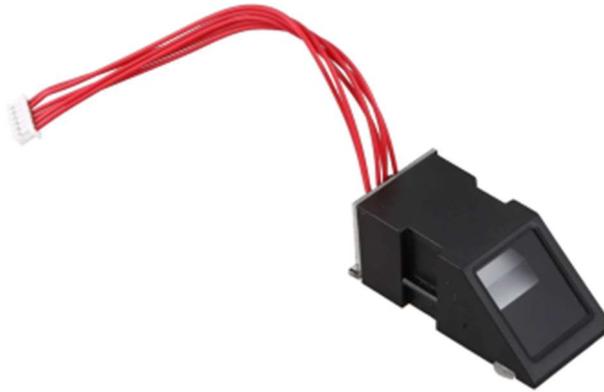
Le capteur d’empreinte digitale GT511C3 est un module biométrique conçu pour capturer, enregistrer et identifier des empreintes digitales. Il est largement utilisé dans les systèmes de sécurité et les dispositifs nécessitant une authentification par empreinte digitale.

### ✧ Caractéristiques

<b>Dimensions</b>	Environ 28 mm x 20 mm x 52 mm
<b>Capacité de Stockage</b>	Peut stocker jusqu'à 200 empreintes digitales
<b>Résolution</b>	450 dpi (dots per inch)
<b>Temps de Reconnaissance</b>	Moins d'une seconde
<b>Interfaces de Communication</b>	UART (interface série).

	Baud rate configurable : 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 bps.
<b>Alimentation</b>	Tension de fonctionnement : 3.3V à 6V
	Consommation : Environ 60 mA en fonctionnement.
<b>Autres Caractéristiques</b>	LED indicatrice pour l'état de l'appareil (capturant, en attente, etc.)
	LED indicatrice pour l'état de l'appareil (capturant, en attente, etc.)

**Tableau III.11** : Les caractéristiques du capteur d’empreinte digitale GT511C3.[72]



**Figure III.10** : Capteur d’empreinte digitale GT511C3

**Fonctionnement :**

**1) Connexion :**

**Broches :**

- VCC : Alimentation (3.3V à 6V).
- GND : Masse.
- TX : Transmission des données.
- RX : Réception des données.



Figure III.11 : Les boches du capteur d'empreinte digitale GT511C3.[73]

**2) Processus de Capture et d'Enregistrement :**

- a. **Capture** : L'utilisateur place son doigt sur le capteur. Le module capture l'image de l'empreinte digitale.
- b. **Traitement** : Le module traite l'image pour extraire les caractéristiques uniques de l'empreinte.
- c. **Enregistrement** : Les données extraites sont enregistrées dans la mémoire du module pour une utilisation ultérieure.

**3) Vérification et Identification :**

- a. **Vérification** : L'utilisateur place son doigt sur le capteur, et le module compare l'empreinte capturée avec une empreinte spécifique dans la mémoire.
- b. **Identification** : Le module compare l'empreinte capturée avec toutes les empreintes stockées pour trouver une correspondance.

**3 Présentation de la carte Seeduino FEMTO M0+ et de ses fonctionnalités**

La carte Seeduino FEMTO M0+ est une carte de développement basée sur le microcontrôleur ATSAM21, qui est un microcontrôleur ARM Cortex-M0+ de SAMD21G18 fonctionnant à 48MHz avec 256Ko de flash et 32Ko de RAM [74]. Cette carte est conçue pour des projets de petite taille nécessitant une puissance de traitement suffisante tout en étant très compacte.

**3.1 Caractéristiques principales**

<b>Microcontrôleur</b>	ATSAMD21G18A ARM Cortex-M0+
<b>Fréquence</b>	48 MHz

<b>Mémoire flash</b>	256 KB de mémoire Flash permettent de stocker le programme et les données d'étalonnage.
<b>RAM</b>	32 KB de SRAM sont suffisantes pour les variables et les tampons de données en cours de traitement.
<b>Alimentation</b>	Alimentation USB et possibilité de fonctionnement à partir d'une source de 3,3V et facilite l'intégration avec divers composants et permet une gestion efficace de l'énergie.
<b>Ports de communication</b>	1 port USB (supporte la programmation et la communication série) I2C, SPI, UART (série)
<b>Entrées/Sorties</b>	11 broches numériques et 11 analogiques offrent une flexibilité pour connecter les différents composants (LEDs, photodétecteur, écran OLED, lecteur d'empreintes).
<b>Interfaces de communication</b>	I2C peut être utilisé pour l'écran OLED. SPI pourrait servir pour une éventuelle extension mémoire externe si nécessaire. UART peut être utilisé pour le débogage ou la communication avec le lecteur d'empreintes digitales.
<b>QTouch</b>	Les 7 broches compatibles QTouch pourraient être utilisées pour implémenter des contrôles tactiles si souhaité.
<b>Dimensions</b>	Ses dimensions compactes (21×17.5×3.5mm) sont idéales pour un dispositif portable.
<b>CPU</b>	Le processeur ARM Cortex-M0+ cadencé à 48 MHz offre une puissance de calcul suffisante pour traiter en temps réel les

	signaux des capteurs et effectuer les calculs nécessaires pour la SpO2 et le pouls.
<b>Interface Type-C</b>	Pratique pour le rechargement et le transfert de données.

**Tableau III.12 :** Les caractéristiques principales du carte seeeduino.[75]

### 3.2 Fonctions et connecteurs :

#### 1. Pins numériques et analogiques :

- La carte dispose de plusieurs pins GPIO (General Purpose Input/Output) « 14 pins » qui peuvent être configurés comme entrées ou sorties numériques.
- Elle dispose également de pins analogiques pour la lecture de signaux analogiques.



**Figure III.12 :** Carte Seeduino Femto M0+.[76]

#### 2. Interface de programmation et de débogage :

- La carte peut être programmée via le port USB en utilisant des environnements de développement comme l'Arduino IDE.
- Elle supporte également les protocoles de débogage via des interfaces telles que SWD (Serial Wire Debug).

#### 3. Connectivité :

- La carte supporte des protocoles de communication standard comme I2C, SPI, et UART, facilitant l'interfaçage avec divers capteurs et modules.

4. **Taille compacte :**

- La Seeeduino Femto M0+ est extrêmement petite, ce qui la rend idéale pour des projets où l'espace est une contrainte.

5. **Bibliothèques et support logiciel :**

- Compatible avec Arduino IDE, ce qui permet d'utiliser une vaste bibliothèque de codes et d'exemples pour divers projets.
- Supporte également les plateformes de développement comme CircuitPython, facilitant le prototypage rapide et le développement.

### 3.3 Description des broches de la carte

Explication détaillée des assignations des broches et de leurs fonctionnalités sur la carte Seeeduino Femto M0+ :

