

N° 101



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

MASTER DE RECHERCHE EN TÉLÉCOMMUNICATIONS ET RÉSEAUX INFORMATIQUES

Rapport de stage

Thème :

**Étude des architectures de déploiement des objets connectés
dans un environnement hospitalier béninois**

Présenté par :

Ginette E. A. KPADJOU DA JOB

Ingénieur de Conception en Electronique et Télécommunications

Encadré par :

Dr. Ing. Patrick SOTINDJO

Enseignant chercheur à l'UNSTIM

Sous la direction de :

Dr. Théophile ABALLO

Maître de conférence des Universités (CAMES)

Expert des NTICS

Enseignant chercheur à l'EPAC/UAC

Laboratoire d'Electrotechnique, de Télécommunications et d'Informatique Appliquée (LETIA)

2020-2021

Dédicace

A ma feuè mère Brigitte GOMEZ

*Tu m'as donné le modèle d'une mère attentionnée
et d'une femme d'impact dans la société.*

A mon père Nicolas KPADJOUA

*Tu m'as communiqué le goût des sciences
et un caractère autodidacte.*

A mon mari Arnaud Karl JOB

*Tu me soutiens et me propulses
vers de hauts sommets.*

A mon Beau frère Martin Pépin AINA

*Tu as toujours cru et beaucoup
investi en moi.*

Remerciements

Je voudrais exprimer ici ma profonde gratitude à vous tous qui avez contribué d'une manière ou d'une autre au couronnement de ce travail. Je remercie sincèrement:

- Le Professeur Antoine VIANOU, Directeur de l'Ecole Doctorale Sciences de l'Ingénieur;
- Tous les enseignants de l'ED-SDI pour les connaissances partagées.
- Le Dr Théophile ABALLO qui a accepté de superviser ce travail.
- Dr. Patrick SOTINDJO pour son encadrement et sa motivation.
- Tous mes promotionnaires pour leur sens de partage.
- Tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Table des matières

| | |
|---|------|
| Dédicace..... | ii |
| Remerciements..... | iii |
| Table des matières..... | iv |
| Table des figures..... | vi |
| Liste des tableaux..... | viii |
| Liste des sigles et abréviations..... | ix |
| | |
| Résumé..... | 2 |
| Abstract..... | 3 |
| Introduction..... | 4 |
| Objectifs..... | 4 |
| Méthodologie..... | 5 |
| Impact..... | 6 |
| | |
| Chapitre 1: | |
| Revue de littérature..... | 8 |
| 1. Les concepts fondamentaux de l’IoT..... | 9 |
| 1.1. Les origines de l’IoT..... | 9 |
| 1.1.1. Histoire de l’Internet..... | 9 |
| 1.1.2. Les différents stades d’évolution du web..... | 9 |
| 1.1.3. Définitions de l’IoT..... | 11 |
| 1.2. Présentation technique de l’IoT..... | 13 |
| 1.2.1. Caractéristiques d’un système IoT..... | 13 |
| 1.2.2. Les blocs de construction et les composants des systèmes IoT..... | 15 |
| 1.2.2.1. Les blocs d’une solution IoT..... | 15 |
| 1.2.2.2. Les composants d’une solution IoT..... | 16 |
| 1.2.3. Technologies radio pour l’implémentation de l’IoT..... | 17 |
| 1.2.3.1. Les technologies de proximité..... | 18 |
| 1.2.3.2. Wireless Local Area..... | 20 |
| 1.2.3.3. Les réseaux à longue portée et basse consommation (Low Power Wide Area Network - LPWAN)..... | 21 |
| 1.3. Architecture des systèmes IoT..... | 23 |
| 1.3.1. Le modèle de référence..... | 23 |
| 1.3.2. Les différentes couches des architectures IoT..... | 26 |
| 1.4. Challenges et Marchés de l’IoT..... | 31 |
| 1.4.1. Les grands défis de l’IoT..... | 31 |
| 1.4.2. Les applications de l’IoT..... | 33 |
| 2. L’IoMT: IoT au service de la santé..... | 36 |
| 2.1. Numérisation des pratiques et produits dans le domaine de la santé..... | 36 |

| | |
|---|----|
| 2.1.1. La e-santé..... | 36 |
| 2.1.2. Les solutions IoT pour les soins de santé..... | 37 |
| 2.1.3. Acteurs et marché de la E-santé..... | 39 |
| 2.1.3.1. Les tendances du marché..... | 39 |
| 2.1.3.2. Les acteurs de la digitalisation du domaine de la santé..... | 41 |
| 2.2. Technologies et architectures de déploiement des objets médicaux connectés..... | 43 |
| 2.2.1. Technologies IoT adaptées aux soins de santé intelligent..... | 43 |
| 2.2.2. Etude de quelques architectures de déploiement des objets médicaux connectés..... | 50 |
| 3. Les objets connectés en milieu hospitalier béninois..... | 60 |
| 3.1. Point de l'intégration des mesures de l'OMS en matière de Cybersanté par le gouvernement béninois..... | 60 |
| 3.2. Mesures de cybersanté prévues par le gouvernement béninois dans le plan national de développement sanitaire 2018-2022..... | 61 |
| 3.3. Les enjeux du déploiement de l'IoMT en milieu hospitalier béninois..... | 62 |
| 4. Synthèse et problématique..... | 64 |

Chapitre 2:

| | |
|--|-----------|
| Matériels et méthodes..... | 65 |
| 1. Matériels..... | 66 |
| 1.1. Les outils..... | 66 |
| 1.2. Les données..... | 67 |
| 2. Méthodes d'étude..... | 67 |
| 2.1. Approche qualitative..... | 67 |
| 2.2. Approche quantitative..... | 68 |
| 3. Critères d'analyse et d'interprétation des données..... | 68 |
| 3.1. Analyse statistique et interprétation..... | 68 |
| 3.2. Analyse textuelle et interprétation..... | 68 |

Chapitre 3:

| | |
|---|-----------|
| Résultats et Discussions..... | 69 |
| 1. Résultats..... | 70 |
| 1.1. Les résultats de l'enquête sommaire pour évaluer l'adhésion des spécialistes de santé au déploiement de l'IoMT en milieu hospitalier béninois..... | 70 |
| 1.2. Les éléments clés ressortant de l'état de l'art..... | 75 |
| 2. Discussions générales..... | 79 |
| 2.1. Impact des solutions IoMT sur le système hospitalier béninois..... | 79 |
| 2.2. Critères de choix des architectures de déploiement des objets connectés médicaux adaptées au contexte hospitalier béninois..... | 82 |
| 3. Nos Suggestions..... | 84 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| Conclusion..... | 85 |
| Bibliographie..... | 86 |

Table des figures

| | |
|--|----|
| <i>Figure 1.1 : Les états d'évolution du Web</i> | 11 |
| <i>Figure 1.2 : Les caractéristiques de l'IoT</i> | 14 |
| <i>Figure 1.3 : Interactions entre les composants</i> | 16 |
| <i>Figure 1.4 : Modèle de référence de l'IUT</i> | 24 |
| <i>Figure 1.5 : Traitement de données dans les architectures IoT basées sur le Cloud et le Fog computing [23]</i> | 30 |
| <i>Figure 1.6 : De la e-santé à la santé connectée (Source CNOM)</i> | 37 |
| <i>Figure 1.7 : Part de marché de la sécurité mondiale de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine de la santé en 2018 et 2028, par région</i> | 40 |
| <i>Figure 1.8 : Marché mondial de la santé numérique de 2013 à 2020 par segment(en milliards de dollars des États-Unis)[16]</i> | 41 |
| <i>Figure 1.9 : Familles de brevets identifiés entre 1997 et 2017</i> | 42 |
| <i>Figure 1.10 : Les principaux actuels géants des soins de santé numérique 2021-2029 [49]</i> | 43 |
| <i>Figure 1.11 : Exemple d'architecture d'un système de santé basé sur le Cloud</i> | 45 |
| <i>Figure 1.12 : Environnement général du fog Computing</i> | 46 |
| <i>Figure 1.13 : Proposition d'une architecture de calcul du brouillard pour les soins de santé préventifs et l'assistance à la vie dans des environnements intelligents [1]</i> | 51 |
| <i>Figure 1.14 : Architecture basée sur l'IoT pour la surveillance UHealthcare en temps réel[2]</i> ... | 52 |
| <i>Figure 1.15 : Architecture en couche proposée pour la surveillance de la santé des patients assistée par l'IoT par brouillard dans les maisons intelligentes [3]</i> | 53 |
| <i>Figure 1.16 : Architecture basée sur l'informatique hiérarchisée assistée par brouillard pour l'IoT dans le domaine de la santé[4]</i> | 54 |
| <i>Figure 1.17 : Architecture à trois couches d'un système de surveillance basé sur l'IoT pour les soins de santé omniprésents[5]</i> | 54 |
| <i>Figure 1.18 : Architecture de référence de l'intégration Cloud-Fog pour des solutions interopérables IoT-Santé [6]</i> | 55 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figure 1.19 : Architecture basée sur le Fog d'un système de santé pour la surveillance des personnes âgées [7].....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 1.20 : Architecture basée sur le brouillard pour les systèmes de santé[8].....</i> | <i>56</i> |
| <i>Figure 1.21 : Architecture proposée pour la surveillance des patients[9].....</i> | <i>57</i> |
| <i>Figure 1.22 : Architecture à trois couches de Naresh et al.[10].....</i> | <i>58</i> |
| <i>Figure 3.1 : Distribution des individus de l'échantillon-cible selon la fonction.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Figure 3.2 : Niveau de connaissance des individus de l'échantillon sur une échelle de 1 à 5.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure 3.3 : Fréquence d'utilisation des objets connectés par les individus de l'échantillon.....</i> | <i>71</i> |
| <i>Figure 3.4 : Niveau d'adhérence des enquêtés à l'idée du déploiement des objets connectés en milieu hospitalier.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figure 3.5 : Choix des enquêtés par rapport à l'étape de la prise en charge à prioriser pour l'introduction des objets connectés.....</i> | <i>73</i> |
| <i>Figure 3.6 : Types d'affections à prioriser pour l'introduction des objets connectés en milieu hospitalier béninois</i> | <i>74</i> |
| <i>Figure 3.7 : Types de raisons susceptibles de freiner l'adoption de l'IoMT par les professionnels de santé.....</i> | <i>74</i> |

Liste des tableaux

| | |
|--|-----------|
| <i>Table 1.1: Blocs de construction, dispositifs et caractéristiques des solutions IoT.....</i> | <i>15</i> |
| <i>Table 1.2: Caractéristiques des composants IoT.....</i> | <i>16</i> |
| <i>Table 1.3: Technologies WPAN et leurs caractéristiques.....</i> | <i>20</i> |
| <i>Table 1.4: Technologies LPWAN et leurs caractéristiques(1).....</i> | <i>21</i> |
| <i>Table 1.5: Technologies LPWAN et leurs caractéristiques(2).....</i> | <i>22</i> |
| <i>Table 1.6: Les couches et capacités du modèle de référence de l'ITU.....</i> | <i>25</i> |
| <i>Table 1.7: Comparaison des caractéristiques les plus importantes du Cloud et du Fog computing</i> | <i>31</i> |
| <i>Table 1.8: Comparaison des architectures présentées</i> | <i>59</i> |
| <i>Table 3.1: Critères de sélection des architectures de déploiement des solutions IoMT dans le milieu hospitalier béninois.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Table 3.2: Impact du déploiement des solutions IoMT sur le système hospitalier béninois.....</i> | <i>78</i> |

Liste des sigles et abréviations

IoT: Internet of Things

IUT: International Union of Telecommunications

CNOM: Conseil National de l'Ordre des Médecins

IoMT: Internet of Medical Things

WPAN: Wireless Personal Area Network

LPWAN: Low Power Wide Area Network

CSU: Couverture Sanitaire Universelle

ODD: Objectifs de Développement Durable

OMS: Organisation Mondiale de la Santé

RNNS: Réseau National Numérique de la Santé

TIC: Technologies de l'information et de la communication

DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency

ARPANET: Advanced Research Projects Agency Network

TCP: Transmission Control Protocol

IP: Internet Protocol

DNS: Domain Name System

API: Application Programming Interface

RFID: Radio Frequency Identification

WSN: Wireless Sensors Network

BLE: Bluetooth Low Energy

LoRaWAN: Low Range Wide Area Network

LTE-M: Long Term Evolution for Machines

NB-IoT: Narrow Band IoT

SaaS: Software-as-a-Service

PaaS: Platform-as-a-Service

DBaaS: Base de données-as-a-Service

SIS/SIH: Systèmes d'Informations de Santé ou Hospitaliers

ECG: Électrocardiogramme

OFDMA: Orthogonal Frequency-Division Multiple Access

QAM: Quadrature Amplitude Modulation

WBAN: Wireless Body Area Networks

IdO: Internet des Objets

WLAN: Wireless Local Area Network

WBAN: Wireless Body Area Network

LTE CAT-M1: Long Term Evolution 4G, catégorie M1

ODD: Objectifs de Développement Durable

CHU: Centre Hospitalier et Universitaire

Résumé

L'Internet des objets appliqué aux soins de santé a un fort potentiel pour l'amélioration des services de santé des populations. Il consiste en la mise en réseau d'objets connectés médicaux, d'infrastructures réseaux et informatiques pour permettre la transformation digitale des systèmes hospitaliers. Notre étude se focalise d'une part sur l'impact que pourrait apporter cette technologie sur le système sanitaire béninois et d'autre part sur les contraintes de son déploiement d'un point de vue architectural. Nous avons adopté une méthode empirique présentant un volet qualitatif et un autre quantitatif. L'état de l'art du sujet nous a permis de réaliser un manque criant de publications scientifiques exploitables sur le sujet spécifique abordé à cause de son aspect très contextuel. Nous avons étudié dix architectures IoMT provenant d'auteurs différents et procédé à leur analyse comparative. Ainsi, nous avons pu identifier neuf critères de sélection: le nombre de couches, la complexité du modèle, la fiabilité des données, le support des applications en temps réel, la sécurité, le rapport qualité/prix, la consommation énergétique, le type de solutions de connectivité exploitées et la pertinence contextuelle. Aucune transformation digitale, efficace et durable ne pouvant être réalisée sans l'implication des personnes concernées, nous avons effectué un sondage en ligne auprès de cinquante agents de santé. Les enquêtés ont manifesté un grand intérêt pour le sujet mais aussi une appréhension par rapport à la sécurité des données et au coût de la technologie. Une orientation spécifique a également été dégagée: déployer des solutions IoMT pour la surveillance en hospitalisation et à distance des patients ayant au moins l'âge adulte et souffrant de maladies cardiovasculaires, de diabète ou de maladies respiratoires. Ces résultats étant en adéquation avec les défis majeurs de l'IoMT et les données actuelles de l'OMS sur la situation sanitaire dans les pays à revenus faibles, nous avons fait des suggestions pour que cette étude soit poursuivie, améliorée. De la sorte, des solutions IoMT efficaces et durables, déployées à l'échelle nationale et répondant aux besoins effectifs du milieu hospitalier béninois pourraient devenir une réalité.

Mots-clés: Internet des objets (IoT), Internet des Objets Médicaux (IoMT), objets connectés, Cybersanté

Abstract

The Internet of Things applied to healthcare has great potential to improve health services for populations. It consists of the networking of medical connected objects, network and IT infrastructures to enable the digital transformation of hospital systems. Our study focuses on the impact that this technology could have on the Beninese health system and on the constraints of its deployment from an architectural point of view. We adopted an empirical method with a qualitative and a quantitative component. The state of the art of the subject allowed us to realise that there is a crying lack of exploitable scientific publications on the specific subject addressed because of its very contextual aspect. We studied ten IoMT architectures from different authors and carried out a comparative analysis. As a result, we were able to identify nine selection criteria: the number of layers, the complexity of the model, the reliability of the data, the support of real-time applications, the security, the price/performance ratio, the energy consumption, the type of connectivity solutions exploited and the contextual relevance. As no effective and sustainable digital transformation can be achieved without the involvement of the people concerned, we conducted an online survey of fifty health workers. The respondents showed great interest in the subject but also apprehension about the security of the data and the cost of the technology. A specific direction was also identified: to deploy IoMT solutions for inpatient and remote monitoring of patients of at least adult age suffering from cardiovascular disease, diabetes or respiratory disease. As these results are in line with the major challenges of IoMT and the current WHO data on the health situation in low-income countries, we have made suggestions for the continuation and improvement of this study. In this way, effective and sustainable IoMT solutions, deployed on a national scale and responding to the actual needs of the Beninese hospital environment could become a reality.

Keys Word: Internet of things (IoT), Internet of Medical Things (IoMt), eHaealth, Connected things

Introduction

L'accès à la Couverture Sanitaire Universelle (CSU) fait partie des Objectifs de Développement Durable (ODD) fixés par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).

Pour renforcer les systèmes de santé et offrir aux populations des soins de qualité indépendamment des barrières géographiques et des disparités entre les citoyens, les outils numériques sont incontestablement aujourd'hui des leviers de développement dont les pays africains doivent se munir.

En comparaison avec les autres régions du continent, l'Afrique de l'Ouest en général et le Bénin en particulier a du mal à mettre en œuvre une stratégie effective de e-santé à l'échelle nationale. Afin de relever les défis identifiés et pour rattraper le retard accumulé, un partenariat avec l'Union Internationale des Télécommunications (UIT) a été promu pour accompagner la sous-région dans le déploiement des stratégies cybersanté.

Sur le plan des infrastructures techniques, il a été soulevé comme faiblesse que les solutions de santé numérique déployées sont non réutilisables et de portées limitées. Dans le but de corriger ces insuffisances, le gouvernement du Bénin a adopté en 2017 la stratégie nationale en cybersanté (2018-2022) et a initié la mise en place d'un Réseau National Numérique de la Santé (RNNS) comme premier programme de renforcement des infrastructures TIC.

Ces différents éléments expliquent l'intérêt de nos travaux de recherche qui se penchent sur **l'étude des architectures de déploiement des objets connectés dans un environnement hospitalier béninois**, afin de contribuer aux efforts du gouvernement pour accélérer la transformation numérique du Bénin.

Objectifs

Dans le secteur des soins de la santé, la combinaison des Télécommunications, de l'intelligence artificielle et de l'apprentissage machine permet d'améliorer considérablement la façon dont les soins sont dispensés aux patients. Les objets connectés médicaux effectuent

des mesures en temps réel et permettent de renseigner de nombreux paramètres influant sur la santé : poids, température corporelle, pouls, tension, rythme respiratoire, etc. Leur première utilité est l'alerte : tout changement d'un des paramètres transmis de manière brutale ou atteignant une valeur critique préalablement fixée incite à une intervention, une surveillance particulière, à des conseils ou à des recommandations.

La grande question qui motive notre étude est de savoir l'impact que pourrait avoir l'utilisation des objets connectés dans le milieu hospitalier béninois. Y a-t-il des précautions à prendre, des architectures particulières à adopter? Notre travail s'appliquera à répondre à ces différentes interrogations.

Nos objectifs spécifiques se déclinent comme suit:

- Étudier les généralités de l'IoMT (Internet of Medical Things).
- Faire une étude approfondie des technologies et architectures IoMT disponibles dans la littérature.
- Analyser les différents paramètres à prendre en compte dans le cadre du déploiement d'une solution IoMT répondant aux besoins du système hospitalier béninois.
- Proposer une approche de solution technologique IoMT adaptée aux besoins du système hospitalier béninois.

Méthodologie

Pour atteindre les objectifs ci-dessus mentionnés, nous allons adopter une méthode expérimentale qui consiste à:

- Faire une revue bibliographique qui nous permettra de:
 - présenter les fondamentaux de l'IoT.
 - exposer les spécificités de l'IoT appliqué à la santé (IoMT).
 - explorer le panorama des objets connectés liés à la santé.

- présenter les composants technologiques disponibles pour le déploiement de solutions IoMT.
- étudier plusieurs architectures de déploiement des objets connectés médicaux proposées par différents auteurs scientifiques.

Les différentes informations collectées grâce à l'état de l'art nous permettront d'identifier les principaux paramètres techniques à prendre en compte pour déployer dans le milieu hospitalier béninois des solutions IoMT efficaces et durables.

- Réaliser une étude contextuelle qui mettra en exergue les enjeux du déploiement de cette technologie dans notre pays.

Nous exploiterons pour cela les données fournies par l'OMS, le gouvernement béninois, les acteurs de la promotion de la e-santé en Afrique de l'Ouest (et au Bénin) et un sondage réalisé auprès des spécialistes de santé béninois.

- Analyser le déploiement de solutions IoMT en milieu hospitalier béninois en tenant compte des paramètres techniques et des défis contextuels relevés.

Nous pourrons ainsi proposer des solutions techniques pour relever les défis révélés par notre étude et faire des suggestions pour améliorer nos travaux.

Impact

Dans un contexte budgétaire difficile, le numérique dans le domaine de la santé offre de véritables opportunités pour améliorer l'efficacité et la qualité du système de santé ainsi que l'espérance de vie des populations. Les objets connectés en santé permettent une prise en charge de qualité des patients. Ils contribuent au renforcement de la relation patient-médecin, à une meilleure adhésion des patients aux conseils de prévention, d'hygiène de vie et aux protocoles de soins. Cette étude constitue certainement une base pour amener une révolution

technologique dans le milieu hospitalier des villes béninoises grâce à l'expansion de la e-santé.

Elle offre un répertoire des architectures de déploiement des objets connectés médicaux dans le domaine de la santé et un listing des paramètres à prendre en compte pour réussir ce déploiement. Elle propose également des approches de solutions exploitables pour intégrer de façon efficace et durable les objets médicaux dans le processus de prise en charge des patients dans un environnement hospitalier béninois.

Chapitre 1:

Revue de littérature

1. Les concepts fondamentaux de l’IoT

1.1. Les origines de l’IoT

1.1.1. Histoire de l’Internet

Le “réseau des réseaux” que nous connaissons aujourd’hui sous l’appellation “Internet” est le fruit de développements technologiques et du regroupement d’infrastructures réseaux existantes et de systèmes de télécommunications. Partant de l’idée de mettre en place un réseau informatique permettant aux utilisateurs de différents ordinateurs de communiquer, il se développa par de nombreuses étapes successives:

En 1971, les travaux de la DARPA, une agence du département de la défense américaine, ont permis de relier 23 ordinateurs sur ARPANET et le premier courrier électronique fut envoyé par Ray Tomlinson.

Les protocoles TCP (Transmission Control Protocol) et IP (Internet Protocol) sont définis en 1973 et dix années plus tard, ils sont adoptés avec le mot “Internet” et le premier serveur de nom de sites (serveur DNS) est lancé.

L’ARPANET est démilitarisé et remplacé par l’Internet civil. En 1991, Tim Berners-Lee annonce publiquement le World Wide Web et 1 000 000 d’ordinateurs connectés sont dénombrés en 1992.

La barre du milliard de sites Web est franchie en 2014 et cette année (2021) 4 600 000 000¹ d’ordinateurs sont connectés dans le monde.

1.1.2. Les différents stades d’évolution du web

Il est important de souligner que l’évolution observée entre le Web des années 90 et celui d’aujourd’hui concerne à la fois la croissance du nombre de personnes et d’objets qui l’utilisent, mais également la durée d’utilisation et les usages. Cette évolution ne devrait pas

¹ https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_d%27Internet [45]

être observée d'une façon linéaire mais plutôt comme un arbre couché dont chaque branche symbolise des familles d'usages ou des orientations comme le présente *Frédéric Cavazza* dans son article² :

Le Web 1.0 , web statique, est caractérisé par des ordinateurs fixes et offre des services fondamentaux comme: la consultation des sites, la réception et l'envoi des emails, le téléchargement de fichiers etc.

Le Web 2.0, web interactif, utilise des ordinateurs portables et permet aux internautes de générer des contenus et de profiter de logiciels en ligne. Les services sont plus ouverts et riches et permettent l'essor de communautés en ligne et des médias sociaux.

Le Web mobile, web des smartphones, permet d'accéder à une multitude de contenus et services indépendamment du temps et du lieu. Il offre également des applications et des plateformes de mise en relation.

Le Web² introduit les capteurs et les objets connectés qui permettent de collecter et de véhiculer des données très volumineuses et de tous types.

Le Web OS se substitue à nos systèmes d'exploitation et logiciels. Il s'appuie sur de gigantesques ressources disponibles dans le cloud à travers des interfaces robustes et sécurisées (les APIs).

Le Web ambiant utilise des objets connectés à des assistants numériques. Il est constitué de dispositifs (adaptés aux foyers intelligents) qui se pilotent à la voix ou toute autre interface naturelle (ex : gestes).

Le Web 3.0 fait appel aux architectures distribuées grâce à la blockchain et aux ressources informatiques pour traiter des données de façon directe par le périphérique qui les produit (edge computing).

Le Web spatial donne accès à une troisième dimension pour des expériences toujours plus immersives. Les lunettes de réalité augmentée et les casques de réalité virtuelle l'illustrent bien.

² <https://fredcavazza.net/2021/06/03/les-differents-stades-devolution-du-web/> [46]

Le Web sémantique est celui des intelligences artificielles généralistes capables de traiter tous les besoins et problèmes. Il utilise les métadonnées et des ontologies qui nous aident à structurer l'information, à la rendre lisible et compréhensible par les machines.

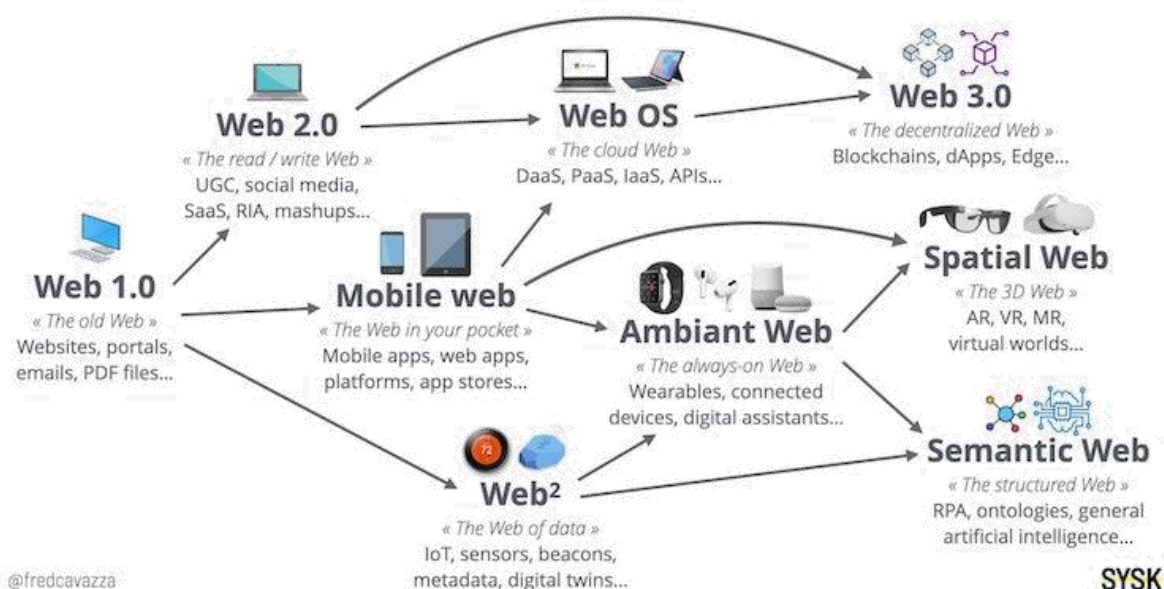


Figure 1.1: Les états d'évolution du Web³

1.1.3. Définitions de l'IoT

Dans sa Recommandation UIT-T Y.2060⁴, l'Union Internationale des Télécommunications donne les définitions suivantes:

- **Internet des objets (IoT)**: infrastructure mondiale pour la société de l'information, qui permet de disposer de services évolués en interconnectant des objets (physiques ou virtuels) grâce aux technologies de l'information et de la communication interopérables existantes ou en évolution.

NOTE 1 – En exploitant les capacités d'identification, de saisie de données, de traitement et de communication, l'IoT tire pleinement parti des objets pour offrir des services à toutes

³ <https://fredcavazza.net/2021/06/03/les-differents-stades-devolution-du-web/> [46]

⁴ <http://tiny.cc/RecommandationUITTY20> [21]

sortes d'applications, tout en garantissant le respect des exigences de sécurité et de confidentialité.

NOTE 2 – Dans une optique plus large, l'IoT peut être considéré comme un concept ayant des répercussions sur les technologies et la société.

- **Objet:** dans l'Internet des objets, objet du monde physique (objet physique) ou du monde de l'information (objet virtuel), pouvant être identifié et intégré dans des réseaux de communication.
- **Dispositif:** dans l'Internet des objets, équipement doté obligatoirement de capacités de communication et éventuellement de capacités de détection, d'actionnement, de saisie de données, de stockage de données et de traitement de données.”

On peut caractériser les types d'objets en deux groupes:

- **Les objets passifs** qui utilisent généralement un tag (puce RFID, code barre 2D). Ils embarquent une faible capacité de stockage (de l'ordre du kilo-octet) leur permettant d'assurer un rôle d'identification. Ils peuvent parfois embarquer un capteur (température, humidité) et être réinscriptibles (Exemple: puce RFID).
- **Les objets actifs** qui peuvent être équipés de plusieurs capteurs, d'une plus grande capacité de stockage, être doté d'une capacité de traitement ou encore être en mesure de communiquer sur un réseau. L'interaction de ces objets avec le monde réel permet de mesurer des données environnementales (localisation, température,...) ou des données comportementales (mouvement de personne, rythme cardiaques,...).

Deux grandes familles d'usage naissent de cette interaction:

- **Les usages avec rétroaction** qui permettent de piloter les objets à distance, d'envoyer des notifications aux fournisseurs ou aux usagers.
- **Les usages sans rétroaction** où l'IoT est utilisé pour faire une sorte de monitoring de données de mesure à but informatif et décisionnel.

Dans un cas comme dans l'autre, l'Internet des Objets utilise un ensemble de dispositifs permettant de collecter, stocker, transmettre et traiter des données issues du monde physique.

Pour croiser les approches purement techniques et les approches centrées sur les usages, nous proposons la définition suivante:

L'internet des objets est *“un réseau de réseaux qui permet, via des systèmes d'identification électronique normalisés et unifiés, et des dispositifs mobiles sans fil, d'identifier directement et sans ambiguïté des entités numériques et des objets physiques et ainsi de pouvoir récupérer, stocker, transférer et traiter, sans discontinuité entre les mondes physiques et virtuels, les données s'y rattachant.”*⁵

Pour conclure, l'IoT est un système de systèmes composé d'innovations technologiques récentes et de solutions déjà anciennes. Pour l'étudier, il est important de ne pas juste considérer une approche technique mais tenir compte du fait qu'il est aussi un système socio-technique qui prendra des formes différentes selon les choix qui seront faits par nos sociétés.

1.2. Présentation technique de l'IoT

1.2.1. Caractéristiques d'un système IoT

Le but de IoT est de mettre en place un système autonome permettant une communication intelligente et utile entre des objets physiques identifiables de façon unique grâce aux étiquettes RFID et aux réseaux de capteurs(WSN) .

Certaines caractéristiques fondamentales sont communes aux systèmes IoT:

- *Interconnectivité*: l'IoT doit pouvoir permettre d'interconnecter plusieurs dispositifs afin de générer de nouvelles applications répondant aux besoins des utilisateurs.
- *L'intelligence*: est une notion très importante de l'IoT car elle permet l'autonomie des systèmes et leurs réponses intelligentes en fonction des sollicitations et des contextes;

⁵ *l'Internet des objets, quels enjeux pour les Européens?[41]*

- *Dynamique et auto-adaptatif* : les systèmes compatibles IoT peuvent s'adapter dynamiquement aux paramètres changeants de leur contexte d'utilisation (conditions de fonctionnement, contexte de l'utilisateur, environnement détecté) et de prendre des mesures appropriées.
- *Détection*: cette fonction est un élément essentiel du système car elle permet grâce aux capteurs de percevoir et de recueillir les informations du milieu environnant
- *Auto-configuration* : avec une intervention humaine minimale, le système IoT peut s'auto-configurer afin de coopérer avec d'autres appareils conçus par différents fabricants pour fournir des fonctionnalités données. Il est aussi capable de configurer la mise en réseau et de récupérer les dernières mises à jour de logiciels.
- *Protocoles de communication interopérables* : le système IoT peut prendre en charge un certain nombre de protocoles de communication interopérables et peut communiquer avec d'autres appareils ainsi qu'avec l'infrastructure.
- *Identité unique* : Chaque appareil a un identifiant unique grâce étiquettes RFID
- *Scalabilité*: les systèmes IoT doivent rester efficaces et fonctionnels malgré la forte augmentation prévue pour les années futures.

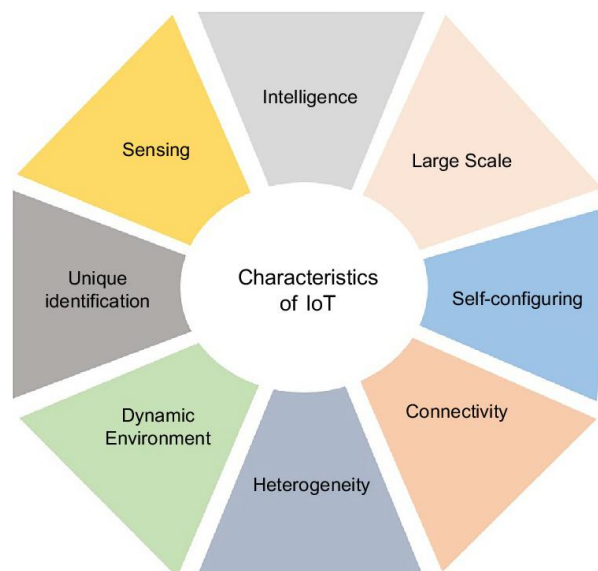


Figure 1.2 :Les caractéristiques de l'IoT⁶

⁶ Technical aspects of blockchain and IoT [24]

1.2.2. Les blocs de construction et les composants des systèmes IoT

Les objets connectés offrent différents types de services provenant de divers logiciels et ils doivent communiquer entre eux aux travers de plusieurs réseaux. Il n’y a pas une architecture commune, universelle et standard respectée par toutes les solutions IoT. Toutefois, pour la plupart des applications, chaque système IoT est construit autour de quatre blocs principaux qui peuvent être regroupés essentiellement en trois composants.

1.2.2.1. Les blocs d’une solution IoT

Le tableau ci-dessous présente les différents blocs constitutifs des solutions IoT avec leurs caractéristiques et appareils associés:

Table 1.1 : Blocs de construction, dispositifs et caractéristiques des solutions IoT

| Blocs de construction IoT | Equipements IoT | Caractéristiques |
|---------------------------|--|--|
| Objets | Capteurs | Recueille les informations du monde physique et les transmet au système informatique. La grandeur physique est traduite en un signal électrique puis est numérisée. |
| | Actionneurs | Commande l’action du système informatique sur le monde physique par un changement d’état. |
| Passerelles | | Bloc intermédiaire favorisant la connectivité entre les objets et le Cloud. Il fournit la sécurité et les capacités de gestion du flux de données. |
| Infrastructure de réseau | Routeurs, Agrégateurs, Passerelles, Répéteurs | Contrôle de flux de données entre les objets et le cloud Sécurise le flux d’information |
| Cloud | Serveurs virtuels, Unités de stockage de données | capacités analytiques, logiques et informatiques avancées. |

1.2.2.2. Les composants d'une solution IoT

Les différents blocs présentés précédemment peuvent être regroupés en trois composants. Ce regroupement facilite la compréhension du déploiement des solutions IoT. Le tableau ci-dessous présente ces composants ainsi que leurs caractéristiques:

Table 1.2: Caractéristiques des composants IoT

| Composants IoT | Caractéristiques |
|---|--|
| Objets (capteurs et actionneurs en réseau) | Collecte d'informations liées à l'application spécifique. |
| Mémoires de stockage des données brutes et traitées | Stockage des données collectées sous forme de données, textes ou vidéos. |
| Module d'analyse et de traitement | Interactions Homme-Machine, Control et traitement du flux d'informations |

Ces trois composants interagissent entre eux en mettant en oeuvre des processus décrits dans la figure suivante:

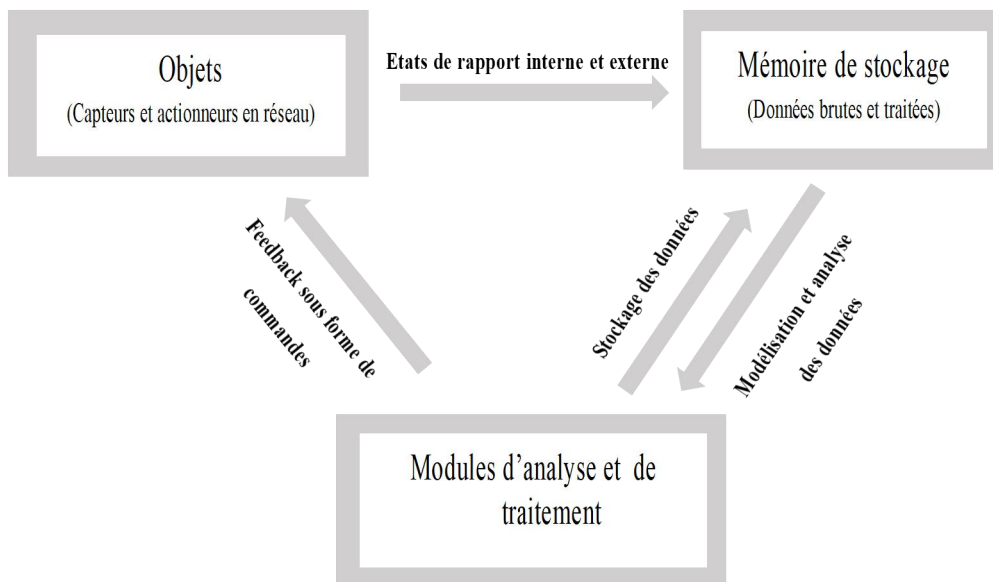


Figure 1.3: Interactions entre les composants

- Etats de rapport interne ou externe: les informations détectées par les objets sont stockées sous divers formats (data, audio, ou vidéo) au niveau de la mémoire de stockage. L'utilisateur peut définir les paramètres selon ses besoins.
- Modélisation et analyse des données: les informations brutes provenant des mémoires de stockage sont traitées au niveau des modules dédiés à partir de nombreuses procédures itératives dans le but d'obtenir les meilleurs résultats correspondant aux besoins de l'utilisateur.
- Feedback sous forme de commande: l'apprentissage interactif homme-machine et l'analyse basée sur le Cloud permettent de faire le retour d'information aux objets pour leur présentation à l'utilisateur.