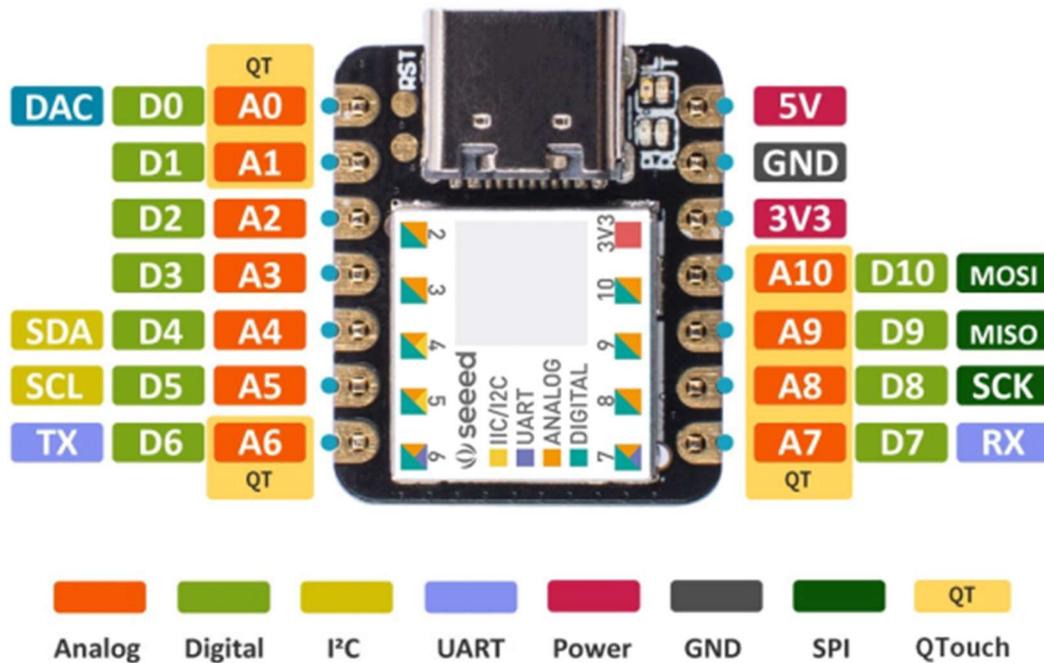


Figure III.13 : Les broches de la carte Seeeduino.[77]

**1) Côté gauche (de haut en bas) :**

1. **DAC** - Sortie Convertisseur Numérique-Analogique (A0)
2. **D0** - Entrée/Sortie Numérique (A0)
3. **D1** - Entrée/Sortie Numérique (A1)
4. **D2** - Entrée/Sortie Numérique (A2)
5. **D3** - Entrée/Sortie Numérique (A3)
6. **SDA** - Données I2C (D4)
7. **SCL** - Horloge I2C (D5)
8. **TX** - Transmission UART (D6)

**2) Côté droit (de haut en bas) :**

1. **5V** - Alimentation 5 Volts
2. **GND** - Masse (Ground)
3. **3V3** - Alimentation 3.3 Volts
4. **A10** - Entrée/Sortie Analogique
5. **A9** - Entrée/Sortie Analogique
6. **A8** - Entrée/Sortie Analogique
7. **A7** - Entrée/Sortie Analogique
8. **D10** - Entrée/Sortie Numérique (MOSI)
9. **D9** - Entrée/Sortie Numérique (MISO)
10. **D8** - Entrée/Sortie Numérique (SCK)

**3) Groupes fonctionnels :**

<b>Broches Analogiques (Orange)</b>	A0, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8, A9, A10
<b>Broches Numériques (Vertes)</b>	D0, D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7, D8, D9, D10
<b>Interface I2C (Jaune-Vert)</b>	SDA (D4) SCL (D5)
<b>Interface UART (Bleu)</b>	TX (D6) RX (D7)

<b>Alimentation (Rouge et Gris)</b>	5V  3V3  GND
<b>Interface SPI (Vert Foncé)</b>	MOSI (D10)  MISO (D9)  SCK (D8)
<b>QTouch (Jaune)</b>	QT (Broches tactiles)  7 (A0, A1, A6, A7, A8, A9, A10)

**Tableau III.13 :** Broches du carte Seeeduino « groupes fonctionnels »[77]

**4) Fonctionnalités supplémentaires :**

- **Indicateurs LED :**
  - LED Utilisateur
  - LED d'Alimentation
  - Deux LED pour le téléchargement par port série
- **Boutons de Réinitialisation :**
  - Deux boutons pour réinitialiser la carte

**Autres fonctionnalités :**

- Alimentation et téléchargement via USB Type-C
- Pads d'alimentation à l'arrière pour supporter une batterie
- LED utilisateur supplémentaire pour une meilleure expérience de codage
- Oscillateur de 32,768 kHz pour une meilleure précision de l'horloge

**4 Assemblage des composants et circuits nécessaires**

Voici comment les composants peuvent être connectés :

- **LED rouge : (fil vert)**
  - Anode (+) connectée à une résistance (220Ω) puis à la broche numérique (pin 3) du Seeeduino.

- Cathode (-) connectée à la masse (GND).
- **LED infrarouge : (fil rouge)**
  - Anode (+) connectée à une résistance (220 $\Omega$ ) puis à la broche numérique (pin 2) du Seeeduino.
  - Cathode (-) connectée à la masse (GND).

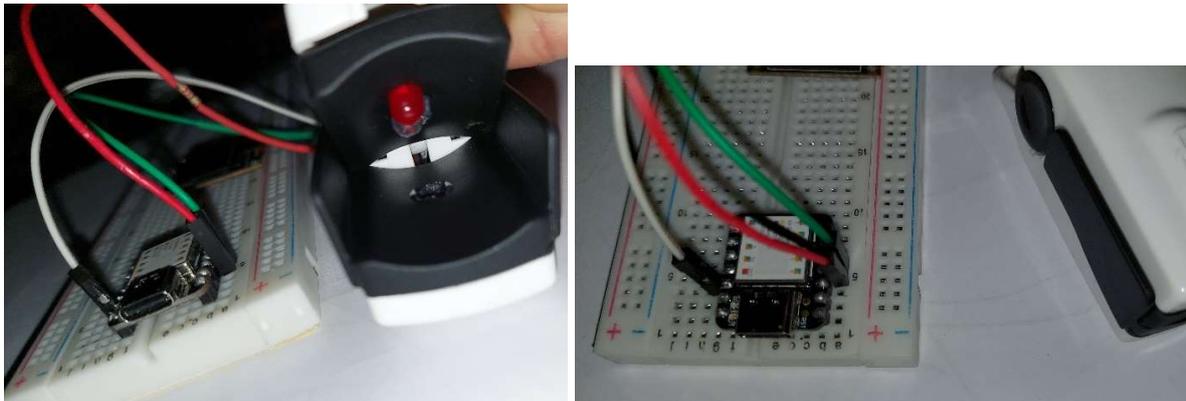


Figure III.14 : Assemblage des LED rouge et infrarouge

- **Photodétecteur TSL235R :**
  - Le photodétecteur est placé de manière à capter la lumière provenant des LED à travers le tissu.
  - Connecter VCC (fil bleu) à 3.3V sur la Seeeduino.
  - Connecter GND (fil noir) à GND sur la Seeeduino.
  - Connecter la sortie (fil marron) à une broche analogique (A0) de la Seeeduino pour lecture et traitement des signaux.

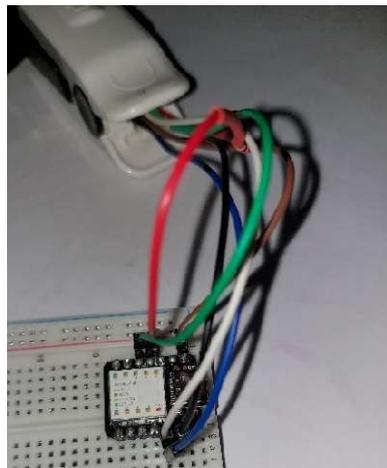


Figure III.15 : Assemblage du photodétecteur TSL235R avec la carte

- **Connexion de la Seeeduino XIAO :**

Connecter le câble USB pour la programmation.

- **Capteur d'empreinte digitale GT511C3 :**

- Connecter VCC « 3.3V » à 3.3V sur la Seeduino.
- Connecter GND à GND sur la Seeduino.
- Connecter RX du GT511C3 à TX de la Seeduino.
- Connecter TX du GT511C3 à RX de la Seeduino.