1.2.3. Technologies radio pour l'implémentation de l'IoT

La mise en œuvre d'une solution IoT nécessite l'interconnexion des différents blocs de construction abordés plus haut mais aussi une communication entre les différents objets qui la composent. Les technologies utilisées pour la connectivité des objets connectés peuvent être de type non radio (basés sur la lumière infrarouge, la lumière visible ou les ultrasons) ou de type radio. Nous présentons ici les technologies sans fil les plus utilisées de nos jours et dont le choix amène à considérer les quatre paramètres suivants:

- La portée: la distance maximale permise entre les objets est liée à la puissance de sortie, la sensibilité du récepteur et la fréquence. Pour une même puissance de sortie, une même sensibilité du récepteur et un même signal, plus la fréquence est élevée, plus la portée est petite. Ainsi, en règle générale, si on double la fréquence, la portée est divisée par deux. De plus, la portée est influencée par les performances de l'antenne et de l'environnement : la portée en visée directe peut être plus de dix fois supérieure à celle à l'intérieur d'un bâtiment.

- Le débit: quantité de données transmises par la liaison sans fil par unité de temps. En raison de l'encapsulation des données utiles dans chaque protocole, le débit théorique est souvent supérieur au débit réel. Lorsque la quantité de données à transmettre est élevée, il faut choisir une technologie offrant un débit important pour réduire la durée de la transmission et gagner en consommation d'énergie.
- La topologie: la taille et la typologie d'un réseau d'objets connectés peuvent exclure l'utilisation de certaines technologies radio. Il est donc important de tenir compte de ce critère dans le choix de la connectivité.
- L'autonomie d'un objet connecté dépend de sa consommation en énergie électrique quand il transmet ou reçoit des données ou quand il est en état d'endormissement. La technologie radio choisie influence énormément l'autonomie maximale de l'objet.

Les technologies réseau les plus représentatifs de l'IoT peuvent être regroupées comme suit:

1.2.3.1. Les technologies de proximité

- Radio Frequency Identification (RFID) est une technologie de communication sans fil se présentant sous la forme de tag ou d'une carte (une puce électronique et une antenne) contenant une information. Les données sont récupérées en interrogeant le tag au moyen d'un lecteur. Le lecteur interroge ensuite une base de données dans un backend pour vérifier l'identité du tag. La portée dépend de la famille de fréquences utilisées et va d'une dizaine de centimètres à plusieurs centaines de mètres. Cette technologie constitue un moyen d'identification particulièrement utilisé, pour le suivi de marchandises notamment.
- Near Field Communication (NFC) ou communication en champ proche est une technologie de communication sans fil issue de la RFID. Elle se présente sous la forme de cartes sans contact, circonscrite à la fréquence 13.56MHz (très courte portée, environ 5cm), reposant sur le standard ISO/IEC 14443 et est dotée de fonctionnalités propres. Elle fonctionne suivant trois modes: Le premier mode permet aux smartphones de lire des

cartes sans contact. Le deuxième mode permet aux smartphones d'émuler des cartes à puce sans contact et d'être utilisés comme elles. Enfin, le dernier mode permet à deux smartphones ou autres appareils de s'apparier et d'échanger des informations grâce au NFC.

- Wireless Personal Area Network (les réseaux à courte portée WPAN) permettent le transfert de données sur de faibles distances. Souvent associés aux smartphones ou à d'autres dispositifs portables, ces réseaux sont associés aux objets connectés transportables (articles de sports par exemple) et orientés vers le bâtiment. Le tableau 3 présente une synthèse de ces technologies et de leurs caractéristiques.

Table 1.3: Technologies WPAN et leurs caractéristiques

| Réseaux à courte portée | Caractéristiques |
|----------------------------|--|
| ANT+ | Protocole propriétaire Transmission radio permettant des échanges de 20kbps Fréquence: 2,4 Ghz Mode point à point, topologie étoile Solutions portables |
| BLE (Bluetooth Low Energy) | Variante de la norme Bluetooth conçue pour consommer peu d'énergie Faibles distances (50m Vs 100m), débit moindre Fréquence: 2,4 Ghz Mode point à point Solutions portables |
| Zigbee | fréquence de 868Mhz et 2,4GHz en Europe Efficace dans les environnements à obstacles grâce à son fonctionnement en réseau maillé permettant aux objets de se connecter de proche en proche Portée entre 30m et 1500m |
| Z-Wave | Protocole propriétaire Fréquences inférieures à 1GHz Portée entre 45m et 150m Réseau maillé Solutions domotiques |
| DASH7 | nouvelle forme de transmission sans fils sur la fréquence radio de 433MHz et 1Hz permettant un débit de 27,77ko/s Portée annoncée: 1000m Solutions domotiques |

1.2.3.2. Wireless Local Area

- *Network WIFI HaLow* est une variante du WIFI sur la bande de 900 MHz soutenue pas la WIFI Alliance. Cette fréquence est adaptée pour de faibles débits mais avec une meilleure portée que les réseaux WIFI habituels. Elle se présente comme une transition vers les réseaux à longue portée et est utilisée pour les solutions domotiques.






1.2.3.3. Les réseaux à longue portée et basse consommation (Low Power Wide Area Network - LPWAN)

Il s'agit des réseaux à faible débit souvent utilisés par les entreprises qui veulent connecter leurs infrastructures à Internet, à des km de leur site d'origine. Ils sont prévus pour remonter des informations simples de capteurs et de localisation. Les principaux objectifs de ces protocoles sont: une faible consommation, une grande distance de communication (plusieurs km), la très forte densité d'objets connectables. Les tableaux ci-dessous présentent quelques-unes de ces technologies.

Table 1.4: Technologies LPWAN et leurs caractéristiques(1)

| Réseaux à longue portée | Caractéristiques |
|--|---|
| Sigfox | Protocole propriétaire repose sur une technologie radio UNB (« <i>Ultra narrow band</i> ») bande de fréquence ISM 868 MHz portée atteignant 10 km en ville et 30 à 50 km en milieu rural Déployable uniquement en interne Réseau non cellulaire |
| LoRaWAN (Low Range Wide Area Network) | réseau radio bas débit concurrent de Sigfox a souvent avec une topologie en étoile transmettre des données jusqu'à 15 km en ville et peut atteindre les 45 km en milieu rural Déployable en interne ou utilisant des réseaux nationaux ou internationaux se base sur le protocole LoRaWan Réseau non cellulaire |
| LTE-M (Long Term Evolution for Machines) | bandes de fréquences 4G débits importants (~1 Mb/sec) Réseaux cellulaires |
| NB-IoT (Narrow Band IoT) | solution standardisée qui repose sur les infrastructures 4G débit est limité à 250 Kbit/s avec une portée de 1km en ville et de l'ordre de 10km en milieu rural. La pénétration à l'intérieur des bâtiments ou en sous-sol par rapport à la couverture 2G/3G/4G Réseaux cellulaires |
| Réseaux cellulaires GSM (2G, 3G, 4G, 5G) | constitue une alternative au LTE-M et NB-IoT avec les nouveaux capteurs cellulaires pouvant transférer des quantités raisonnables de données sur des distances considérables sans vider leur batterie |

Table 1.5: Technologies LPWAN et leurs caractéristiques(2)⁷

| Wi6LABS | LoRaWAN | Sigfox | LTE Cat-M1 | NB-IoT |
|-----------------------|---|---|--|---|
| Spécification | LoRa Alliance | Sigfox | 3GPP | 3GPP |
| Fréquence | Sub-GHz ISM bande, 868MHz en UE | Sub-GHz ISM bande, 868MHz en UE | bandes LTE | bandes LTE |
| Portée intérieure (m) | >100 | >100 | >100 | >100 |
| Portée max (km) | >10 | >10 | >10 | >10 |
| Vitesse max Data | 11 kbits/s | 100 bit/s | up to 375 kbits/s | up to 62.5 kbit/s |
| Durée de vie |  |  |  |  |
| Prix du module | <5\$ | <3\$ | 13\$ + SIM | 13\$ + SIM |
| Mobilité | Lente | Non | Oui | Non |
| Taille d'un message | 243 bytes | 12 bytes | - | - |
| Utilité | Smart building and Smart city | | |  |

L'Internet des objets apporte de grandes opportunités pour tous les domaines d'activités mais présente également de grands défis d'insécurité liés aux vulnérabilités des technologies réseaux utilisées. Ainsi, 73% des organisations ont subi au moins une attaque contre des objets connectés en 2018 ⁸.

Dans la conclusion du livre blanc de Vaadata intitulé *Sécurité des Technologies sans fil de l'IoT* ⁹, il est cité deux sources principales de failles dans ces technologies sans fil :

- Les standards créés non-sécurisés où les failles ne peuvent être corrigées que si une nouvelle version de ces standards est faite.
- Les erreurs d'implémentation des standards dans les solutions elles-mêmes.

Parmi les technologies décrites, toutes, sauf la RFID, sont globalement bien sécurisées de

⁷ <https://www.wi6labs.com/2020/05/25/quelle-technologie-radio-pour-vos-objets-connectes-3eme-partie/> [24]

⁸ The IoT Revolution: Uncovering Opportunities, Challenges and the Scale of the Security Threat. Trend Micro. 2018. (p. 4) [25]

⁹ Sécurité des Technologies sans fil de l'IoT [47]

base. Pour les erreurs d'implémentation, chacune des technologies présente des pièges différents.

1.3. Architecture des systèmes IoT

1.3.1. Le modèle de référence

La définition d'un cadre logique d'interopérabilité pour l'IoT s'impose à cause de l'existence d'une multiplicité d'objets conçus par des constructeurs variés. Aucune architecture n'a été retenue comme standard pour les systèmes IoT, néanmoins des principes généraux globaux qui ont été définis et qui doivent être pris en compte dans la mise en œuvre des solutions IoT. En fonction du constructeur ou de l'objectif visé pour un type de projet IoT donné, il est possible de définir des sous-couches ou d'ajouter d'autres couches autour des briques principales mises en place.

La finalité du modèle de référence est de faciliter la standardisation et l'organisation de l'IoT, le rendant plus accessible et moins conceptuel.

Le modèle de référence de l'IoT défini par l'IUT comprend quatre couches auxquelles sont associées des capacités de gestion et de sécurité. Dans ce modèle, les systèmes complexes sont découpés pour en faciliter la compréhension. Les informations complémentaires qui y sont fournies identifient les niveaux de l'IoT et facilitent l'adoption d'une terminologie commune. A travers ce modèle, on peut identifier les parties du système où s'opèrent des types de traitements spécifiques. Il y est fourni ainsi les concepts et les définitions sur lesquels les architectures IoT peuvent être construites. La figure ci-dessous présente ce modèle:

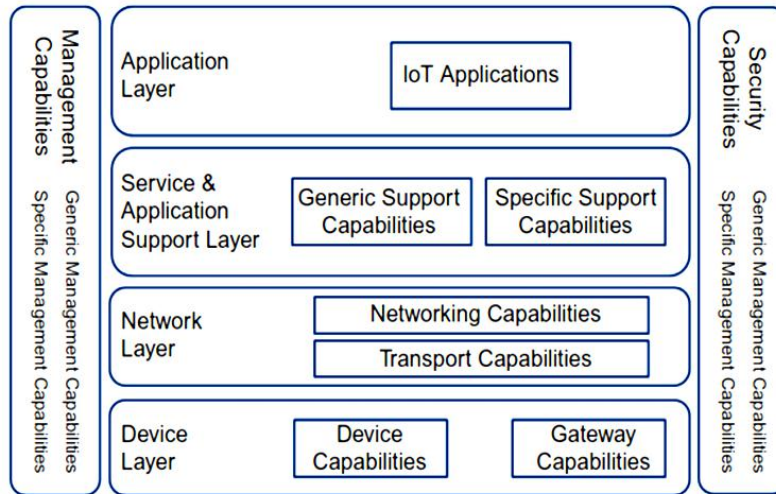


Figure 1.4: Modèle de référence de l'UIT¹⁰

Dans le tableau ci-dessous, nous présentons les quatre couches du modèle auxquelles sont associées des capacités de gestion et de sécurité:

¹⁰ <http://tiny.cc/RecommandationUITTY20> [21]

Table 1.6: Les couches et capacités du modèle de référence de l'ITU

| Couches du modèle de références | Caractéristiques |
|--|---|
| Couche application | contient les applications IoT |
| Couche de prise en charge des services et des applications | <ul style="list-style-type: none"> ■ Capacités de prise en charge génériques: capacités communément utilisées par diverses applications IoT (capacités de traitement ou de stockage de données par exemple) ■ Capacités de prise en charge spécifiques: capacités particulières répondant aux besoins d'applications diversifiées |
| Couche réseau | <ul style="list-style-type: none"> ■ capacités de réseautique: contrôle d'accès, contrôle des ressources de transport, la gestion de la mobilité ou l'authentification, l'autorisation et la comptabilité ■ capacités de transport: assurer la connectivité nécessaire pour le transport des informations propres à chaque application IoT et pour le transport des informations de contrôle et de gestion relatives à l'IoT. |
| Couche dispositif | <ul style="list-style-type: none"> ■ Capacités des dispositifs: <ul style="list-style-type: none"> - Interaction directe avec le réseau de communication (envoi et réception d'information) sans passer par une passerelle. - Interaction indirecte avec le réseau de communication (envoi et réception d'information par le biais d'une passerelle) - Etablissement de réseaux ad hoc pour les cas nécessitant une modularité accrue et un déploiement accéléré - Veille et réveil permettant de réaliser des économies d'énergie. ■ Capacités des passerelles: <ul style="list-style-type: none"> - Prise en charge d'interfaces multiples (celle de la couche dispositif et celle de la couche réseau) par le biais des technologies de communications propres à chaque couche. - Conversion de protocole dans les cas de figure où différents protocoles sont utilisés pour les communications de la couche dispositif ou pour les communications impliquant à la fois la couche dispositif et la couche réseau |
| Capacités de gestion | <ul style="list-style-type: none"> ■ capacités de gestion génériques <ul style="list-style-type: none"> - Gestion de dispositif (activation/désactivation, mise à jour logicielle, diagnostic.etc) - Gestion de la topologie du réseau local - Gestion du trafic et de l'encombrement ■ capacités de gestion spécifiques liées aux besoins propres à une application donnée. |
| Capacités de sécurité | <ul style="list-style-type: none"> ■ capacités de gestion génériques <ul style="list-style-type: none"> - au niveau de la couche application: l'autorisation, l'authentification, la confidentialité - au niveau de la couche réseau: l'autorisation, l'authentification, la confidentialité, protection de l'intégrité. etc. - au niveau de la couche dispositif: l'authentification, l'autorisation, la validation de l'intégrité du dispositif, etc. ■ capacités de gestion spécifiques liées aux besoins propres à une application donnée. |

1.3.2. Les différentes couches des architectures IoT

Comme nous l'avons expliqué dans le paragraphe précédent, il n'existe pas une architecture standard adoptée pour les systèmes IoT. Les différentes architectures IoT existantes sont rangées suivant trois grandes catégories: la classification selon les protocoles, la classification selon le domaine et la classification selon les entreprises. La figure ci-dessous nous donne un aperçu de la pluralité des architectures en couches IoT existantes.

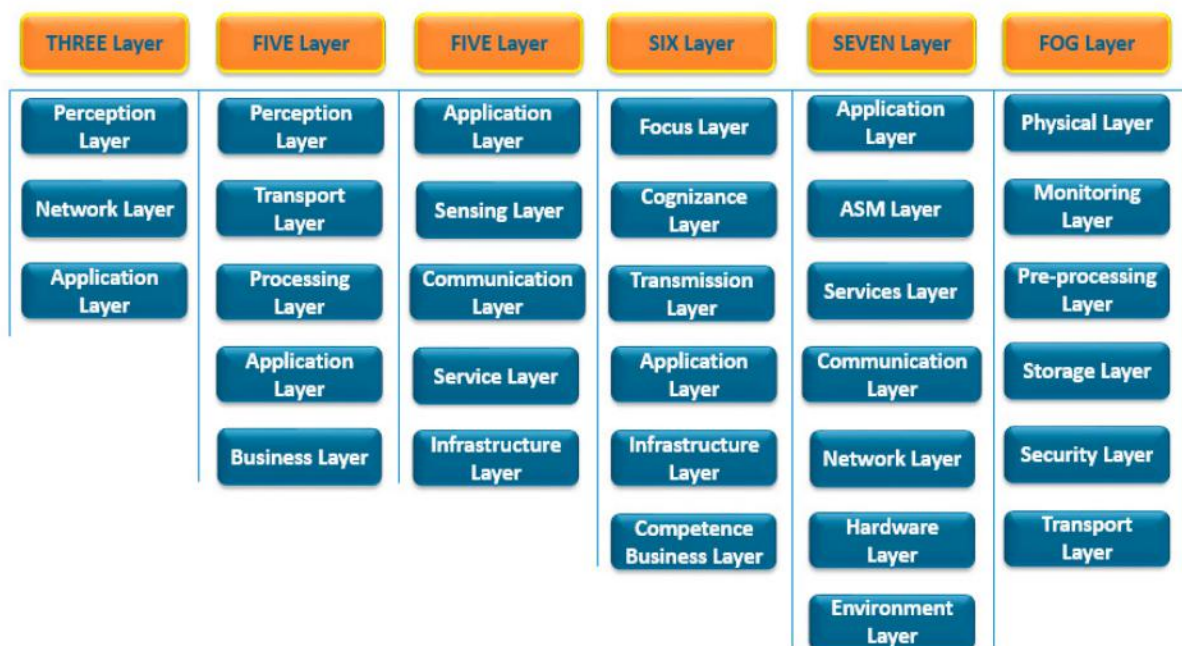


Figure 1.5: Différents exemples d'architecture IoT¹¹

■ Architecture à trois couches

L'architecture à trois couches est l'une des principales architectures IoT de base, pratique et facile à mettre en œuvre. Les trois couches présentes dans l'architecture sont la *couche perception*, la *couche réseau*, et la *couche d'application*. Ces trois couches décrivent le fonctionnement de l'IoT mais ses multiples particularités (diverses technologies et domaines d'application variés) constituent une limite pour l'efficacité de cette architecture.

¹¹ The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers [23]

■ **Architecture à cinq couches**

Les chercheurs ont développé une architecture IoT à cinq couches similaire à l'architecture à trois couches, pour combler ses insuffisances. Grâce à la couche de transport qui a été ajoutée, les informations détectées peuvent être transférées en utilisant des technologies telles que Bluetooth, RFID, etc. *La couche de traitement* récupère les données, les analyse et les traite pour permettre d'offrir une gamme variée de service. *La couche des affaires* permet de gérer l'ensemble des applications.

Une autre variante de l'architecture à 5 couches est constituée de:

- *la Couche d'application* qui collecte les informations sur les différentes tâches à effectuer selon les besoins du client.
- *la couche de détection* qui permet une interaction entre la couche d'application à l'aide d'un interface de capteurs et de dispositifs électroniques.
- *la couche de communication* qui agit comme un pont d'information permet la communication entre les couches de détection et de service pour la transmission des données.
- *la couche service* permet d'effectuer les activités requises par le client.
- *la couche infrastructure* crée les technologies orientées services comme la cartographie SIG, l'informatique en nuage, les big data, la facilité de stockage de l'informatique cognitive.

■ **Architecture à six couches**

Dans le but de faciliter la compréhension et l'intégration d'applications plus vastes (deux applications ou plus), une nouvelle architecture IoT à six couches est proposée par les chercheurs. Elle ajoute aux architectures existantes *une couche de focalisation, une couche de connaissance et une couche de compétence professionnelle*.

Cette nouvelle architecture à six couches permet au système IoT de se concentrer sur plusieurs domaines et d'analyser leurs impacts sur la valeur commerciale .

■ **Architecture à sept couches**

Cette architecture tient compte de l'environnement local proche des dispositifs, des objets de

détection, etc. Elle permet à l'utilisateur de prendre en compte divers facteurs qui affectent les capacités de détection des capteurs ou des actionneurs. Elle est composée de:

- *la couche d'application* collecte les informations sur les différentes tâches à effectuer selon les besoins du client.
- *la couche de contrôle et de gestion* permet d'avoir un contrôle complet de la gestion et de la sécurité du système IoT.
- *la couche de services* permet de réaliser les activités requises par le client.
- *la couche de communication* fournit un lien de communication entre les couches de détection et de services pour la transmission des données.
- *la couche réseau* permet la transmission et le traitement de l'information avec la connectivité Internet des différents dispositifs.
- *la couche matérielle* permet d'intégrer tous les composants matériels nécessaires à la mise en œuvre de l'IoT.
- *la couche environnement* rend possible la détection des objets ou des lieux qui sont sous observation. Elle a la capacité d'observer les "objets physiques en mouvement, tels que les humains, les voitures, les facteurs environnementaux tels que la température ou l'humidité".

■ **Architecture basée sur le fog et le cloud computing**

Le *Cloud Computing* est un nouveau modèle informatique qui fournit des ressources configurables auxquelles on peut accéder par Internet quelque soit notre situation géographique. L'utilisation des ressources est contrôlée et facturée sur la base d'un paiement à l'utilisation. Le cloud computing fournit différents types de services tels que Software-as-a-Service (SaaS), Platform-as-a-Service (PaaS), Infrastructure-as-a-Service (IaaS) et Base de données-as-a-Service (DBaaS). C'est une technique souple et évolutive qui permet d'offrir à un système IoT des services tels que: les options de stockage de l'information, des outils logiciels et analytiques, une plateforme adaptée et une infrastructure de base pour le développement. Cette technologie permet à l'utilisateur de disposer d'options de visualisation, d'apprentissage automatique, d'analyse de données pour des ensembles d'informations plus

vastes. Dans la plupart des architectures IoT un contrôle centralisé des données est effectué à l'aide de systèmes de traitement des données basés sur le cloud dont la couche dédiée se situe entre les applications et le réseau des objets.

Cette technologie permet aux petites organisations qui ne peuvent pas réaliser d'importants investissements en capital d'acheter des ressources virtualisées telles que les réseaux, le stockage et d'autres éléments nécessaires à la maîtrise opérationnelle. Il existe différents modes de déploiement du Cloud computing: le cloud privé, le cloud public, le community cloud et le cloud hybride.

L'architecture basée sur le Fog Computing se présente comme étant la plus évoluée et la plus aboutie de l'heure. Dans le fog, l'analyse des données est répartie en périphérie au niveau des capteurs et des réseaux de passerelles et le modèle architectural final est beaucoup plus complexe que celle du fog computing.

On y retrouve les couches suivantes:

- la couche physique où les données sont analysées
- la couche de surveillance qui vérifie les ressources disponibles, les services demandés par les utilisateurs, et les diverses réponses.
- la couche de pré-traitement aide à analyser les données en les filtrant.
- la couche de stockage où les données sont stockées dans différents formats selon les besoins avec des protocoles appropriés.
- la couche de sécurité aide à offrir un statut de confidentialité au flux de données.

La figure ci-dessous nous présente les couches dédiées au traitement des données pour les deux technologies considérées.

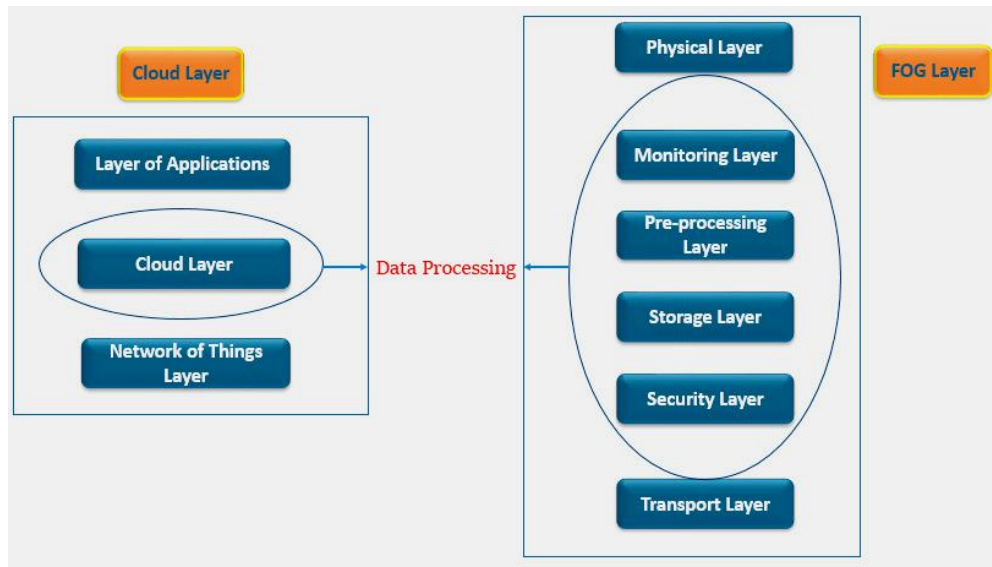


Figure 1.6: Traitement de données dans les architectures IoT basées sur le Cloud et le Fog computing [23]

Dans le tableau 7 nous faisons une comparaison des caractéristiques les plus importantes du Cloud et du Fog computing, les éléments sont tirés de *Fog Computing vs Cloud Computing pour les projets IoT*¹².

¹² <https://www.sam-solutions.com/blog/fog-computing-vs-cloud-computing-for-iot-projects/> [27]

Table 1.7: Comparaison des caractéristiques les plus importantes du Cloud et du Fog computing

| | Cloud | Fog |
|------------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Architecture | Centralisée | Distribuée |
| Communication avec les équipements | A distance | Directement depuis les périphéries |
| Traitement de données | Loin de la source | Proche de la source |
| Capacités de traitement | Elevé | Faible |
| Nombre de nœuds | Faible | Elevé |
| Analyse de données | Long terme | Court terme |
| Temps de latence | Elevé | Faible |
| Connectivité | Internet | Protocoles et standards variés |
| Sécurité | Faible | Elevée |

1.4. Challenges et Marchés de l'IoT

1.4.1. Les grands défis de l'IoT

Nous abordons dans cette section quelques grands défis inhérents aux systèmes IoT et liés à l'évolution rapide du processus de développement de l'IoT et des applications polymorphes associées. En effet, la nécessité de fournir aux utilisateurs finaux une expérience omniprésente, unifiée et transparente conduit à considérer avec attention des aspects tels que: les normes technologiques, l'interopérabilité des composants de module selon les exigences hétérogènes des applications, le faible coût et la faible puissance active des terminaux, la confidentialité et la sécurité de bout en bout.

- **L'évolutivité** des systèmes IoT est devenue d'autant plus préoccupante que le nombre d'appareils nécessitant une connexion simultanée s'accroît. Deux types de problèmes d'évolutivité sont à soulever l'évolutivité verticale (liée à à l'ajout ou à la suppression de ressources informatiques d'un nœud IoT) ou l'évolutivité horizontale (liée à l'ajout ou à la

suppression d'un nœud IoT). La proposition du Cloud computing et des architectures basées sur le cloud se focalisent particulièrement sur ce défi.

- **La sécurité et la confidentialité** des systèmes IoT constituent une préoccupation importante pour cette technologie. La RFID et les versions plus récentes de la 5G contribuent à la résolution de ces problèmes du point de vue matériel. En termes de logiciel, le système de gestion de clés (KMS) avec une fonctionnalité de réseau de confiance zéro et une blockchain répondent rapidement aux menaces de confidentialité et de confiance avec des fonctionnalités de sécurité renforcées. Il faut considérer ce défi comme un objectif important pour l'intégrité et les performances optimales des écosystèmes IoT.
- **L'auto-organisation** dans les systèmes IoT permet d'influencer le comportement de ces systèmes pour les maintenir dans les limites souhaitées quand les environnements auxquels ils appartiennent changent de façon automatique et coordonnée. Cette approche permet de mettre en place un système de gestion autonome et proactif du réseau malgré la prolifération des nœuds IoT. Un intérêt de recherche important est noté dans ce cadre pour assurer la robustesse et la survie du futur réseau IoT. Les études se focalisent sur des aspects tels que le traitement de l'interopérabilité hétérogène du système, la conception de protocoles d'auto-organisation optimaux et de stratégies de routage pour les réseaux IoT hétérogènes distribués à grande échelle, et les optimisations du comportement de la plateforme.
- **L'efficacité écoénergétique** reste au cœur des actions des chercheurs. Plusieurs approches ont été mises en œuvre à cet effet:
 - réduire le nombre de sauts en développant des protocoles de routage économes en énergie et optimiser l'état des liaisons de communication
 - adopter des stratégies de veille basée sur le trafic réseau et réduire des données via le contrôle de la topologie du réseau
 - mettre en place des stratégies d'équilibrage de charge et incorporer parallèlement des dispositifs d'énergie renouvelable

- développer des nœuds de capteurs à énergie nette zéro et exploiter les mécanismes de recharge sans fil pour résoudre le problème fondamental de la gestion de l'alimentation.

- **La détection** constitue un élément essentiel des réseaux de capteurs IoT et sans fil car l'exactitude en précision, la justesse et l'intégrité du capteur sont déterminants pour la validité de l'inférence post-traitement. Les avancées ultérieures dans les techniques ML et la caractérisation RF sont envisagées pour faire de la détection RF une partie intégrante des réseaux IoT.

Nous venons de décrire ici quelques-uns des défis importants dans l'IoT en abordant des problèmes importants tels que l'évolutivité, l'auto-organisation, la sécurité, l'efficacité énergétique et la précision des capteurs. L'avènement de nouvelles technologies et applications favorisent la découverte de nouveaux défis et lacunes qui doivent être comblés par des politiques et des réglementations bien définies pour des solutions IoT efficaces et profitables pour la société.

1.4.2. Les applications de l'IoT

Dans l'article «*Internet des objets (IoT) - statistiques et faits*»¹³, nous avons quelques chiffres clés du marché mondial de l'IoT :

«Le marché mondial de l'électronique et des communications des terminaux de l'Internet des objets (IoT) du gouvernement générera un total de 14,7 milliards de dollars américains de revenus en 2020. ... L'année 2021 verra une croissance de ce marché qui devrait atteindre 17,4 milliards de dollars US de chiffre d'affaires.»¹⁴

«En 2021, la valeur du marché mondial de l'Internet des objets agricole et industriel devrait s'élever à environ 4,02 milliards de dollars américains. Le marché de l'IoT agricole devrait croître au cours des prochaines années, atteignant près de sept milliards de dollars américains

¹³ https://www.statista.com/topics/2637/internet-of-things/#dossierSummary_chapter5 [28]

¹⁴ <https://www.statista.com/statistics/1224790/government-iot-endpoint-revenue-by-use-case/> [42]

d'ici 2025, alors que l'agriculture intelligente est de plus en plus adoptée.»¹⁵

«En 2019, les revenus du marché des capteurs IoT s'élevaient à plus de 11,9 milliards de dollars américains dans le monde, les prévisions prévoyant que ce nombre passera à environ 43 milliards d'ici 2025.»¹⁶

« *Le Covid-19 a mis en lumière le rôle crucial que l'IoT est venu jouer dans nos vies, estime Jasaswini Biswal, analyste chez GlobalData, L'adoption de plusieurs cas d'usage de l'internet des objets a progressé pendant la pandémie. On peut par exemple citer la mise en place de caméras thermiques pour détecter des personnes potentiellement infectées ou encore celle de capteurs permettant de mesurer le taux d'occupation des bureaux.* »¹⁷

En 2020, GlobalData a mené une étude qui lui a permis de conclure que la multiplication des déploiements d'objets connectés a facilité l'acceptation de leur présence par les utilisateurs. Chaque jour, l'Internet des Objets s'infiltré dans de nouveaux domaines et donne naissance à de nouvelles applications. Les cas d'usages les plus éprouvés se concentrent cependant dans certains secteurs plus matures que d'autres.

Dans le domaine du transport, le nombre des véhicules intelligents est en pleine croissance, les constructeurs automobiles équipent les nouvelles voitures de capteurs et des moyens de communication pour traiter la congestion du trafic, la sécurité, la pollution et le transport efficace des marchandises, etc. L'objectif est qu'une voiture soit capable de communiquer de façon autonome avec d'autres véhicules ou une centrale de surveillance pour prévenir les accidents et réduire les coûts d'assurance.

Le secteur de la santé a connu une très grande révolution grâce à l'utilisation des dispositifs et applications médicaux qui se connectent aux systèmes informatiques de santé par le biais de réseaux informatiques en ligne. La question de la sécurité des données sensibles qui transitent par l'IoMT est une préoccupation croissante pour les prestataires de soins de santé.

¹⁵ <https://www.statista.com/statistics/1222813/worldwide-agricultural-industrial-iot-market-value/> [43]

¹⁶ <https://www.statista.com/statistics/993778/worldwide-internet-of-things-sensors-market-size/> [44]

¹⁷ <https://www.distributique.com/actualites/lire-le-marche-de-l-iot-pesera-mille-milliards-de-dollars-en-2024-31345.html> [48]

La domotique regroupe l'ensemble des technologies permettant l'automatisation des équipements d'un habitat. Elle apporte du confort et permet de faire des commandes à distance, d'optimiser la consommation de l'énergie et de gérer la sécurité et la communication.

L'agriculture intelligente a pour objet de renforcer la capacité des systèmes agricoles, de contribuer à la sécurité alimentaire en intégrant le besoin d'adaptation et le potentiel d'atténuation dans les stratégies de développement de l'agriculture durable. L'imagerie satellitaire et l'informatique sont mises à contribution par l'utilisation des capteurs qui collectent les informations utiles sur l'état du sol, taux d'humidité, taux des sels minéraux, etc. afin de prendre les mesures nécessaires pour une bonne production.

La sécurité IoT des biens et des personnes est un domaine d'intérêt pour les fabricants d'objets connectés. Que ce soit dans les bâtiments à usage professionnel ou privé, plusieurs dispositifs connectés existent pour la protection des biens et des personnes. Ils peuvent être constitués d'un système de surveillance, de détection de chute, d'immobilité ou d'intrusion permettant de signaler une situation d'urgence et de contacter les secours.

Le Smart Grid ou réseau intelligent fait appel à un réseau de capteurs, et à des dispositifs de transmission et d'analyse informatique des données en temps réel. Il permet ainsi de mettre en place un système de distribution d'énergie électrique qui adapte automatiquement, en autonomie, la production à la demande.

2. L'IoMT: IoT au service de la santé

2.1. Numérisation des pratiques et produits dans le domaine de la santé

2.1.1. La e-santé

Depuis plusieurs années, le secteur de la santé a été influencé par la transformation digitale qu'apportent les technologies de l'information et la communication. Nous rencontrons dans la littérature plusieurs termes découlant de cette transformation. Dans ce paragraphe nous définissons quelques-unes des expressions propres au vocabulaire de la santé numérique dont la synthèse se trouve à la figure 8.