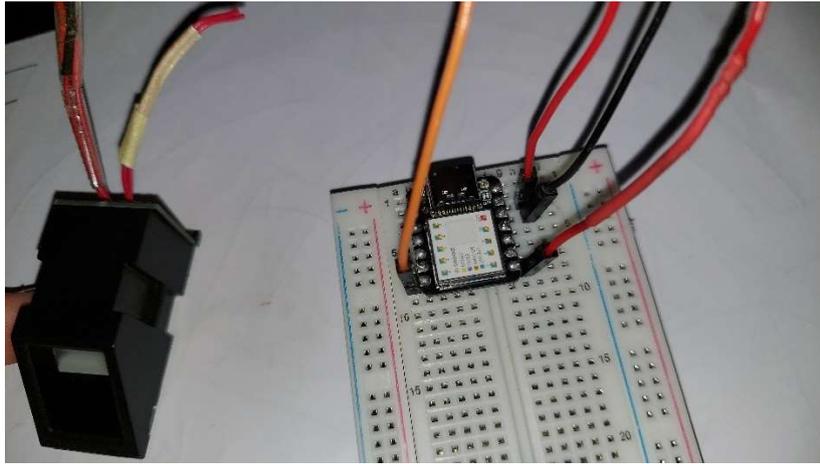


Figure III.16 : Assemblage de capteur d'empreinte digitale GT511C3 avec la Seeduino

- **Écran OLED 0.96" (SSD1315) :**

- Connecter VCC à 3.3V sur la carte Seeduino.
- Connecter GND à GND sur la carte Seeduino.
- Connecter SCL à SCL (broche D4 sur Seeduino).
- Connecter SDA à SDA (broche D5 sur Seeduino).

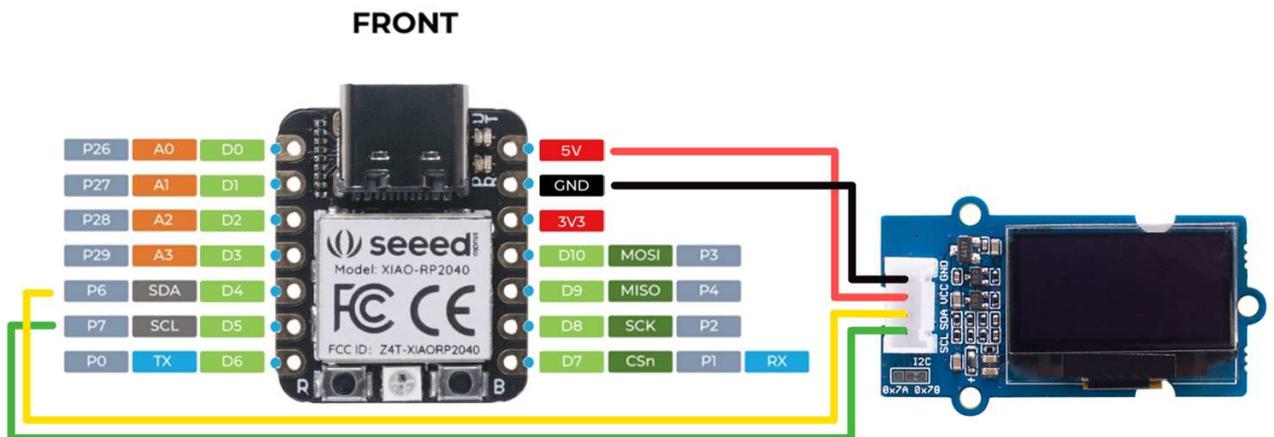


Figure III.17 : L'écran OLED relié à la carte Seeduino

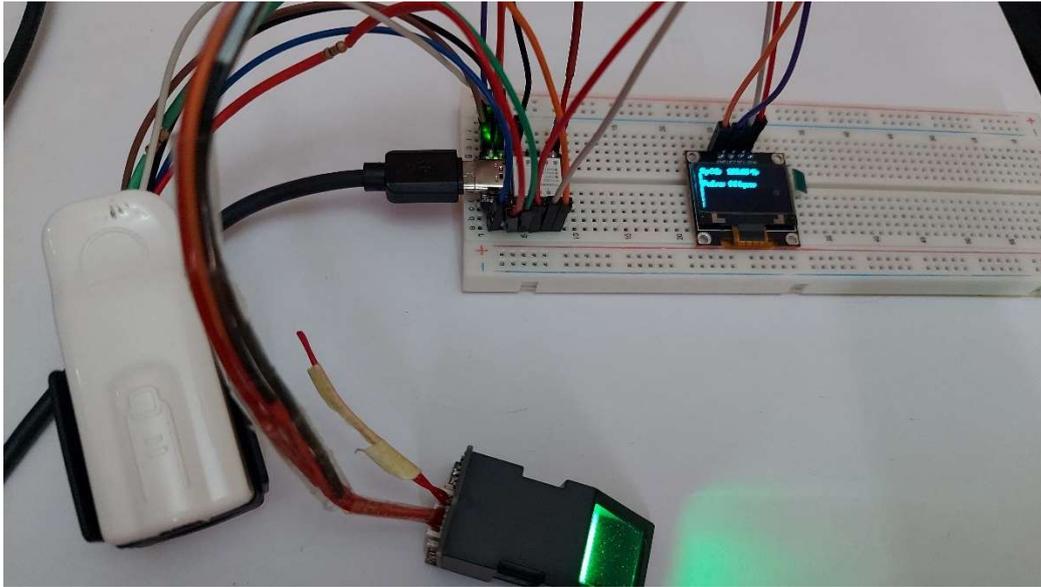


Figure III.18 : Assemblages de tous les composants

## 5 Architecture Système de l'Oxymètre Intelligent

L'architecture système du dispositif d'oxymétrie intelligent est conçue pour intégrer les différentes fonctionnalités tout en assurant une communication fluide entre les composants. Elle comprend plusieurs éléments clés, chacun jouant un rôle crucial dans le fonctionnement global du dispositif. Le capteur d'empreinte digitale (GT-511C3) est connecté au microcontrôleur via l'interface UART (TX et RX) et est utilisé pour la reconnaissance de l'utilisateur.

Le microcontrôleur (Seeeduino Xiao) centralise les opérations du système, gère la communication avec le capteur d'empreinte, le capteur d'oxymétrie et l'écran OLED, traite les données de SpO2 et de fréquence cardiaque, et communique avec l'ordinateur via USB pour l'alimentation et la transmission des données.

Le capteur d'oxymétrie, composé d'un photodétecteur et de LED IR/rouge, est connecté au microcontrôleur pour la lecture des signaux analogiques et est utilisé pour mesurer la SpO2 et la fréquence cardiaque. L'écran OLED, connecté au microcontrôleur via l'interface I2C (SDA et SCL), affiche les résultats de la SpO2, de la fréquence cardiaque et de la reconnaissance d'empreinte.

Le module USB fournit l'alimentation au système (5V) et assure la communication des données avec l'ordinateur. Enfin, l'ordinateur reçoit les données du microcontrôleur via USB, stocke les données de santé et gère les profils d'utilisateurs.