- **L'e-santé** (ou santé numérique) fait référence à « l'application des technologies de l'information et de la communication (TIC) à l'ensemble des activités en rapport avec la santé ». (extrait du « *Petit guide d'exploration de la santé numérique* » publié en 2015 par la Fondation de l'Avenir)¹⁸. Selon John Mitchell, elle désigne "l'usage combiné de l'internet et des technologies de l'information à des fins cliniques, éducationnelles et administratives, à la fois localement et à distance".
- **Les systèmes d'informations de santé** (SIS) ou hospitaliers (SIH) : coordonnent, au niveau informatique, les échanges d'informations au sein d'un établissement de santé (Dossier Patient Informatisé) ou d'un territoire de soin (Systèmes d'Information partagé de santé)
- **La télémédecine** permet au patient de bénéficier des soins à distance. Cinq catégories d'actes médicaux sont concernés: la téléconsultation, la téléexpertise, la télésurveillance, la téléassistance, et la régulation médicale.
- **La santé mobile** (mHealth, Mobile Health ou m-santé): recouvre "les pratiques médicales et de santé publique reposant sur des dispositifs mobiles, tels que téléphones portables, systèmes de surveillance des patients, assistants numériques personnels et autres appareils sans fil" (Organisation Mondiale de la Santé, 2011).¹⁹

¹⁸ https://www.fondationdelavenir.org/wp-content/uploads/2015/11/2015_petitguide_sante_numerique.pdf [29]

¹⁹ https://ireps-bfc.org/sites/ireps-bfc.org/files/dt_ocs_promotion_sante_version_finale.pdf [30]

La e-santé regroupe principalement deux domaines: *les systèmes d'informations de santé (SIS) ou hospitaliers (SIH) et la télésanté*. La télésanté englobe quant à elle la télémédecine et la santé mobile.

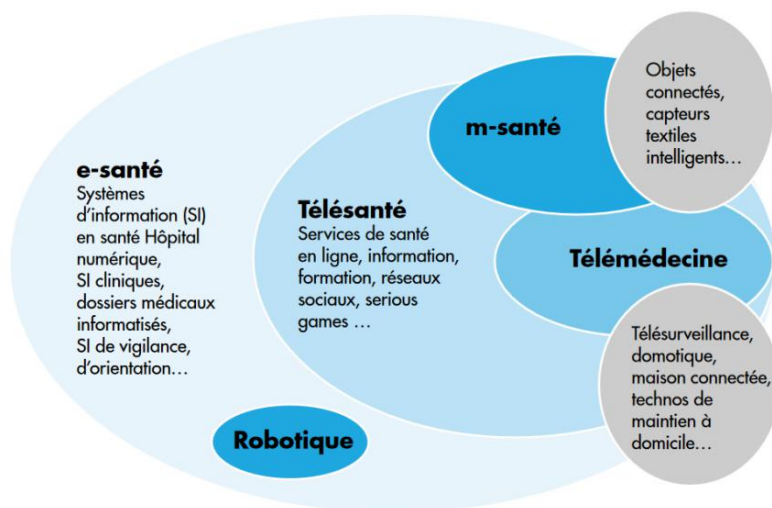


Figure 1.7: De la e-santé à la santé connectée (Source CNOM)²⁰

2.1.2. Les solutions IoT pour les soins de santé

L'IoT influence grandement le secteur des soins de santé et du bien-être. L'Internet des objets médicaux (IoMT) est le résultat de l'implication des technologies de l'IoT dans le secteur de la santé et du bien être. Il s'agit d'une vaste collection de capteurs médicaux et de l'infrastructure associée: l'ensemble des dispositifs et applications médicaux qui se connectent aux systèmes informatiques de santé par le biais de réseaux informatiques en ligne. Les dispositifs médicaux équipés d'une technologie de télécommunications permettent la communication de machine à machine qui est à la base de l'IoMT. Ces appareils sont reliés à des plateformes en Cloud, sur lesquelles les données saisies peuvent être stockées et analysées. L'IoMT est également connu sous le nom "IoT des soins de santé".

²⁰ <https://www.conseil-national.medecin.fr/sites/default/files/medecins-sante-connectee.pdf> [31]

Les applications de l'IoT pour les soins de santé sont retrouvés à plusieurs niveaux:

- *IoT pour les patients*: cette technologie permet aux patients de prendre une part active dans le processus de soins et aussi dans la prévention. Les équipements dédiés dans ce cas sont appelés **des objets connectés à usage purement personnel** qui fournissent à l'individu des notifications, des alertes, des chiffres, des courbes, des conseils personnalisés, des objectifs à atteindre. Il s'agit pour la plupart des dispositifs portables qui permettent de surveiller certains signes vitaux tels que la fréquence cardiaque, la pression artérielle, etc. Ils peuvent ainsi maintenir une bonne santé ou améliorer leur quotidien, via le sommeil, un bon rythme d'activité physique, ou une bonne alimentation. Les patients âgés ou ceux qui ont besoin d'un suivi constant à domicile peuvent ainsi alerter le personnel soignant grâce aux objets connectés médicaux.
- *IoT pour les médecins*: Le personnel de santé utilise **des objets connectés à usage médical** qui servent de soutien pour collecter des informations sur le patient, le surveiller ou même intervenir à distance à temps réel (exemples: rappel d'une prise de traitement, le contrôle du taux de glucose en toute autonomie, la mesure du niveau de tension).

Les données collectées à partir des objets médicaux aident le personnel soignant à définir le meilleur processus de traitement correspondant à leurs patients. Ils peuvent également suivre l'adhésion des patients aux plans de traitement et augmenter leur vigilance dans la prise en charge des patients.

- *IoT pour les compagnies d'assurance maladie*: A la lumière des décisions basées sur les données collectées par l'IoT, il est possible d'évaluer la transparence entre les assureurs et les clients dans les processus de souscription, de tarification, de traitement des sinistres et d'évaluation des risques.
- *IoT pour les hôpitaux* constitue le sujet d'intérêt de notre étude. Cette technologie peut être utile aux hôpitaux dans de nombreux domaines: le suivi de l'emplacement en temps réel d'équipements médicaux (fauteuils roulants, pompes à oxygènes, équipements de surveillances, etc.), l'analyse en temps réel du déploiement du personnel médical, la gestion des actifs, le contrôle des stocks, la surveillance de l'environnement,

la surveillance des patients en hospitalisation. Les soins traditionnels de santé deviennent des soins de santé intelligents grâce à l'adoption par les agents de santé des objets médicaux connectés et de diverses applications mobiles.

Le marché des soins de santé fonctionne à travers cinq segments : les hôpitaux, les produits pharmaceutiques, les diagnostics, les équipements et fournitures médicaux et la télémédecine.

La télémédecine peut combler le fossé entre les soins de santé ruraux et urbains. Elle permet de faibles coûts de consultation, des moyens de diagnostic à distance et peut atteindre les zones les plus reculées. L'IoT permet également de suppléer au déficit créé par l'effectif insuffisant du personnel de santé. L'IoT dans la télémédecine est un secteur en pleine expansion grâce aux progrès des technologies liées à l'Internet et aux télécommunications.

2.1.3. Acteurs et marché de la E-santé

2.1.3.1. Les tendances du marché

Au contact du numérique, plusieurs secteurs du monde industriel se trouvent contraints de disparaître pour faire place à d'autres plus efficaces, le domaine de la santé est plutôt sujet à de profondes transformations. Alors qu'en 2016, les revenus de l'IoT liés aux soins de santé étaient de 24 milliards de dollars américains dans le monde, les prévisions pour 2025

annoncent une augmentation allant jusqu'à de 135 milliards de dollars américains²¹. La figure 6 nous montre les prévisions mondiales de la part de marché de la sécurité IoT dans le secteur de la santé en 2018 et 2028, par région.

²¹ <https://www.statista.com/statistics/997959/worldwide-internet-of-things-in-healthcare-market-size/> [32]

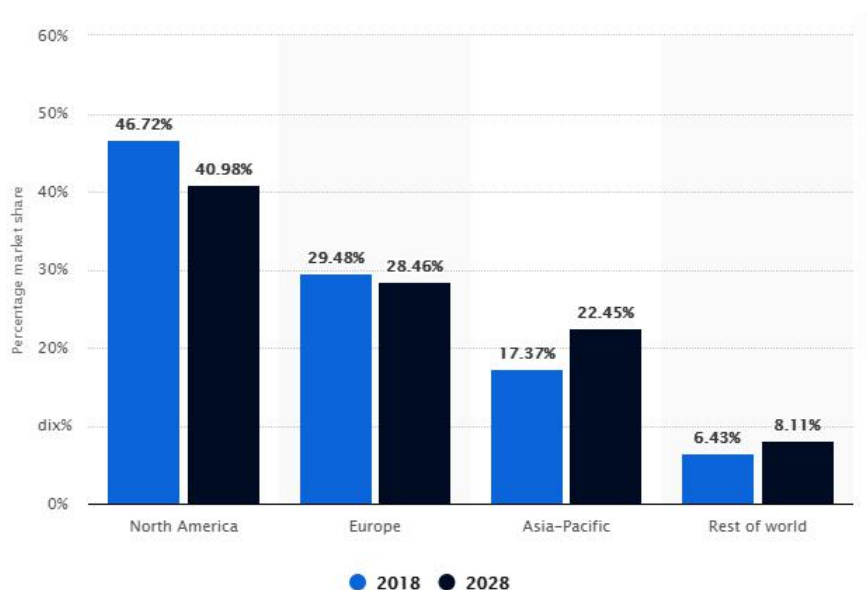


Figure 1.8: Part de marché de la sécurité mondiale de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine de la santé en 2018 et 2028, par région²²

On constate un rapprochement des acteurs du numérique et ceux de la santé afin de répondre aux nouveaux enjeux du domaine et fournir des solutions satisfaisant les besoins des patients ou des professionnels. L'introduction des capteurs, des dispositifs portables et des technologies numériques commence en effet à remplacer le check-up traditionnel. Les acteurs historiques du secteur de la santé développent des fonctionnalités de connectivité à des produits traditionnels. Ils anticipent aussi les tendances futures et mettent en place des stratégies spécifiques. Le graphique ci-dessous donne une idée de la répartition des différents segments de marché de la santé numérique de 2013 à 2020 ²³.

²² <https://www.statista.com/statistics/1033013/healthcare-iot-security-market-share-forecast-worldwide-by-region/> [34]

²³ <https://fr.statista.com/statistiques/577681/valeur-du-marche-mondial-de-la-sante-numerique-par-segment--2020/> [35]

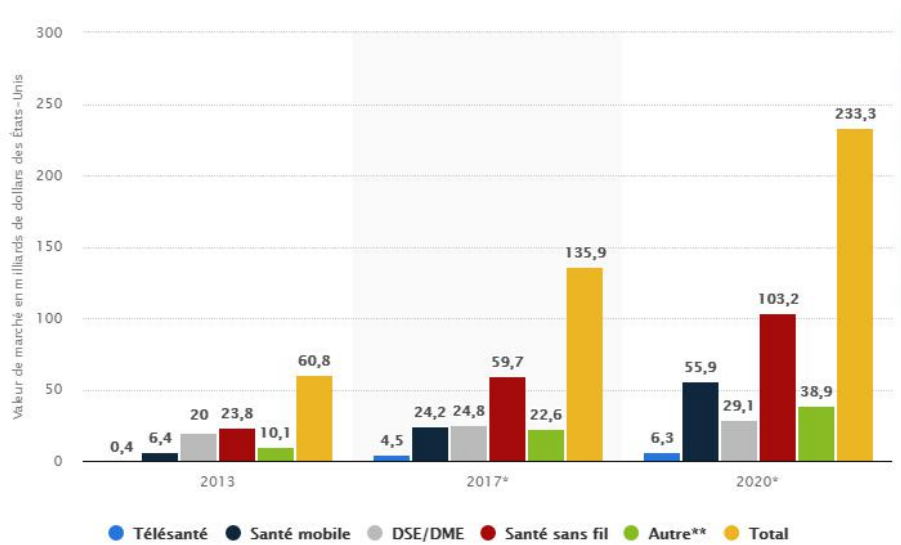


Figure 1.9: Marché mondial de la santé numérique de 2013 à 2020 par segment(en milliards de dollars des États-Unis)[16]

2.1.3.2. Les acteurs de la digitalisation du domaine de la santé

Depuis quelques années, on note une grande effervescence au niveau de l'innovation des objets médicaux connectés et le nombre de demandes de brevet est en pleine augmentation. Le graphe ci-dessous nous présente 11 367 familles de brevets identifiés entre 1997 et 2017 lors de leur première année de publication. Il témoigne du rythme soutenu auquel la technologie évolue et de l'effort consenti par chaque partie pour conserver un avantage compétitif en protégeant son invention.

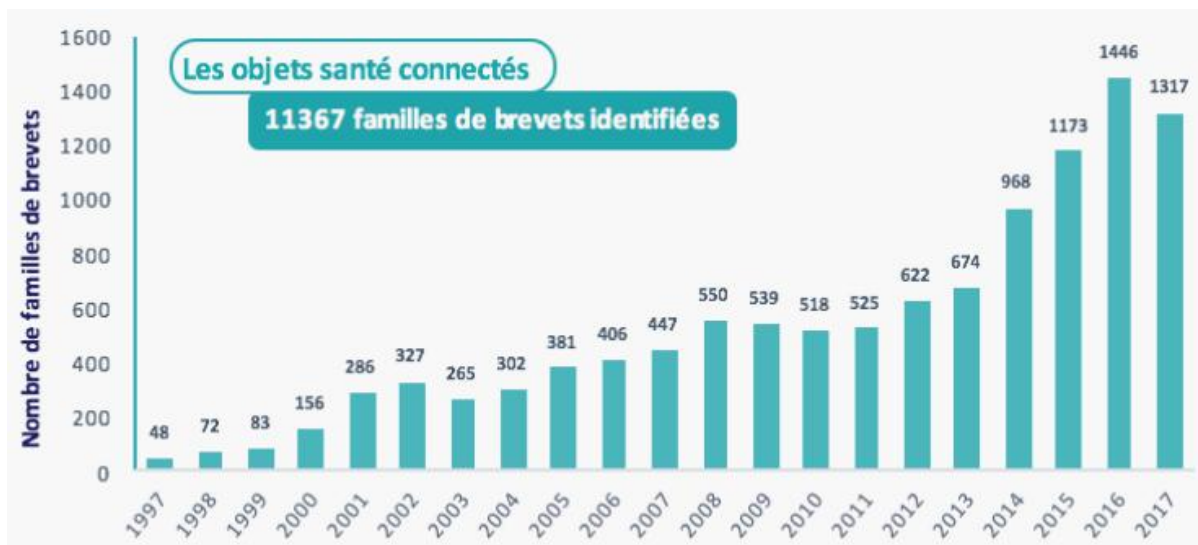


Figure 1.10: Familles de brevets identifiées entre 1997 et 2017²⁴

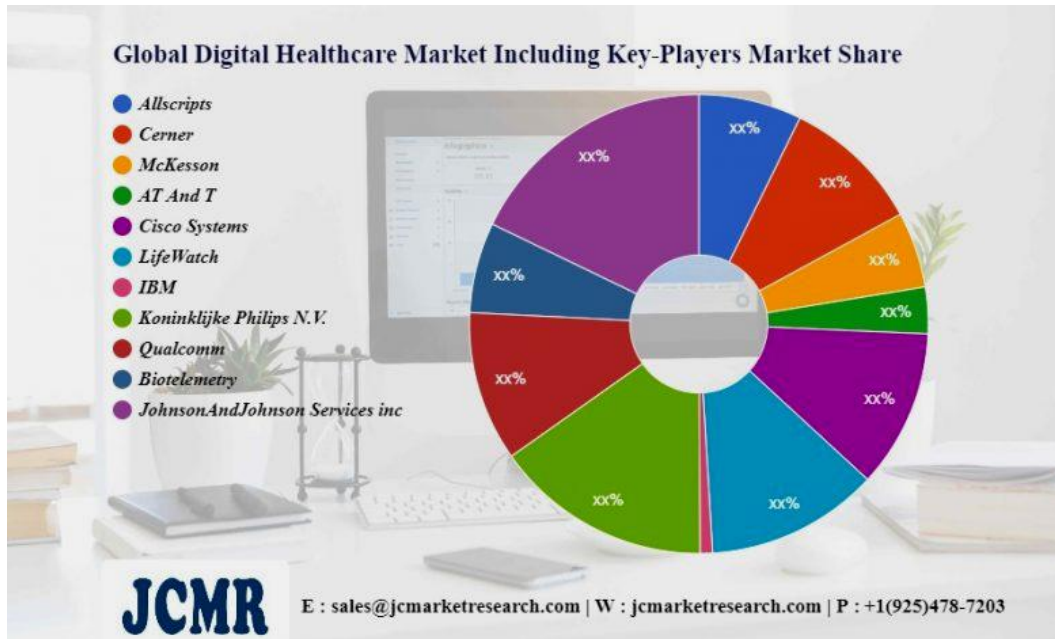
Les brevets sont majoritairement étendus aux États-Unis (69%), via la procédure PCT WO [Patent Cooperation Treaty] (43%), via la procédure européenne (30%), en Chine (28%), au Japon (19%) et au Canada (12%). Il faut noter que ces pays confirment les lieux où se situent les marchés les plus porteurs de la technologie pouvant garantir aux sociétés un avantage concurrentiel. Un classement effectué en 2017 par Ouest Valorisation, nous présente les 25 principaux déposants au niveau mondial dans le domaine²⁵. Parmi ces derniers, 72% sont d'origine américaine. Les cinq premiers déposants mondiaux sont Medtronic, Philips, Boston Scientific (Cardiac Pacemakers Inc), Samsung Electronics et Abbott Diabetes Care détiennent environ 13% des demandes de brevets au total sur la thématique.

Un rapport²⁶ été récemment publié par JMCR sur les principaux géants de la technologie avec les perspectives du marché de la santé numérique entre 2021 - 2029. La figure ci-dessous nous présente certains de ces acteurs clés et leur influence sur le secteur.

²⁴ LE « BOOM » DES OBJETS CONNECTÉS EN SANTÉ [26]

²⁵ <https://www.ouest-valorisation.fr/uploads/2021/05/Dossier-The%CC%81matique-Objets-sante%CC%81-connecte%CC%81s.pdf> [26]

²⁶ <https://jcmarketresearch.com/report-details/1429185/sample> [49]



F

Figure 1.11: Les principaux actuels géants des soins de santé numérique 2021-2029 [49]

2.2. Technologies et architectures de déploiement des objets médicaux connectés

2.2.1. Technologies IoT adaptées aux soins de santé intelligents

Les objets connectés médicaux possèdent les caractéristiques standards suivantes:

- *une identité unique*
- *une auto-adaptabilité et dynamisme*: capacité de s'adapter aux changements de contexte et prendre des décisions basées sur les conditions de fonctionnement.
- *une auto-configuration* pour permettre à un nombre large d'objets de fonctionner ensemble afin de fournir un service (capacité d'établissement de réseau, de mise à jour de logiciel).
- *une interopérabilité* : capacité de fonctionner sur des plateformes matérielles différentes et supporter un grand nombre de protocoles de communication et échanger avec l'infrastructure.

Les équipements utilisés pour déployer les solutions IoT pour les soins ne diffèrent pas de ceux présentés dans notre paragraphe 1.2.2.2. Nous voulons juste décrire ici les spécificités à considérer à cause du domaine d'application qui est la santé numérique.