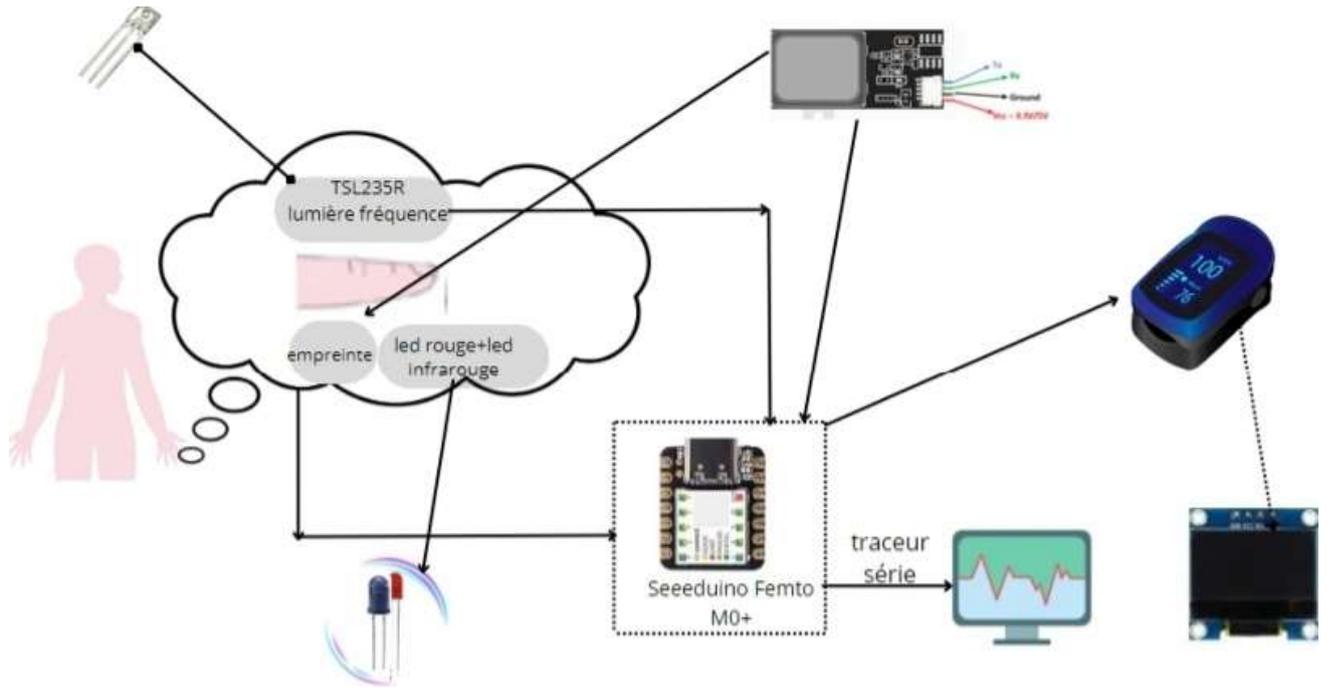


Figure III.19 : Architecture système du dispositif

6 Les organigrammes de gestion de système

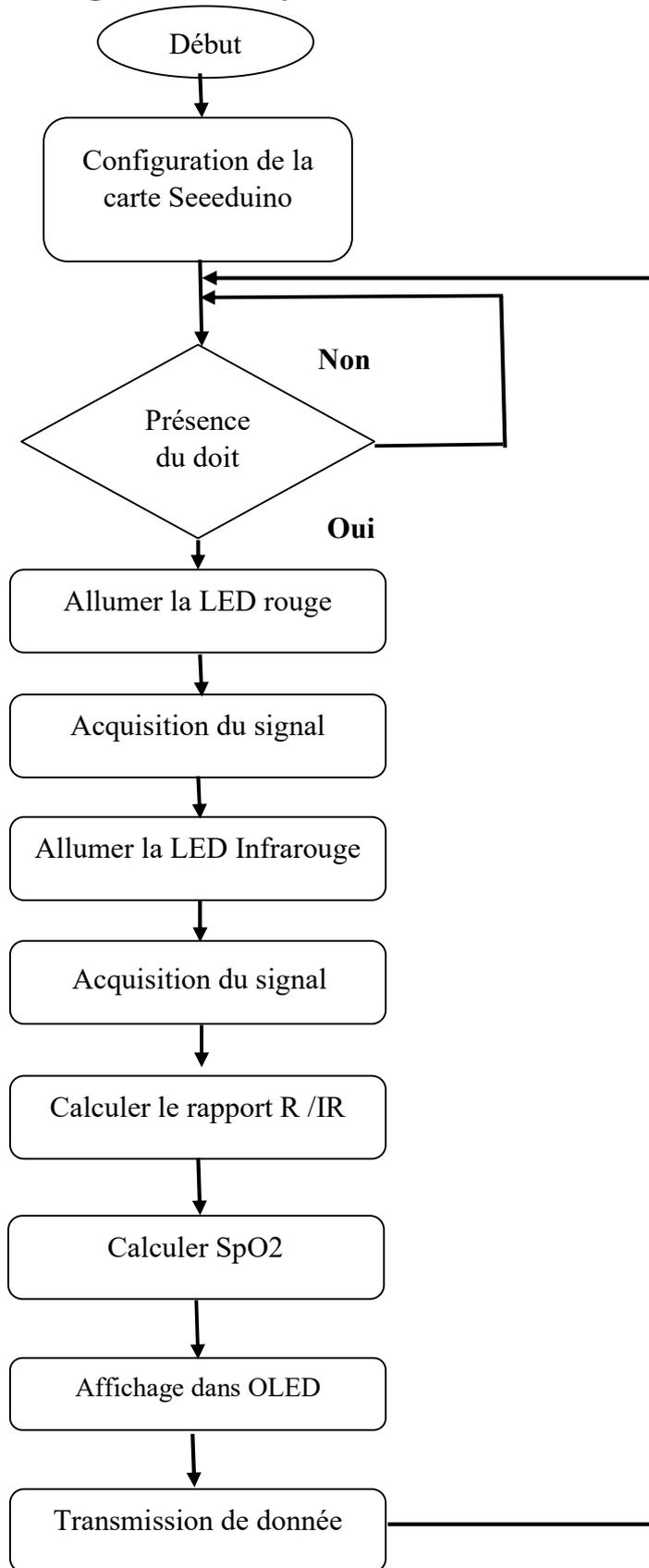


Figure III.21 : Organigramme de calcul de la SpO<sub>2</sub>

## **Conclusion**

La conception et le développement d'un oxymètre intelligent impliquent un processus méticuleux qui englobe la définition des exigences, la sélection des composants, l'architecture système, la mise en œuvre du logiciel et les tests rigoureux. Le résultat final doit être un dispositif fiable, précis et convivial qui répond aux besoins des utilisateurs dans le domaine de la santé et du bien-être.

***Chapitre IV :***  
***Réalisation pratique***  
***du projet***

## 1 Introduction

Une fois que l'oxymètre intelligent est assemblé et programmé, il est essentiel de procéder à des tests et à une validation rigoureuse pour garantir que le dispositif fonctionne correctement et fournit des mesures précises de la saturation en oxygène (SpO2) et de la fréquence cardiaque.

## 2 Tests et Validation du Dispositif d'Oxymètre Intelligent

### 2.1 Matériels utilisés

Pour la réalisation de notre projet d'oxymètre intelligent, nous avons utilisé les logiciels et les appareils suivant :

#### 2.1.1 Logiciel : Arduino IDE

Arduino IDE est l'environnement de développement intégré principal pour programmer les cartes Arduino. Il comprend :

- Un éditeur de code
- Un compilateur
- Un uploader pour transférer le code sur la carte

Dans ce projet utilisé pour la programmation et la configuration du microcontrôleur Seeeduno XIAO, ainsi que pour le développement du code nécessaire au fonctionnement du système.

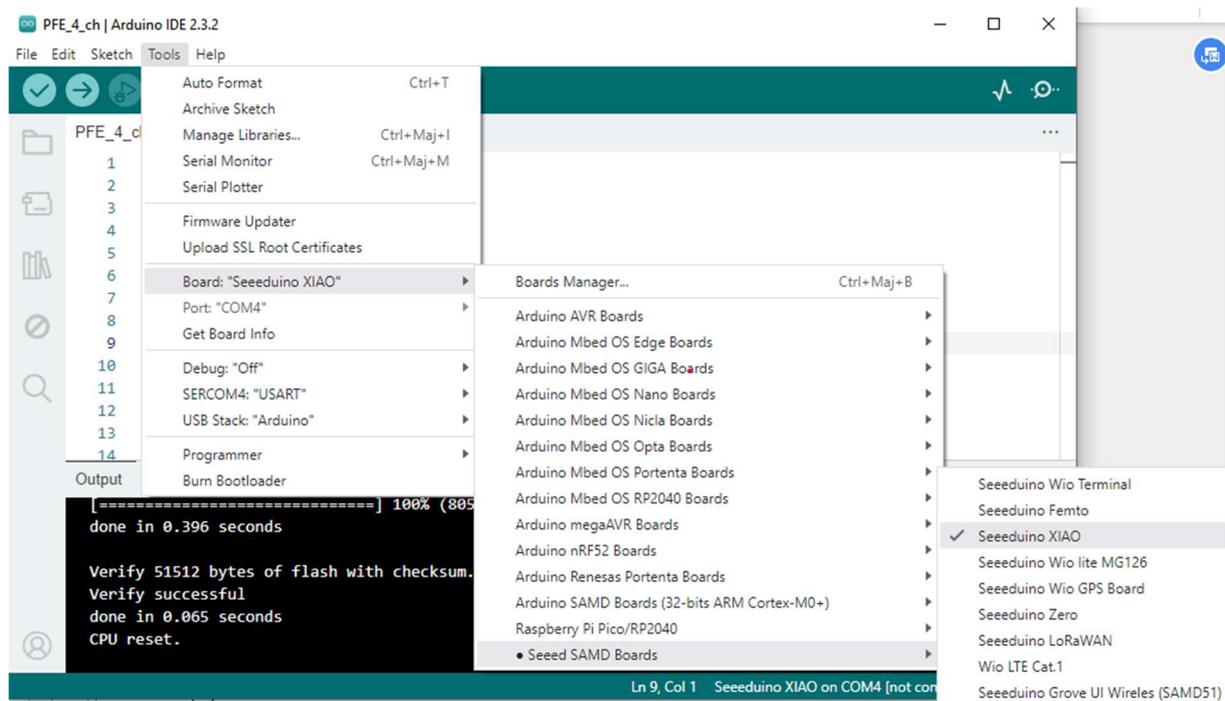


Figure IV. : Fenêtre logiciel de programmation Arduino IDE

Un programme de test a été développé pour vérifier la fonctionnalité de chaque composant individuel, suivi par une intégration progressive des différents modules pour former un système cohérent. L'interface utilisateur a été optimisée pour afficher les résultats en temps réel sur l'écran OLED.

### 2.1.2 Les appareils

Nous avons effectué nos essais dans le labo maquette du département, les appareils qu'on a utilisés sont :

**a. Oscilloscope :** Pour visualiser nos signaux on a utilisé l'oscilloscope.

Durant notre réalisation nous avons utilisé un oscilloscope numérique dont on a pu visualiser nos signaux.



Figure IV.1 : Aperçu de l'oscilloscope

**b. L'alimentation :** On a utilisé un générateur qui délivre 5V.



Figure IV.2 : Alimentation stabilisé

c. **Multimètre** : Tester les composants qu'on a utilisé.

Nous avons utilisé un multimètre digital UNI-T model UT60D pour calculer les différentes valeurs de nos composants ainsi que la vérification des pistes de notre maquette.



**Figure IV.3** : Multimètre digital

Les tests fonctionnels ont été conduits pour vérifier le bon fonctionnement de l'oxymètre. Ces tests incluait :

- **Test des LED** : Vérification de l'émission lumineuse correcte des LED rouge et infrarouge.
- **Test du Capteur de Lumière** : Validation de la capacité du capteur TSL235R à détecter et convertir les variations de lumière en signaux électriques exploitables.
- **Test de l'Affichage** : Assurance que l'écran OLED affiche correctement les valeurs mesurées de SpO2 et de fréquence cardiaque.

Les tests de performance ont consisté à comparer les mesures obtenues avec celles de dispositifs commerciaux de référence dans des conditions contrôlées et variées (différents niveaux de SpO2, variations de fréquence cardiaque, etc.). Ces tests ont permis d'évaluer la précision et la répétabilité des mesures du dispositif.