■ **Les capteurs corporels**

Le réseau mondial de dispositifs et d'applications médicaux interconnectés est connu sous le nom d'Internet des objets médicaux (IoMT). Les capteurs sont les principaux composants de l'IoMT; ils peuvent être déployés et surveillés à distance pour offrir des services de santé optimaux.

Dans un contexte clinique, l'IoMT est utilisé pour surveiller les signes vitaux via des tableaux de bord afin de visualiser les données des patients (la température, l'ECG, la pression sanguine, la saturation en oxygène du sang, etc).

Dans un contexte non clinique, l'IoMT peut être utilisé pour fournir des informations en temps réel pour la logistique et l'efficacité opérationnelle en suivant les actifs et les personnes à l'intérieur de l'hôpital (suivi des biens, le suivi de la localisation des médecins, la conformité aux normes d'hygiène, la localisation des ambulances en cas d'urgence).

Les capteurs/objets dans le domaine des soins de santé peuvent être classés en deux grandes catégories :

- *les capteurs cliniques*: ce sont les capteurs portables et les capteurs implantables, Ils peuvent être portés sur le corps ou intégrés à des vêtements. Dans le domaine des soins de santé, ces capteurs peuvent être utilisés principalement pour recueillir plusieurs paramètres vitaux d'un patient et transmettre les données collectées aux médecins à distance pour prendre les décisions appropriées (exemple: les capteurs de pouls, les capteurs de fréquence respiratoire, les capteurs de température corporelle, les capteurs de pression sanguine, etc.)

- *les capteurs non cliniques*: ce sont les capteurs de suivi des biens/équipements, les capteurs de localisation, et les capteurs pour les dispositifs existants.

■ Le Cloud Computing

La collecte et l'acheminement des données issues de la multitude de capteurs utilisés pour l'IoMT nécessitent l'utilisation du réseau Internet pour être stockées et traitées grâce au Cloud Computing. Ce processus prend beaucoup de temps et cause un problème de latence qui constitue un vrai handicap pour les services de soins de santé d'urgence. L'une des façons de réduire cette latence est d'utiliser le Fog Computing.

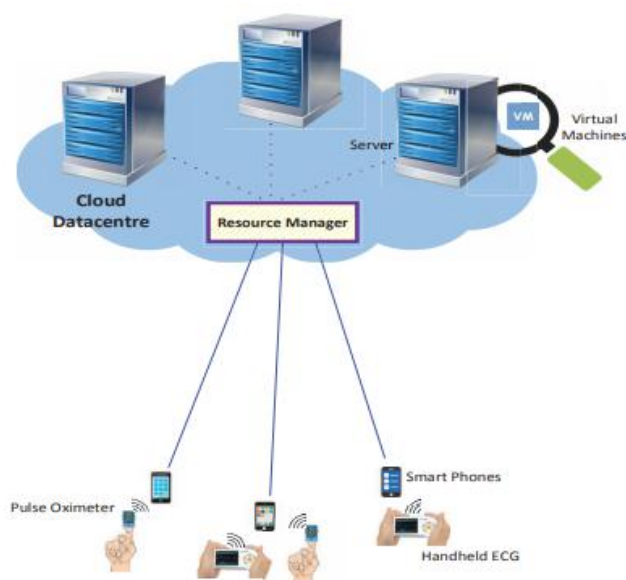


Figure 1.12: Exemple d'architecture d'un système de santé basé sur le Cloud²⁷

■ Le Fog Computing

Le Fog Computing est une norme qui définit la manière dont l'informatique de périphérie doit fonctionner et qui facilite les opérations de services de calcul, de stockage et de mise en réseau entre les dispositifs finaux et les centres de données du Cloud Computing.

²⁷ Cloud-Fog Interoperability in IoT-enabled Healthcare Solutions (page 5) [6]

Cette technologie permet de déplacer le traitement des données du nuage vers les capteurs. Elle réduit la latence et permet aux médecins et aux cliniciens de fournir des soins de santé d'urgence. Inventé à l'origine par Cisco, le fog computing utilise les capteurs, des passerelles de réseau ou des passerelles locales pour stocker et effectuer un traitement préliminaire des données. Au niveau d'un nœud de cette technologie, nous avons des fonctionnalités telles que la surveillance, le prétraitement, le stockage et la sécurité. La capacité de surveillance rend le nœud capable de contrôler les ressources et les services offerts. La fonctionnalité de prétraitement permet au nœud d'effectuer une analyse basique des données afin de faciliter les soins de santé d'urgence. Au niveau de l'élément de stockage, les données sont répliquées ou séparées et la fonction de sécurité fournit des services tels que la confidentialité des données, l'intégrité des données et la sécurité des données.

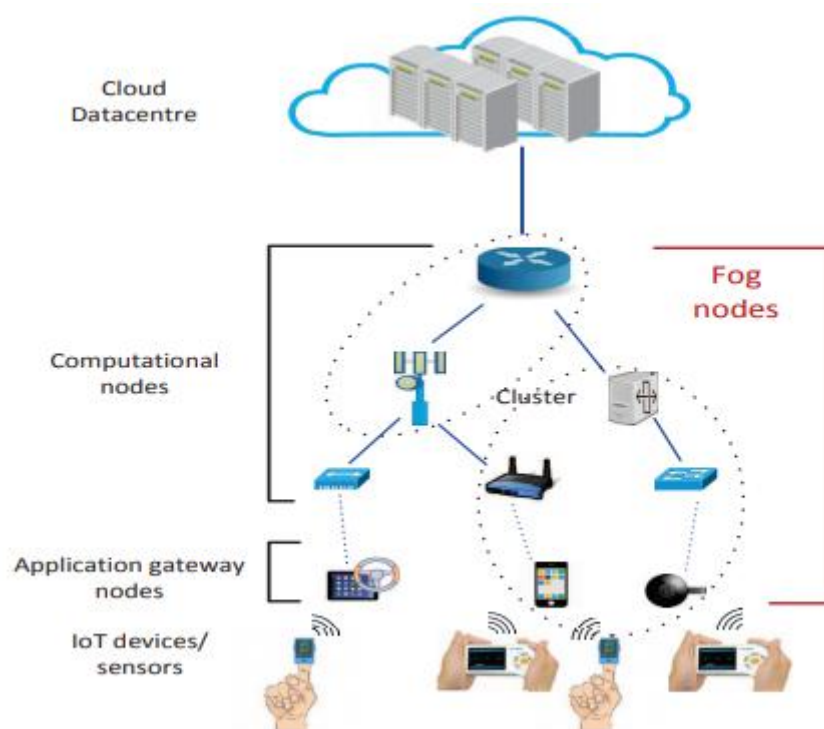


Figure 1.13: Environnement général du fog Computing²⁸

²⁸ Cloud-Fog Interoperability in IoT-enabled Healthcare Solutions (page 5) [6]

■ Les solutions de connectivité

Le marché actuel demande que les technologies réseaux soient incorporées aux objets connectés bien qu'il soit possible de les ajouter avec des modules externes. Les dispositifs ne sont plus nécessairement connectés à un serveur en réseau car les passerelles sont utilisées dans certains cas pour la collecte des données au niveau local. Nous présentons ici les aspects importants de trois principales méthodes de connectivité très utilisées pour l'IoMT: le WI-FI, le Bluetooth et les réseaux LPWAN.

Le Wi-Fi d'entreprise par opposition au Wi-Fi consommateur offre un niveau de service plus élevé en matière de performance, de sécurité, de conformité aux normes et de gestion du cycle de vie. Ces facteurs sont très importants pour la connectivité dans un environnement de santé où il faut relever le défi d'une itinérance rapide et sécurisée. Le Wi-Fi d'entreprise fonctionne sur les bandes 2,4 GHz et 5 GHz. La 2,4 GHz peut être rapidement encombrée par les appareils de commodité et la plupart des hôpitaux ont dédié la 5 GHz pour les appareils et les applications critiques à cause de l'augmentation de la bande passante et des performances disponibles. Il existe plusieurs normes Wi-Fi actuellement sur le marché mais la 802.11ac Wave 2 (ou Wi-Fi 5) est celle à privilégier pour un appareil avec Wi-Fi intégré. Elle possède plusieurs avantages tels que: les canaux 80 MHz/160 MHz, les entrées MU-MIMO (multiple user - multiple input, multiple output), la compatibilité avec les anciens dispositifs, la réduction des interférences et un canal plus large. Il faut cependant noter que depuis Février 2021²⁹, la norme 802.11ax est disponible et présentes d'importants avantages:

- OFDMA (chaque canal est subdivisés en en centaines de petits canaux et jusqu'à 30 utilisateurs peuvent partager simultanément le même canal.),
- Modulation 1024-QAM (possibilité d'envoyer des paquets plus denses)
- Planification des ressources (augmente le temps de veille et améliore l'autonomie de l'appareil)
- la rétrocompatibilité

²⁹ https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11ax [50]

- meilleure utilisation du spectre (fonctionne dans les bandes 2,5 GHz et 5 GHz)

Le Wi-Fi d'entreprise propose comme solution de sécurité la WPA2-Enterprise qui est un processus d'authentification basé sur la 802.1x et la WPA3. Il existe néanmoins d'autres modules externes permettant de renforcer la sécurité de la solution IoT.

Le Bluetooth, longtemps rejeté, a retrouvé sa place dans le milieu hospitalier depuis que l'aspect sécuritaire et la portée du signal a été améliorée. Il se présente comme une technologie à saut de fréquence qui peut éviter les canaux de spectre encombrés utilisés par d'autres technologies sans fil telles que les points d'accès Wi-Fi. L'IoMT exploite le Bluetooth pour la connectivité et l'approvisionnement des appareils, pour remplacer les câbles dans les salles d'opération, les unités de soins intensifs, et d'autres lieux, pour des applications d'orientation des patients et visiteurs. La technologie BLE (Bluetooth Low Energy) plus récente est une technologie faible consommation d'énergie mais robuste est aussi un WPAN fonctionnant dans la bande de fréquence de 2,4 GHz selon un modèle de base maître esclave. La technologie BLE est parfaite pour les applications qui envoient sporadiquement de petites quantités de données (les pompes et les moniteurs de glycémie, les inhalateurs pour l'asthme, les implants, etc.). Le réseau maillé Bluetooth Mesh est une technologie qui permet à plusieurs dispositifs Bluetooth de communiquer entre eux en utilisant la technique dite "inondation gérée" (les données sont transmises de manière omnidirectionnelles tous les nœuds se trouvant dans la portée du nœud maillé). Cette technique est fiable et robuste car elle permet d'offrir plusieurs chemins disponibles avec une capacité d'auto-réparation et une bonne gestion des ressources.

Il est important d'ouvrir une parenthèse sur les réseaux WBAN (Wireless Body Area Networks) ou réseaux corporels sans fil qui servent de base à la communication au niveau de la couche de transport dans l'architecture de l'IdO. Les WBAN confèrent aux capteurs et actionneurs situés à l'intérieur, sur ou à proximité du corps humain des propriétés telles que: la vitesse, la précision, l'économie d'énergie et une communication fiable. Ils contribuent à réduire les coûts des soins de santé et améliorer leur qualité en utilisant différents capteurs pour lire les signes vitaux d'un patient. Ils prennent en charge plusieurs débits de données,

de la communication à bande étroite, 75,9 Kbps, à l'ultra-large bande, 15,6 Mbps. Les WBAN sont compatibles avec d'autres technologies sans fil comme les réseaux locaux sans fil (WLAN), Zigbee, les réseaux mobiles, Bluetooth, les réseaux personnels sans fil (WPAN) et les réseaux de capteurs sans fil (WSN).

Pour des raisons d'ordre pratique ou sécuritaire, le réseau local est contourné pour accéder au Cloud. On a alors recours à des réseaux d'opérateurs en exploitant *la technologie LPWAN* qui peut aussi remplacer le WI-FI ou le BLE comme une technologie de passerelle (LoRa par exemple) rentable et offrant une meilleure propagation et une plus grande portée à travers certains matériaux de construction. Les technologies LTE CAT-M1 et NB-IoT sont efficaces pour connecter les dispositifs médicaux à distance; ils sont spécialement conçus pour prendre en charge de faibles données à un coût bien inférieur à celui d'un service cellulaire standard de voix et données.

LoRaWAN convient aux situations où la transmission des données en temps réel n'est pas nécessaire car les paquets sont envoyés de façon périodique avec une longue portée (plus de 10 Km) et une faible consommation (peut durer des années sur une batterie). Cette technologie est peu coûteuse avec une faible bande passante et un cryptage 128 bit de bout en bout. L'un des principaux avantages est la possibilité de déploiement sur un réseau public comme sur un réseau privé.

LTE Cat-M1 supporte les applications fixes et mobiles. Il permet une connexion directe au réseau 4G à faible bande passante, coût réduit, faible complexité et une longue durée de vie de la batterie.

NB-IoT offre une meilleure pénétration dans les bâtiments avec une bande passante et une très faible puissance mais ne permet aucune capacité d'itinérance. Elle est donc appropriée pour les applications plus simples et stationnaires.

2.2.2. Etude de quelques architectures de déploiement des objets médicaux connectés

Nous avons vu précédemment que selon l'usage et l'état de santé du patient, le choix de la technologie à utiliser pour le déploiement d'une solution IoT dépend de la tolérance ou non d'un temps de latence dans la transmission des données. Certaines situations de santé (le cas de maladies liées au cœur ou les soins aux patients victimes d'accidents mortels) nécessitent l'attention immédiate du personnel médical. Pour surmonter ou limiter les problèmes de latence, le fog computing est préféré au Cloud Computing, car il apporte les ressources de calcul et de stockage à la périphérie du réseau, c'est-à-dire plus près des capteurs.

Nous présentons dans cette section quelques solutions architecturales pour les applications de soins de santé tirées de la publication scientifique «*Internet of Things in Healthcare: Architecture, Applications, Challenges, and Solutions*³⁰» de Naresh et al..

■ Architecture à 4 couches de Cerina et al. [1]

Cerina et al. ont proposé une architecture à quatre couches basée sur l'informatique en brouillard et la connaissance du contexte: la couche d'interaction, la couche de maillage, la couche de brouillard, et la couche de nuage.

La couche d'interaction assure la collecte des données et la réception des commandes. La couche de maillage agrège les données, transfère les commandes et gère la sécurité des nœuds inférieurs. Le Fog Node traite les données pour agir sur l'environnement et éventuellement transférer des informations vers le Cloud.

Les auteurs ont utilisé le Field-Programmable Gate Array (FPGA) comme nœud de brouillard. Cette technologie facilite la reconfiguration du matériel du nœud pour des performances maximales, un délai minimal dans les tâches et la capacité d'évoluer sur le nombre d'appareils connectés avec une consommation électrique minimale.

³⁰ *Internet of Things in Healthcare: Architecture, Applications, Challenges, and Solutions* [10]

Les auteurs proposent de supprimer la couche maillée dans le cas d'applications de soins de santé dont le temps est critique.

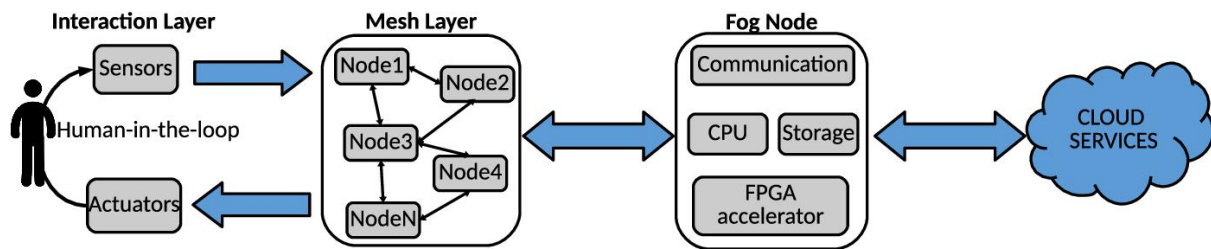


Figure 1.14: Proposition d'une architecture de calcul du brouillard pour les soins de santé préventifs et l'assistance à la vie dans des environnements intelligents [1]

■ **Architecture à 4 couches de Nandyala et al. [2]**

Nandyala et al. inspirés par l'architecture de brouillard de CISCO, ont proposé une architecture à 4 niveaux pour la surveillance ubiquitaire en temps réel des soins de santé. Les quatre couches proposées sont: la couche des appareils intelligents, la couche du brouillard, la couche centrale et la couche nuage. Le rôle de la couche centrale est d'offrir des services de sécurité et de fournir des chemins pour transporter et transférer des données et des informations de réseau entre de nombreux sous-réseaux.

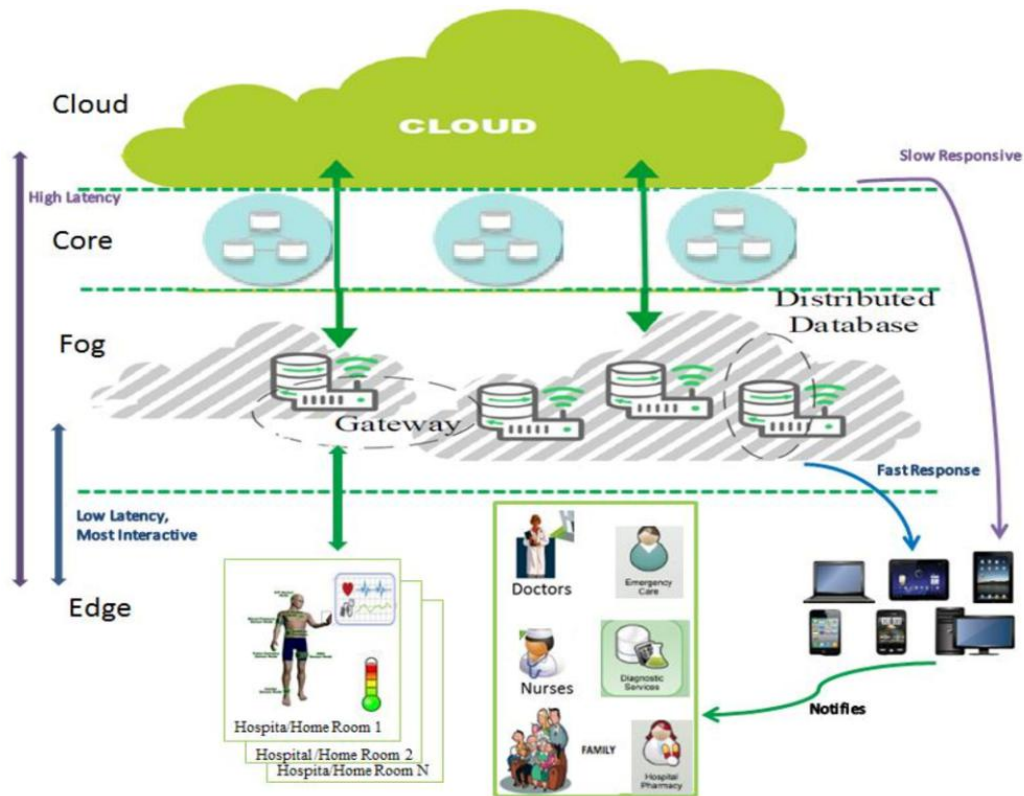


Figure 1.15: Architecture basée sur l'IoT pour la surveillance UHealthcare en temps réel[2]

- **Architecture à cinq couches de Verma et al. [3]**

Verma et al. ont proposé une architecture à cinq couches basée sur le fog computing pour la surveillance à distance de la santé des patients. Les couches sont les suivantes: couche d'acquisition de données, couche de classification des événements, couche d'exploration de l'information, la couche de prise de décision et la couche de stockage en nuage. Le modèle utilise le classificateur de réseau de croyances bayésien, l'exploration de données intégrée, le stockage distribué et les services de notification à la périphérie du réseau.