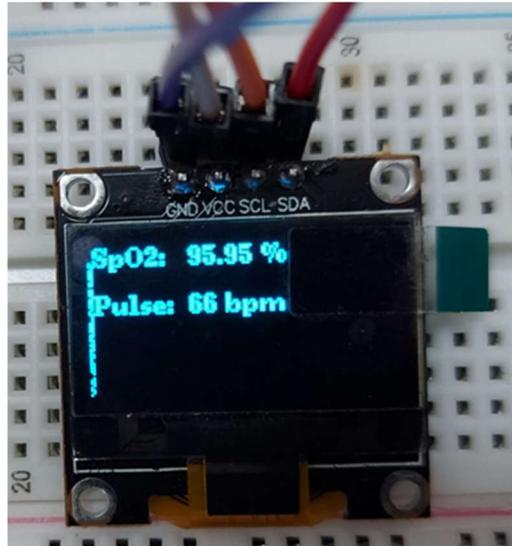


Figure IV.4 : Affichage des mesures de SpO2 à l'écran OLED

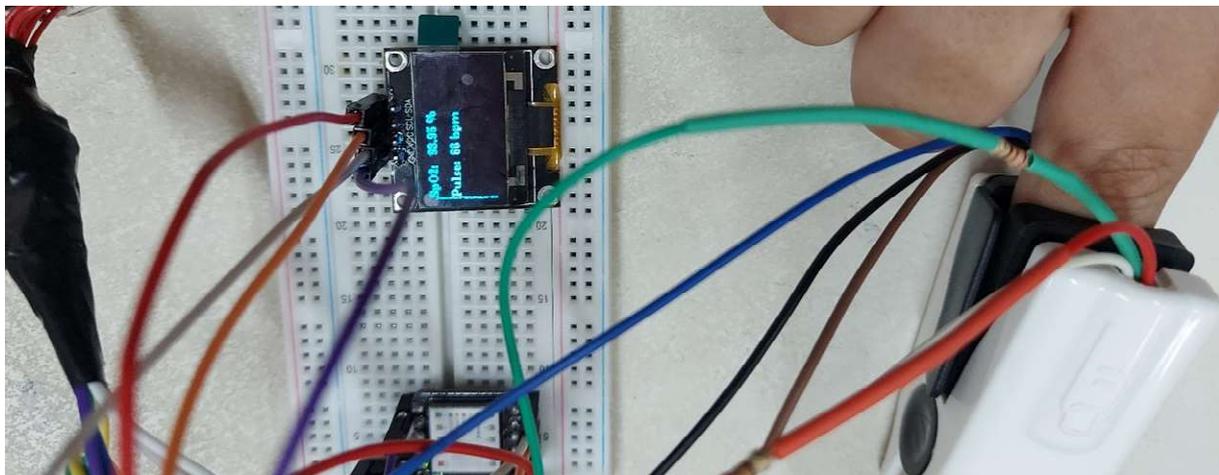


Figure IV.5 : Résultats du patient 1

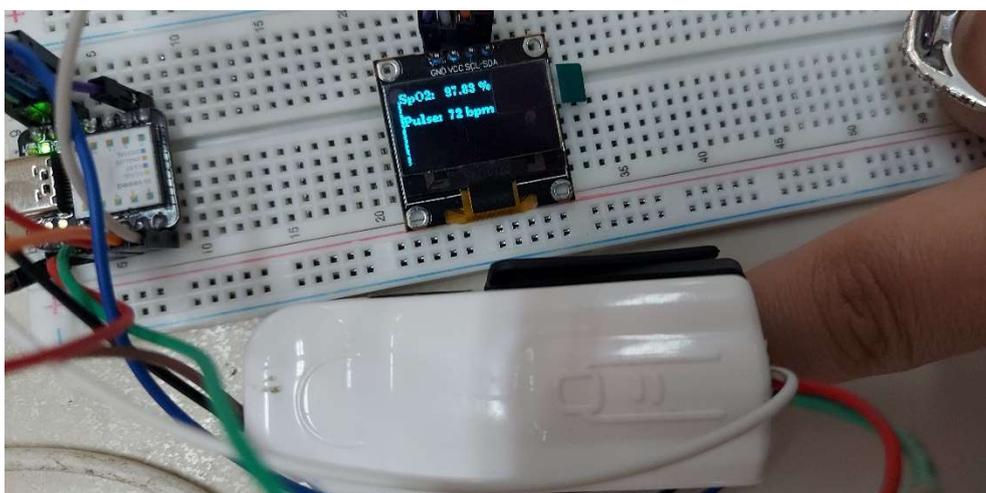
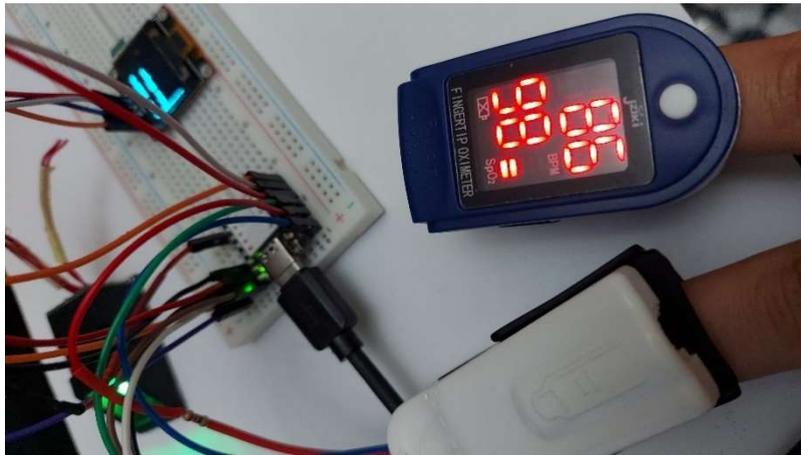


Figure IV.6 : Résultats du patient 2

### 3 Analyse des résultats obtenus

Une fois les tests et validations effectués, l'analyse des résultats obtenus permet d'évaluer la performance et la précision du dispositif.

- **Précision des mesures de SpO<sub>2</sub>** : Pour Comparer les mesures de saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>) fournies par l'oxymètre intelligent avec celles d'un oxymètre de référence.  
Données à Collecter : Mesures de SpO<sub>2</sub> de l'oxymètre intelligent et de l'oxymètre de référence pour plusieurs utilisateurs.



**Figure IV.7** : Comparaison des mesures de SpO<sub>2</sub> par l'oxymètre réalisé et l'oxymètre de référence

- **Fiabilité de la Reconnaissance d'Empreinte Digitale** : Évaluer la précision et la fiabilité du capteur d'empreinte digitale (GT511C3).  
Données à Collecter : Taux de reconnaissance correcte des empreintes pour plusieurs essais.
  - Calculez le taux de reconnaissance correcte.
  - Enregistrez le nombre de faux positifs et de faux négatifs.
  - Analysez les résultats pour détecter des tendances ou des problèmes potentiels.
- **Stabilité des Mesures** : Vérifier la constance des mesures de SpO<sub>2</sub> et de fréquence cardiaque sur une période prolongée.
- **Transmission et Affichage des Données** : Évaluer l'efficacité de la transmission des données à l'ordinateur et la clarté de l'affichage sur l'écran OLED.

L'analyse des résultats du dispositif d'oxymétrie intelligent permet de vérifier sa précision, sa fiabilité, et sa stabilité. En comparant les mesures avec celles de dispositifs de référence et en évaluant les performances des différents composants, on peut identifier les améliorations nécessaires et garantir la qualité du dispositif avant sa mise en service.

# *Conclusion générale*

## Conclusion générale

La réalisation d'un dispositif d'oxymétrie intelligent représente une avancée significative dans le domaine des technologies biomédicales. Ce projet a permis de développer un appareil capable de mesurer avec précision la saturation en oxygène (SpO<sub>2</sub>) et la fréquence cardiaque tout en intégrant des fonctionnalités supplémentaires comme la reconnaissance d'empreintes digitales pour assurer la sécurité et la confidentialité des données des utilisateurs.

Tout au long de ce projet, nous avons suivi une méthodologie rigoureuse, depuis l'analyse des besoins et la revue de l'état de l'art jusqu'à la conception, le développement et la validation du dispositif. L'intégration de composants tels que le capteur d'oxymétrie, le capteur d'empreintes digitales, l'écran OLED et la carte Seeeduino Femto M0+ a été réalisée avec succès, permettant une communication fluide entre les différents modules et assurant une interface utilisateur conviviale.

Les tests effectués ont démontré que l'oxymètre intelligent répondait aux exigences de précision et de fiabilité nécessaires pour une utilisation médicale. Les résultats obtenus montrent que le dispositif est capable de fournir des mesures cohérentes et exactes, comparables à celles des oxymètres commerciaux existants sur le marché.

La mise en œuvre de ce projet ouvre la voie à de nombreuses possibilités d'amélioration et d'évolution. À l'avenir, l'ajout de fonctionnalités telles que la connectivité sans fil, l'intégration avec des applications mobiles pour le suivi à distance, et l'utilisation de technologies d'intelligence artificielle pour l'analyse des données pourraient encore accroître l'utilité et l'efficacité de cet oxymètre intelligent.

En conclusion, ce projet a démontré la faisabilité de la conception d'un dispositif d'oxymétrie intelligent combinant des technologies de pointe pour offrir une solution innovante et fiable de surveillance de la santé. Ce dispositif a le potentiel de contribuer de manière significative à l'amélioration des soins de santé, en particulier dans les environnements où la surveillance continue des signes vitaux est essentielle.

# *Bibliographie*

## Bibliographie

- [1] « WHO EMRO | Dispositifs médicaux | Thèmes de santé ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.emro.who.int/fr/health-topics/medical-devices/>
- [2] G. P. F. de Q. • E. dispositifs médicaux et gestion des risques • A. norme X. S99-223, « Définition d'un dispositif médical », Qualitiso. Consulté le: 12 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qualitiso.com/dispositif-medical-definition/>
- [3] « Robotique médicale - Google Livres ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=R-jf9RiNsFIC&oi=fnd&pg=PA9&dq=J.+Troccaz,+Robotique+m%C3%A9dicale,+14,+rue+de+Provigny:+Lavoisier,+2012.+&ots=KSNUHyQJOL&sig=3iGsiK7khaTSa7FXkkaEifTBeZY&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.dz/books?hl=fr&lr=&id=R-jf9RiNsFIC&oi=fnd&pg=PA9&dq=J.+Troccaz,+Robotique+m%C3%A9dicale,+14,+rue+de+Provigny:+Lavoisier,+2012.+&ots=KSNUHyQJOL&sig=3iGsiK7khaTSa7FXkkaEifTBeZY&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- [4] D. Eskenazy, « Le dispositif médical à la recherche d'un nouveau cadre juridique », phdthesis, Université du Droit et de la Santé - Lille II, 2016. Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-01461616>
- [5] J. Lhomme, J. Humbert, et G. Farges, « Nouvelle méthode pour l'analyse de la criticité des dispositifs médicaux en exploitation (MACE) », *IRBM News*, vol. 34, n° 5-6, p. 150-154, oct. 2013, doi: 10.1016/j.irbmnw.2013.08.005.
- [6] « Rumb | Actualités - Les différentes classes de dispositifs médicaux, un secteur innovant, un marché sécurisé. » Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://rumb.fr/dispositifs-medicaux-les-differentes-classes-un-secteur-innovant-un-marche-securise>
- [7] « Quelles sont les différents types de dispositifs médicaux ? », Quelles sont les différents types de dispositifs médicaux ? Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.satisforn.com/dispositifs-medicaux.html>
- [8] G. P. F. de Q. • E. dispositifs médicaux et gestion des risques • A. norme X. S99-223, « Les catégories de dispositifs médicaux en Europe », Qualitiso. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qualitiso.com/dispositifs-medicaux-categories-europe/>
- [9] G. P. F. de Q. • E. dispositifs médicaux et gestion des risques • A. norme X. S99-223, « Exemples de classification des dispositifs médicaux [MDCG 2021-24] », Qualitiso. Consulté le: 6 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qualitiso.com/exemples-de-classification-des-dispositifs-medicaux-mdcg-2021-24/>
- [10] C. Vaugelade, « Le cadre réglementaire des dispositifs médicaux », *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, vol. 203, n° 5, p. 257-263, juill. 2019, doi: 10.1016/j.banm.2019.03.017.
- [11] G. P. F. de Q. • E. dispositifs médicaux et gestion des risques • A. norme X. S99-223, « Norme 60601-1: Sécurité de base et Performances essentielles des DM », Qualitiso. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.qualitiso.com/iec-60601-1-securite-electromedicaux/>