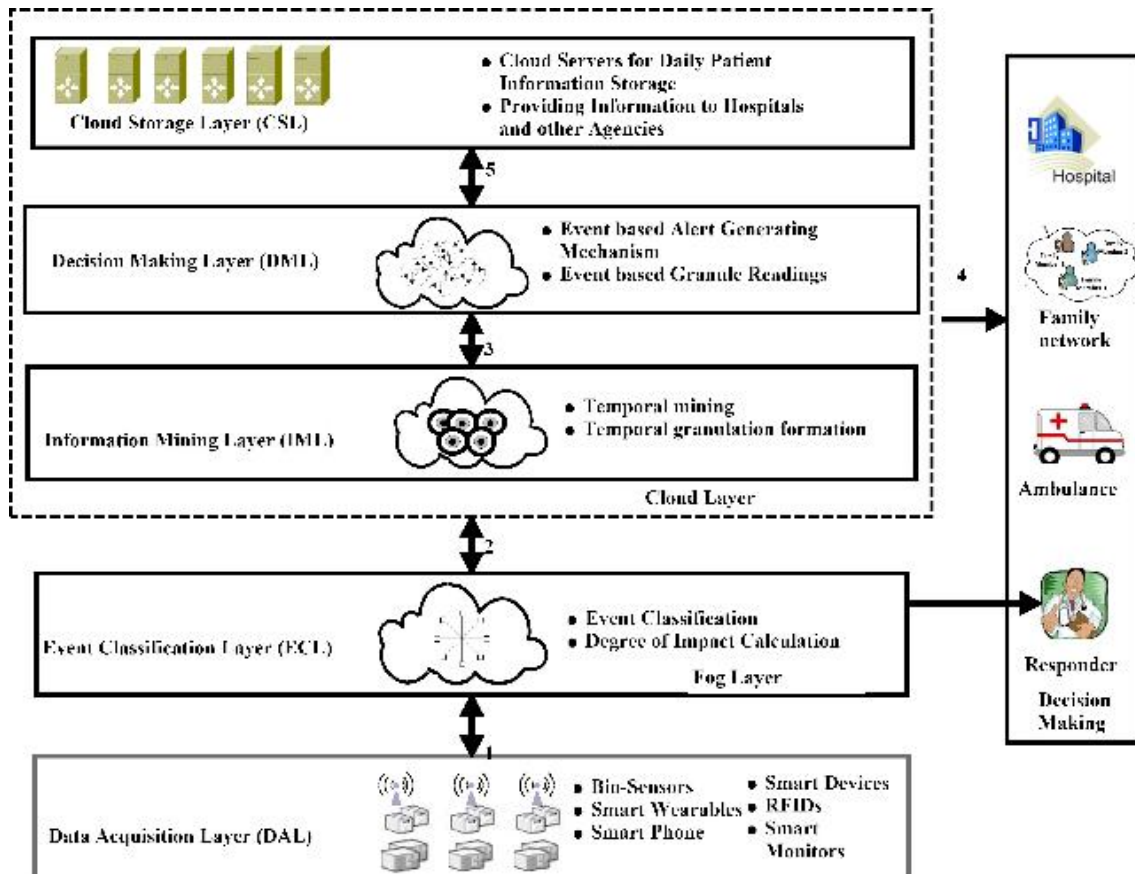


Figure 1.16: Architecture en couche proposée pour la surveillance de la santé des patients assistée par l'IoT par brouillard dans les maisons intelligentes [3]

■ **Architecture à trois couches de Azimi et al. [4]**

L'architecture à trois couches de Azimi et al. est composée de la couche des capteurs, la couche du brouillard et la couche du nuage pour les systèmes de surveillance de la santé basés sur l'IdO. Il s'agit d'une architecture hiérarchique d'informatique assistée par le brouillard et utilisant le modèle de calcul MAPE-K de Microsoft.

Certaines des tâches d'analyse des données sont déchargées sur des nœuds de brouillard.

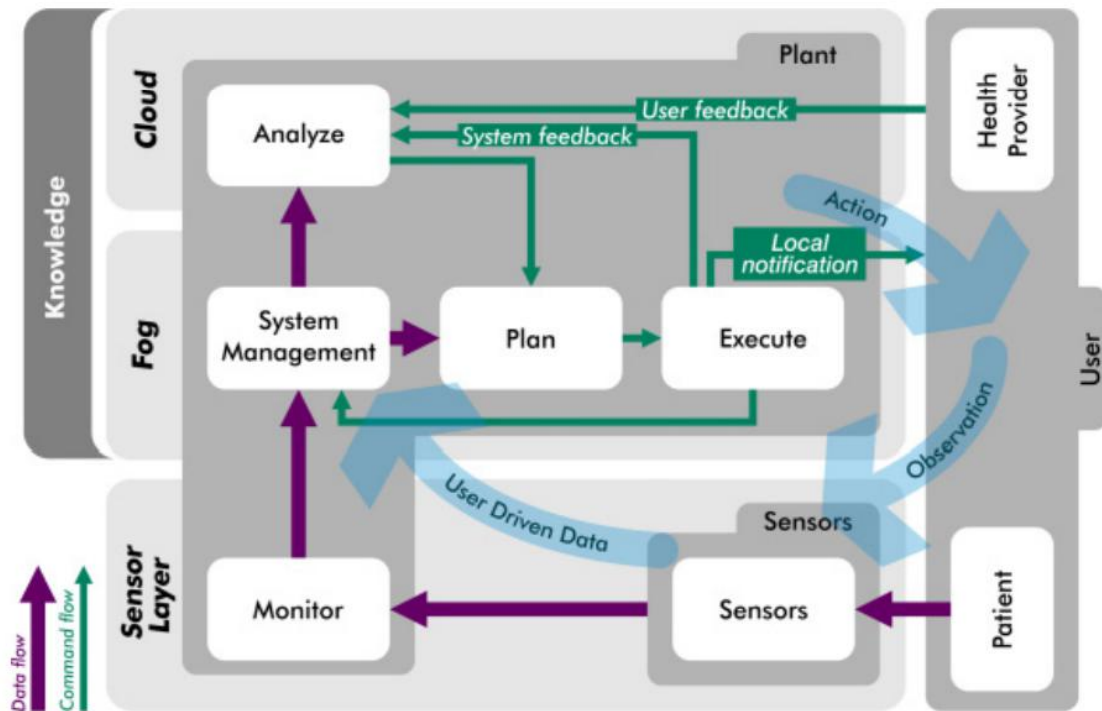


Figure 1.17: Architecture basée sur l'informatique hiérarchisée assistée par brouillard pour l'IoT dans le domaine de la santé[4]

■ Architecture à trois couches de Plageras et al. [5]

Plageras et al. ont proposé une architecture basée sur le Cloud pour un système de surveillance omniprésente des soins de santé basé sur l'IdO .

Il se pose donc un problème de latence pour les applications à temps critique. Les auteurs ont suggéré une topologie maillée pour la connectivité entre les capteurs.

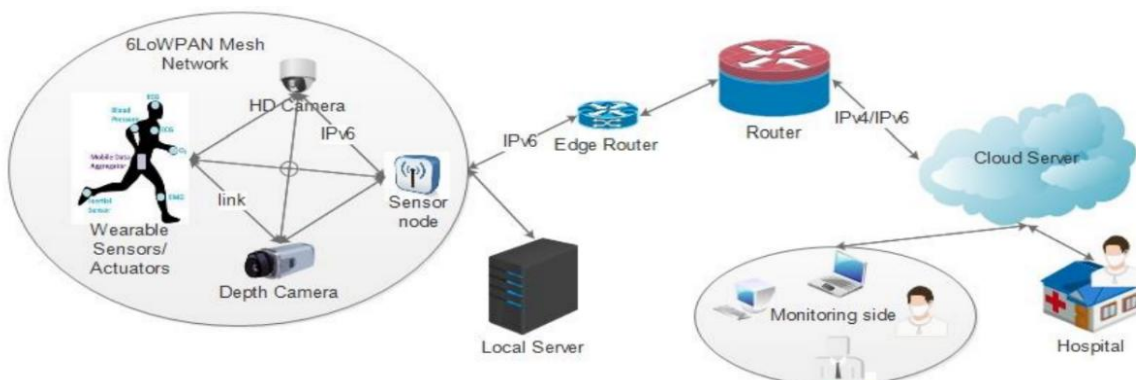


Figure 1.18: Architecture à trois couches d'un système de surveillance basé sur l'IoT pour les soins de santé omniprésents[5]

- **Modèle de référence de Mahmud et al. [6]**

La proposition de Mahmud et al. est une architecture de référence qui fournit les éléments nécessaires à l'intégration entre le fog et le Cloud Computing et permettant des solutions interoperables d'IdO et de soins de santé. L'objectif est de fournir les modèles de base pour construire des solutions de bout en bout, y compris des capteurs, et distribuer des applications et des services, comme l'analyse de données, l'apprentissage automatique, etc.

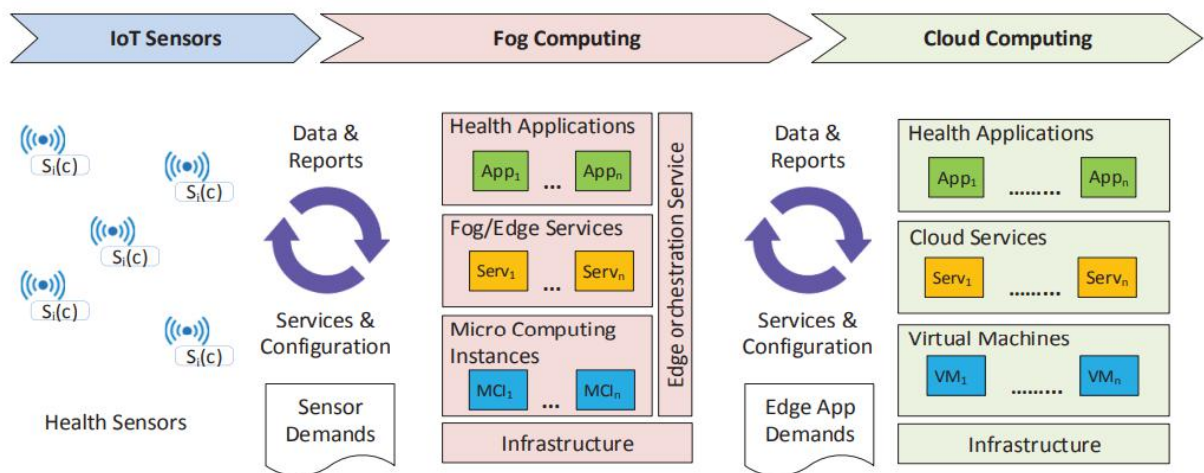


Figure 1.19: Architecture de référence de l'intégration Cloud-Fog pour des solutions interoperables IoT-Santé [6]

- **Architecture à trois couches de Debauche et al. [7]**

L'architecture de Debauche et al. est composée de la couche des capteurs, la couche du brouillard, et la couche de l'information.

L'originalité de cette étude est la smart gateway locale qui permet de suivre le graphique des données nouvelles et récentes des patients . Cette passerelle continue d'accumuler en cas de rupture télématique les données tout en procédant à leur analyse.

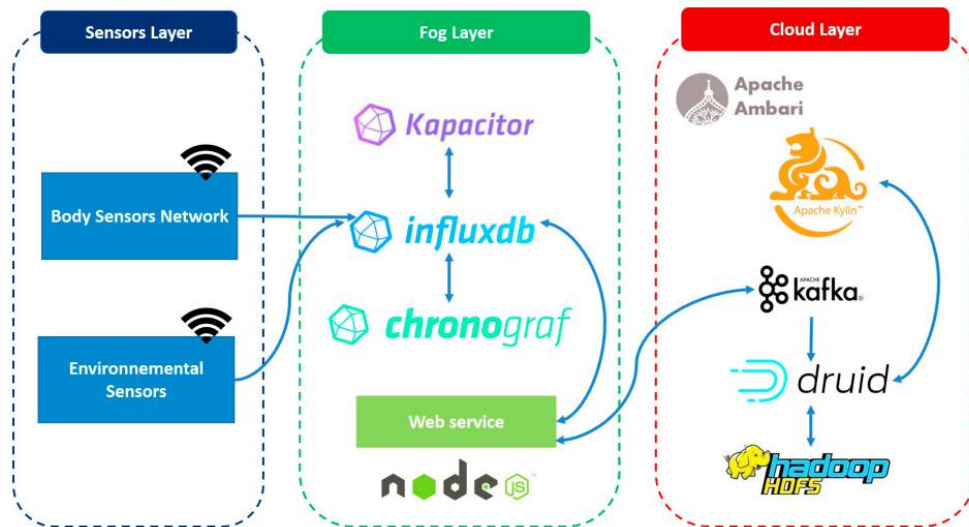


Figure 1.20: Architecture basée sur le Fog d'un système de santé pour la surveillance des personnes âgées [7]

■ **Architecture à trois couches Awaisi et al. [8]**

Il s'agit d'une architecture basée sur le brouillard pour les applications de soins de santé. Elle comporte trois couches: le réseau de dispositifs IoT, la couche de brouillard et la couche de nuage. La particularité de cette proposition est une solution de gestion de l'identité fournie pour l'authentification de l'utilisateur afin d'atténuer certains problèmes de sécurité.

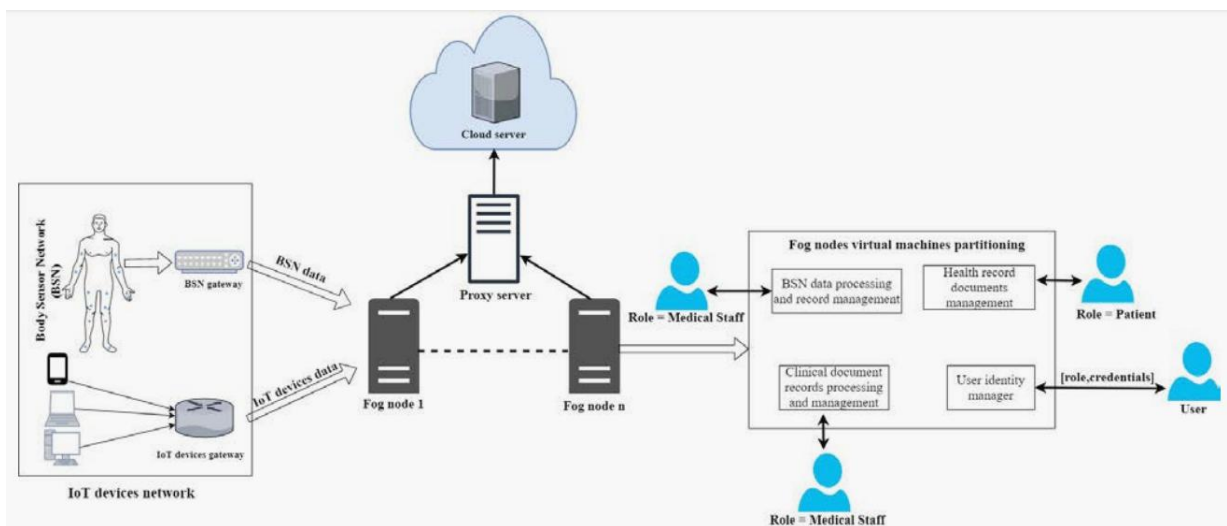


Figure 1.21: Architecture basée sur le brouillard pour les systèmes de santé[8]

■ **Architecture à deux couches de M. Teresa Villalba et al. [9]**

L'architecture proposée est constituée des principaux éléments suivants :

- des capteurs portables de signes vitaux qui transmettent les données collectées à des téléphones mobiles intelligents.
- une infrastructure en nuage pour le stockage des données et module d'analyse pour l'activation d'alarmes à envoyer au patient et/ou aux soignants du patient,
- une plate-forme d'interopérabilité et de messagerie pour la diffusion d'informations à tous les acteurs impliqués dans le système,
- une plateforme web qui permet de consulter les informations récoltées sur le patient à partir d'un ordinateur de bureau et de dispositifs mobiles.

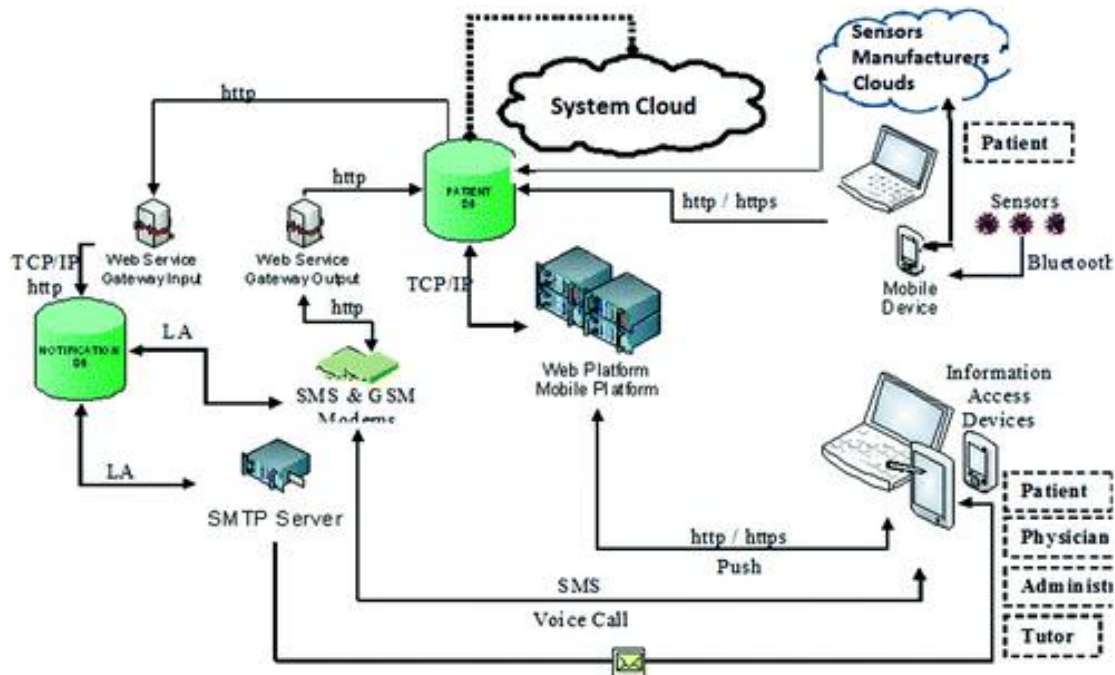


Figure 1.22: Architecture proposée pour la surveillance des patients[9]

■ **Architecture à trois couches de V. S. NARESH ET AL. [10]**

L'architecture proposée ici est minimale, simple et basée sur le Fog Computing pour résoudre les problèmes de latence présents dans les solutions basées sur le cloud.