- [12] R. Pesqué *et al.*, « Accès au marché des dispositifs médicaux innovants : articulation entre évaluations nationales et hospitalières », *Annales Pharmaceutiques Françaises*, vol. 78, n° 2, p. 189-197, mars 2020, doi: 10.1016/j.pharma.2019.10.002.
- [13] M. Bertrand, L. Garet, B. Nord, A. Riaz, et G. Farges, « Qualité, sécurité et respect de la réglementation : les apports de l'ISO 13485 adaptée aux services biomédicaux », *IRBM News*, vol. 34, n° 2, p. 62-65, avr. 2013, doi: 10.1016/j.irbmnw.2013.03.001.
- [14] D. Martin, « La surveillance des dispositifs médicaux », *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine*, vol. 203, n° 5, p. 269-272, juill. 2019, doi: 10.1016/j.banm.2019.03.016.
- [15] « Évaluation des dispositifs médicaux numériques : comment prendre en compte les spécificités de ces solutions ? - ScienceDirect ». Consulté le: 18 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0040595723001555>
- [16] « Définition de Marquage CE ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.glossaire-international.com/pages/tous-les-termes/marquage-ce.html>
- [17] Cathy, « Votre guide ultime de la fabrication de dispositifs médicaux », *rapiddirect*. Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rapiddirect.com/fr/blog/medical-device-manufacturing/>
- [18] « Le bioterrorisme ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aren24.news/2020/04/25/le-bioterrorisme/>
- [19] « Laboratoire portable POTALAB PTW100010 », CIFEC. Consulté le: 23 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.shop.cifec.fr/705-laboratoire-portable-potalab.html>
- [20] « Tomodensitométrie : Tout savoir sur l'examen médical du scanner », *Maxisciences*. Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.maxisciences.com/sante/scanner-definition-comment-se-passe-un-examen-et-y-a-t-il-des-risques\\_art39520.html](https://www.maxisciences.com/sante/scanner-definition-comment-se-passe-un-examen-et-y-a-t-il-des-risques_art39520.html)
- [21] I. Gravillon, « Imagerie du cerveau: quels examens? », *Notretemps.com*. Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.notretemps.com/sante-bien-etre/medecine/imagerie-du-cerveau-quels-examens-21032>
- [22] A. Limited, « Les résultats de l'examen IRM sur un ordinateur Photo Stock - Alamy ». Consulté le: 1 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alamyimages.fr/photo-image-les-resultats-de-l-examen-irm-sur-un-ordinateur-34015604.html>
- [23] « Echographie : principe, indication, déroulé, coût ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.doctissimo.fr/html/sante/imagerie/echographie.htm>
- [24] P. C. Naden, « Des résultats fiables dans les laboratoires de biologie médicale », *ISO*. Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/cms/render/live/fr/sites/isoorg/contents/news/2020/12/Ref2581.html>
- [25] « Monitoring médical - moniteur de signes vitaux ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.distrimed.com/index.php?cPath=80\\_460](https://www.distrimed.com/index.php?cPath=80_460)

- [26] « Tensiomètre : définition, rôle, utilisation ? », <https://www.passeportsante.net/>. Consulté le: 13 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.passeportsante.net/materiel-medical?doc=tensiometre-definition-role-utilisation>
- [27] D. Czaplewski et C. Puntel, « Le tensiomètre automatique », 2011.
- [28] « Achetez votre tensiomètre manuel manopaire, manobrassard ou mural ». Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.distrimed.com/tensiometre\\_medical\\_manuel.php?osCsid=usnc2tpjqfg8c14sogfrake10](https://www.distrimed.com/tensiometre_medical_manuel.php?osCsid=usnc2tpjqfg8c14sogfrake10)
- [29] « Moniteur ambulatoire de tension artérielle | Institut de cardiologie de l'Université d'Ottawa ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ottawaheart.ca/fr/examen-intervention/moniteur-ambulatoire-de-tension-arterielle>
- [30] « Cabinet de Cardiologie et d'explorations cardio-vasculaires - Dr. Nadia Srairi - Monitoring ambulatoire de pression artérielle (MAPA) ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://cabinetdrsrairi.com/les-explorations/200-monitoring-ambulatoire-de-pression-arterielle-mapa>
- [31] « Ceintures Cardiaques | Garmin, Polar, Wahoo | Alltricks ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alltricks.fr/C-2066246-ceintures-cardiaques>
- [32] Medtronic, « Notre thérapie - pacemaker ou stimulateur cardiaque ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.medtronic.com/fr-fr/patients/traitements-therapies/bradycardie/notre-therapie.html>
- [33] « Heart pacemaker: MedlinePlus Medical Encyclopedia ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://medlineplus.gov/ency/article/007369.htm>
- [34] « Qu'est-ce qu'une prothèse orthopédique ? | AMPLITUDE ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amplitude-ortho.com/fr/generalites-la-prothese-articulaire>
- [35] « Le matériel de dialyse », Centre hémodialyse Aubagne. Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.dialyse-aubagne.com/fr/le-materiel-de-dialyse>
- [36] « Thérapie au laser de bas niveau », Hair Growth Specialist. Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hgspecialist.com/fr-fr/blogs/treatments/low-level-laser-therapy>
- [37] O. Kahina et K. Zakia, « Conception et réalisation d'un oxymètre de pouls connecté à base d'une carte LINKIT ONE », Université Mouloud Mammeri, 2016. Consulté le: 25 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummo.dz/handle/ummo/6512>
- [38] « Le système circulatoire et son anatomie », Alloprof. Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/le-systeme-circulatoire-et-son-anatomie-s1270>
- [39] « Appareil cardiovasculaire : définition et explications », AquaPortail. Consulté le: 25 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/4330/appareil-cardiovasculaire>

- [40] « Courir : - Systèmes cardio-vasculaire et cardio-respiratoire ». Consulté le: 25 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.nataswim.info/dossiers/7819-courir-systemes-cardio-vasculaire>
- [41] « Hémoglobine : taux normal homme/femme, basse, haute ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-anatomie-et-examens/2511005-hemoglobine-norme-taux-bas-eleve-femme-homme/>
- [42] « Physiologie des systèmes intégrés, les principes et fonctions - Transport des gaz dans le sang ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ressources.unisciel.fr/physiologie/co/grain2g.html>
- [43] « Transport des gaz respiratoires - BPH : Explication et Exercices - evulpo ». Consulté le: 3 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://evulpo.com/fr/fr/dashboard/lesson/fr-b-cl-04human-05respiratorysystem-06transport-of-respiratory-gases>
- [44] « LA SATURATION (OXYMÉTRIE DE POULS) », La Boutique Des Infirmières. Consulté le: 19 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://laboutiquedesinfirmieres.com/blogs/blog-des-infirmieres/la-saturation-oxymetrie-de-pouls>
- [45] « Taux de saturation en oxygène o2 : définition, mesure et normes », <https://www.passeportsante.net/>. Consulté le: 23 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.passeportsante.net/fr/Maux/examens-medicaux-operations/Fiche.aspx?doc=taux-saturation-oxygene-o2>
- [46] « Saturation en oxygène du sang – valeur et méthodes de mesure ». Consulté le: 25 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.weinmann-emergency.com/fr/themes/monitorage-defibrillation/saturation-en-oxygene-du-sang>
- [47] « Oxymètre de pouls : à quoi sert-il ? » Consulté le: 20 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: [https://www.doctissimo.fr/sante/examens-medicaux-et-operations/analyses-medicales/oxymetre-de-pouls-a-quoi-ca-sert/356dd6\\_ar.html](https://www.doctissimo.fr/sante/examens-medicaux-et-operations/analyses-medicales/oxymetre-de-pouls-a-quoi-ca-sert/356dd6_ar.html)
- [48] « Que dois-je savoir sur ... l'oxymétrie de pouls? », CONTROLE O2. Consulté le: 23 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.controle-o2.fr/blogs/oxymetre-oxymetrie/que-dois-je-savoir-sur-oxymetrie-de-pouls>
- [49] « Chapitre 1.pdf ». Consulté le: 21 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/5074/2/Chapitre%201.pdf>
- [50] M. Feissel, « La pléthysmographie de l'oxymètre de pouls : un ancien tracé plein d'avenir ? Principes et applications cliniques », *Réanimation*, vol. 16, n° 2, p. 124-131, avr. 2007, doi: 10.1016/j.reaurg.2007.02.010.
- [51] A. de Girodmedical, « L'oxymétrie, comment ça marche ? Nos explications et conseils », Girodmedical Blog : Le blog du matériel médical. Consulté le: 20 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.girodmedical.com/blog/qu-est-ce-que-loxymetrie/>
- [52] Doctissimo, « Taux de saturation en oxygène : définition, mesure, normes, Covid-19 », Doctissimo. Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur:

[https://www.doctissimo.fr/sante/analyses-medicales/taux-de-saturation-en-oxygene-definition-mesure-normes-covid-19/f621fe\\_ar.html](https://www.doctissimo.fr/sante/analyses-medicales/taux-de-saturation-en-oxygene-definition-mesure-normes-covid-19/f621fe_ar.html)

[53] L. Nadine et D. Kamel, « Conception et réalisation d'un oxymètre de pouls », Université Mouloud Mammeri, 2014. Consulté le: 20 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://dspace.ummto.dz/handle/ummto/6703>

[54] « pers0106.pdf ». Consulté le: 26 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://perso.esiee.fr/~ferracaa/projets/OxymetriePage/pers0106.pdf>

[55] « La saturation pulsée en oxygène (SpO<sub>2</sub>) », Infirmiers.com. Consulté le: 26 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.infirmiers.com/etudiants/cours-et-tests/la-saturation-pulsee-en-oxygene-spo2>

[56] « Concevoir un oxymètre de pouls à faible coût en utilisant des composants disponibles sur le marché », DigiKey. Consulté le: 20 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.digikey.fr/fr/articles/design-a-low-cost-pulse-oximeter-using-off-the-shelf-components>

[57] « MAX30102-Pulse-Detection-Photoplethysmogram.png (358×274) ». Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.moussasoft.com/wp-content/uploads/2023/07/MAX30102-Pulse-Detection-Photoplethysmogram.png>

[58] « La pléthysmographie de l'oxymètre de pouls : un ancien tracé plein d'avenir ? Principes et applications cliniques - ScienceDirect ». Consulté le: 28 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S162406930700028X>

[59] Beer-Lambert, « La lumière dans la médecine: L'oxymètre de pouls (ou saturomètre). - ppt télécharger ». Consulté le: 29 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://slideplayer.fr/slide/12575067/>

[60] B. H. Mohamed et F. Bereksi-Reguig, « Développement d'un système d'acquisition biomédical en vue de mesurer et d'analyser le temps de transit de l'onde de pouls. », déc. 2013, Consulté le: 29 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <http://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/handle/123456789/2543>

[61] S. CHEN, « Pourquoi utiliser un oxymètre de pouls est une bonne idée. », Tension-Santé. Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.tension-sante.com/pourquoi-utiliser-oxymetre-de-pouls/>

[62] « Taux de saturation en oxygène o<sub>2</sub> : définition, mesure et normes », <https://www.passeportsante.net/>. Consulté le: 23 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.passeportsante.net/fr/Maux/examens-medicaux-operations/Fiche.aspx?doc=taux-saturation-oxygene-o2>

[63] « L'oxymètre : un petit outil précieux ». Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.districtmedical.fr/nos-conseils/loxymetre-un-petit-outil-precieux>

[64] « Masimo Radical-7® Pulse CO-Oximeter® (Reconditionné) - Diac Medical - We Sell Used, Refurbished Medical Equipment And Ambulances », Diac Medical. Consulté le:

- 29 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://diacmedical.com/fr/site-product/masimo-radical-7-pulse-co-oximeter-reconditionne/>
- [65] « Oximetro de Pulso NONIN Onyx Vantage 9590 », Respilife. Consulté le: 29 mai 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.respilife.cl/product-page/oximetro-de-pulso-nonin-onyx-vantage-9590>
- [66] 14:00-17:00, « ISO 80601-2-61:2017 », ISO. Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/fr/standard/67963.html>
- [67] « ISO/CEI 27001:2013(fr), Technologies de l'information — Techniques de sécurité — Systèmes de management de la sécurité de l'information — Exigences ». Consulté le: 30 juin 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso-iec:27001:ed-2:v1:fr>
- [68] « Snapshot ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://binarytech-dz.com/produit/composants-electronique/optoelectronique/led-infra-rouge-ir-emettrice/>
- [69] « Résistance 220 Ohms | YoupiLab Components ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://youpilab.com/components/product/resistance-220-ohms>
- [70] embed, « Tumblr », Tumblr est un lieu où vous pouvez vous exprimer, apprendre à vous connaître et créer des liens autour de vos centres d'intérêt. C'est l'endroit où vos passions vous connectent avec les autres. Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://embed.tumblr.com/widgets/share/button?canonicalUrl=https%3A%2F%2Fwww.electroschematics.com%2Fflight-humidity-to-frequency-converter%2F&postcontent%5Btitle%5D=Light%20%26%20Humidity%20To%20Frequency%20Converter&postcontent%5Bcontent%5D=https%3A%2F%2Fwww.electroschematics.com%2Fflight-humidity-to-frequency-converter%2F>
- [71] « OLED OT 0.960D AFFICHEUR OLED I2C 0,96 ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.orbit-dz.com/product/produit-1793/>
- [72] G. TRONIC, « Capteur d'empreinte digitale GT215 », GO TRONIC. Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gotronic.fr/art-capteur-d-empreinte-digitale-gt215-28513.htm>
- [73] « FPM10A Lecteur d'empreintes digitales optique Module de capteur de verrouillage de porte Scanner d'empreintes digitales Identification UART TTL USB pour Arduino : Amazon.ca: Fournitures pour le bureau ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.amazon.ca/-/fr/Lecteur-dempreintes-digitales-verrouillage-Identification/dp/B07ZCPKNVQ>
- [74] « Seeeduino Femto M0 — PlatformIO v6.1 documentation ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur:  
[https://docs.platformio.org/en/stable/boards/atmelsam/seeed\\_femto.html](https://docs.platformio.org/en/stable/boards/atmelsam/seeed_femto.html)
- [75] « Seeeduino Cortex M0 | Seeed Studio Wiki ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino-Cortex-M0/>

[76] « Seeeduino XIAO SAMD21 Cortex® M0+ - Seeed | DigiKey ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.digikey.fr/fr/product-highlight/s/seeed/seeeduino-xiao-arduino-microcontroller-samd21-cortex-m0>

[77] « Getting Started with Seeed Studio XIAO SAMD21 | Seeed Studio Wiki ». Consulté le: 1 juillet 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://wiki.seeedstudio.com/Seeeduino-XIAO/>