Elle contient trois couches: la couche de détection, la couche de brouillard, la couche de nuage. La couche de détection contient différents capteurs qui transmettent aux dispositifs

d'application ou aux plates-formes matérielles comme les mobiles, Arduino, Raspberry Pi, les données relatives aux signes vitaux des patients et des personnes âgées.

Ces dispositifs d'application acheminent les données brutes vers la couche brouillard qui contient une passerelle locale et un ou plusieurs serveurs de stockage transitoire où les données peuvent être traitées selon les exigences de l'application. Cette passerelle locale peut également servir à la mise en œuvre des politiques de sécurité et de confidentialité. Les données traitées à ce niveau sont transmises à une passerelle frontalière afin d'être acheminées vers le cloud. Un pare-feu peut être placé au niveau d'une des passerelles pour filtrer le trafic malveillant.

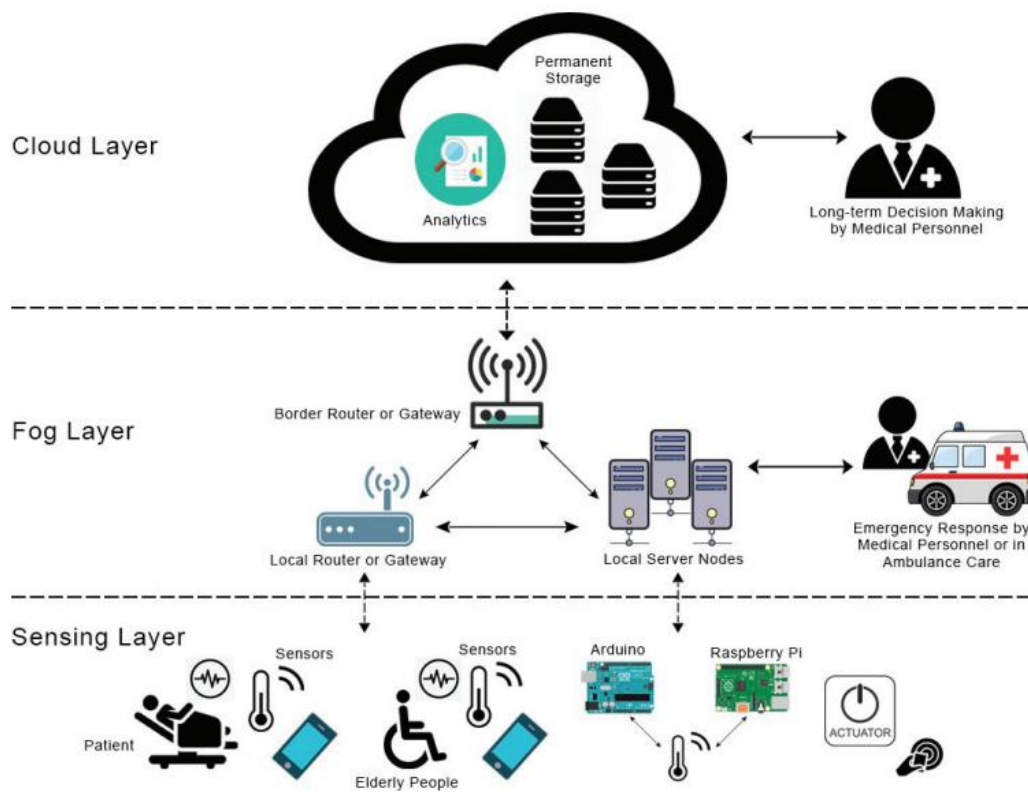


Figure 1.23: Architecture à trois couches de Naresh et al.[10]

Le tableau ci-dessous présente les résultats de la comparaison des différentes architectures abordées. Les paramètres pris en compte sont les suivants:

- **le nombre de couches dans l'architecture**
- **la complexité de l'architecture** qui dépend du nombre de couches et de leur fonctionnalité ou les modules exécutés sur chaque couche.
- **la fiabilité des données** au niveau de la couche de brouillard qui est fonction de la disponibilité des clusters ou de l'informatique distribuée au niveau de la couche de brouillard
- **le support des applications en temps réel** qui est lié à l'existence de la couche de brouillard et de la quantité de travail effectué à cette couche.
- **la sécurité** en fonction du nombre de couches.

Table 1.8: Comparaison des architectures présentées ³¹

| Référence | Nombre de couches | Complexité | Fiabilité des données | Support des applications en temps réel | Sécurité |
|-----------------|-------------------|------------|-----------------------|--|----------|
| Cerina et al. | 4 | Modérée | Faible | Modérée | Elevée |
| Nandyala et al. | 4 | Modérée | Faible | Modérée | Elevée |
| Verma et al. | 5 | Elevée | Faible | Modérée | Modérée |
| Azimi et al. | 3 | Faible | Faible | Modérée | Elevée |
| Plageras et al. | 3 | Faible | Faible | Faible | Modérée |
| Mahmud et al. | 3 | Faible | Modérée | Modérée | Modérée |
| Debauche et al. | 3 | Modérée | Faible | Modérée | Modérée |
| Awaisi et al. | 3 | Modérée | Modérée | Modérée | Modérée |
| Villalba et al. | 2 | Faible | Faible | Faible | Modérée |
| Naresh et al. | 3 | Faible | Elevée | Elevée | Elevée |

³¹ Internet of Things in Healthcare:Architecture, Applications, Challenges, and Solutions (page 9) [10]

3. Les objets connectés en milieu hospitalier béninois

3.1. Point de l'intégration des mesures de l'OMS en matière de Cybersanté par le gouvernement béninois

La « cybersanté » est définie par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS) comme l'utilisation des technologies de l'information et de la communication (TIC) en appui à l'action de santé. Cette technologie ne cesse d'évoluer et a prouvé sa capacité à faciliter l'atteinte des objectifs de santé convenus sur le plan international, tels que les objectifs de développement durable (ODD) .

Dans son rapport AFR/RC70/INF.DOC/4 du 30 Juillet 2020³², le Bureau régional de l'OMS pour l'Afrique a abordé la question de l'exploitation des solutions de Cybersanté pour l'amélioration des systèmes de santé nationaux dans la région africaine de l'OMS. Il faut noter que ce rapport fait suite à une résolution sur la cybersanté adoptée en 2013 par les États membres (du comité régional de l'OMS pour l'Afrique) qui ont été invités à encourager l'élaboration et la mise en œuvre de politiques relatives à la cybersanté.

Le Bénin fait partie des dix États membres qui ont bénéficié d'un appui pour élaborer des stratégies en matière de cybersanté et des trente trois qui se sont dotés de telles stratégies. Parmi ces 33 pays, seuls onze pays se sont dotés de stratégies pour la protection des données et le Bénin n'en fait pas partie.

Le Bénin a abrité en 2019 un atelier organisé par l'OMS en partenariat avec l'UIT et a ainsi intégré le groupe des quatorze États dotés de compétences en matière de gouvernance de la santé numérique au niveau national. A la suite de cet atelier, il a établi une documentation sur des domaines d'appui technique bien définis répondant aux besoins du système hospitalier béninois.

Il faut néanmoins souligner qu'il y a deux autres initiatives du Bureau Régional de l'OMS pour l'Afrique auxquelles le Bénin n'a pas encore intégré: la plateforme pour la santé

³² RAPPORT DE SITUATION SUR LA MISE EN ŒUVRE DE LA RÉOLUTION AFR/RC62/R5 SUR L'OBSERVATOIRE AFRICAINE DE LA SANTÉ [22]

numérique et l'atlas sanitaire numérique. La plateforme permet la numérisation des principaux événements sanitaires dans toute la continuité des soins et l'atlas vise le renforcement de l'inventaire de la santé numérique et l'accroissement de la visibilité de la mise en place de la cybersanté au niveau des États Membres.

3.2. Mesures de cybersanté prévues par le gouvernement béninois dans le plan national de développement sanitaire 2018-2022

Le plan national de développement sanitaire 2018-2022 ³³ a été élaboré afin d'améliorer les prestations de services de santé pour l'atteinte des Objectifs de Développement Durable. L'un des points importants mentionnés concernant les problèmes prioritaires du secteur est le retard dans la transformation digitale du système de santé. Pour y remédier, six orientations stratégiques sont retenues et déclinées en objectifs spécifiques. L'Orientations Stratégique cinq (OS5) qui vise l'Amélioration du système d'information sanitaire et la promotion de la recherche en santé a pour objectif spécifique 5.3 d' "*assurer la transformation digitale du système de santé*" en instaurant l'utilisation de la e-santé à tous les niveaux, y compris le niveau communautaire. Les actions prioritaires pour l'atteinte de cet objectif sont les suivantes:

- Actualiser et mettre en œuvre le schéma directeur des technologies de l'information et de la communication du secteur ;
- Créer et rendre fonctionnel le cadre de gouvernance de la e-santé ;
- Mettre en œuvre la stratégie nationale de cybersanté intégrant la m-health ;
- Renforcer les usages de la télémédecine ;
- Mettre en place le Dossier patient informatisé ;
- Mettre en place la plateforme de gestion des e-services de l'administration sanitaire ;
- Mettre en place un mécanisme d'archivage et de gestion électronique des documents.

Le budget alloué à la ligne de l'Orientations Stratégique cinq (OS 5) représente 1,25% du financement total et s'élève à 47 692 131 033 F CFA.

³³ Plan national de développement sanitaire 2018-2022 [37]

3.3. Les enjeux du déploiement de l'IoMT en milieu hospitalier béninois

Les premières éditions des rencontres de la santé numérique en Afrique de l'Ouest ³⁴ tenues à Dakar en Décembre 2018 ont regroupé six pays: le Bénin, le Burkina Faso, la Côte d'Ivoire, le Mali, le Niger et le Sénégal. A Cette occasion, l'OMS a rappelé le retard accusé dans la mise en œuvre d'une stratégie effective de santé numérique par les pays Ouest-africains par rapport aux autres régions du continent. En Afrique de l'Ouest, le déploiement à large échelle est confronté à des problèmes d'ordre juridique et réglementaire. Un partenariat avec l'UIT a été promu pour mettre en place un cadre structurant l'accompagnement du déploiement des stratégies e-santé de la sous région. Les défis identifiés en Afrique de l'Ouest et par conséquent applicables au contexte béninois sont énumérés ci-dessous et peuvent expliquer le retard accumulé:

- Sur le plan de la stratégie politique adoptée, les solutions proposées ne répondent pas aux besoins du gouvernement pour l'atteinte des ODD. Il faut donc renforcer la stabilité des pôles de décision à savoir le Ministère et les partenaires techniques et financiers de la santé.
- Sur le plan institutionnel, l'impact noté sur le système de santé n'est pas significatif à cause d'un manque de collaboration entre les acteurs de la santé, des TIC et des secteurs du public et du privé.
- Sur le plan technique, un véritable travail doit être fait au niveau des infrastructures des réseaux pour assurer la couverture, les performances, l'interopérabilité et l'accessibilité. Ces éléments sont essentiels pour obtenir des solutions réutilisables et de grandes portées.
- Sur le plan opérationnel, il faut assurer la confiance numérique en veillant à l'adhésion des usagers et des professionnels de la santé, à la qualité des ressources humaines et à la mise en place d'un cadre réglementaire et juridique.
- La difficulté à évaluer, gérer et mutualiser les initiatives doit être surmontée par la mise en place d'un dispositif de suivi et évaluation des actions menées. L'impact sur le système

³⁴ Livre Blanc des 1^{ères} rencontres de la santé numérique en Afrique de l'Ouest (AO) [38]

de santé pourra ainsi être évalué afin d'orienter les prises de décisions pour une efficacité plus élevée.

- Sur le plan financier, il faut planifier les investissements sur la durée afin de disposer d'une économie d'échelle et de visibilité sur les investissements.

Pour relever ces défis, le gouvernement béninois a mis sur pied une stratégie nationale en cybersanté sur cinq ans (2018-2022), pour un coût approximatif de 21 millions de dollars avec des objectifs axés sur trois grands programmes:

- la mise en place d'un Réseau National Numérique de la Santé (RNNS) pour fournir les infrastructures TIC nécessaires au déploiement des solutions de santé numérique
- la création d'une plateforme multimédia d'information et de communication unifiée pour les systèmes d'information hospitaliers et sanitaires, le système de gestion informatisée intégrée, la télémédecine, et la m-santé.
- la mise en place d'un cadre juridique et réglementaire pour la sécurité des données, les dispositions légales et administratives, les normes techniques et d'interopérabilité relatifs à la promotion de la santé numérique.

4. Synthèse et problématique

Cette revue bibliographique nous a permis d'aborder les concepts fondamentaux de l'IoT ainsi que les spécificités de cette technologie lorsqu'elle est appliquée aux soins de santé. Nous retiendrons qu'elle apporte une grande révolution numérique dans les systèmes sanitaires en fournissant aux spécialistes de santé des outils facilitant la prise en charge des patients et des informations en temps réel pour la logistique et l'efficacité opérationnelle en suivant les actifs et les personnes à l'intérieur de l'hôpital.

Sur le plan technique, nous avons étudié les composants technologiques et les solutions de connectivité intervenant dans la mise en œuvre d'une solution IoT en général et en particulier pour les soins médicaux. Sur la base de la publication de Vankamamidi S. Naresh et al. [10], nous avons présenté dix architectures de solutions IoMT ainsi que leur analyse comparative. Ensuite, sur la base des données gouvernementales et institutionnelles, nous avons procédé à une étude contextuelle du déploiement de solutions IoT pour les soins de santé au Bénin.

Bien que cette étude nous confirme la pertinence et l'opportunité de notre sujet de recherche, il est important de procéder à une analyse textuelle des éléments obtenus à la suite de cette étude empirique. Cette étape est fondamentale pour répondre à la grande question qui motive notre recherche : «quels sont différents paramètres à prendre en compte dans le cadre du déploiement d'une solution IoMT répondant aux besoins du système hospitalier béninois afin d'apporter une contribution adaptée aux problèmes?».

Dans la section suivante, nous présentons la démarche scientifique que nous avons adoptée pour mener cette étude ainsi que les outils qui ont été utilisés.

Chapitre 2:

Matériels et méthodes

Le déploiement d'une solution IoT est efficace dans la durée lorsque les volets social et technologique sont pris en compte. Nous décrivons dans cette section la démarche scientifique que nous avons adoptée dans le cadre de nos travaux qui portent sur l'étude des architectures de déploiement des objets connectés en milieu hospitalier béninois.

Dans le cadre des critères d'éligibilité, pour effectuer cette étude, la question de recherche suivante a été prise en considération : quels sont les différents paramètres à prendre en compte pour mettre en place des solutions IoMT efficaces et adaptées au contexte hospitalier béninois?

En gardant à l'esprit cette question de recherche, l'objectif de cette étude a été défini : Fournir un listing des architectures de déploiement des objets connectés médicaux et proposer des précautions à prendre pour intégrer cette technologie dans le milieu hospitalier béninois.

1. Matériels

1.1. Les outils

Pour nos travaux de recherche, nous avons utilisé un ordinateur portable dont les caractéristiques sont les suivantes:

- (1) Processeur: Intel(R) Core(TM) i3-2370M CPU @ 2,40 GHz 2,40 GHz
- (2) Système exploitation: Windows 10 Professionnel
- (3) Mémoire installée (RAM): 6.00 Go (5,89 Go utilisable)
- (4) Type de système: Système d'exploitation 64 bits, processeur x64
- (5) Stylet et fonction tactile: Non disponible

Les principales sources bibliographiques qui ont été utilisées pour mener cette recherche sont répertoriées ci-dessous :

- (1) IEEE
- (2) Springer

- (3) ScienceDirect
- (4) Researchgate
- (5) Moteur de recherche Google

Pour analyser et présenter nos résultats, nous nous sommes servis des logiciels:

- (1) Word
- (2) Excel
- (3) PowerPoint
- (4) Publisher
- (5) GoogleDoc
- (6) GoogleForm

1.2. Les données

Les données que nous avons utilisées au cours de nos travaux de recherches sont de deux types:

- Les données de documents provenant de l'état de l'art (ouvrages, articles, publications, données audiovisuelles)
- Les données statistiques obtenues à partir du sondage en ligne que nous avons effectué.

2. Méthodes d'étude

Nous avons effectué une recherche de type expérimentale et combiné les deux approches suivantes:

2.1. Approche qualitative

Elle est essentiellement basée sur l'observation de documents traitant des différentes thématiques auxquelles fait appel le sujet de notre recherche. Ces informations proviennent des sites institutionnels et gouvernementaux, de livres, des publications et des articles scientifiques.

2.2. Approche quantitative

Nous avons réalisé une enquête sommaire auprès de différents agents de santé pour évaluer leur niveau d'information sur la question de la e-santé et leur disposition à adopter les solutions IoMT dans l'exercice de leur profession. Les informations collectées nous ont données des tendances que nous avons exploitées dans la phase d'interprétation.

3. Critères d'analyse et d'interprétation des données

La méthode mixte adoptée au cours de nos travaux nous a conduit à utiliser deux techniques d'analyse et d'interprétation pour traiter les deux types de données collectées:

3.1. Analyse statistique et interprétation

Les données collectées à partir de notre enquête ont été reportées dans des graphiques statistiques. Nous avons complété cette interprétation statistique par des conclusions écrites pour commenter les tendances observées.

3.2. Analyse textuelle et interprétation

Nous avons procédé à la synthèse des données de documents collectées suivi d'une interprétation écrite des régularités et grands thèmes observés. Les documents téléchargeables provenant de sources anglophones ont été priorisées et nous avons veillé à l'actualisation des résultats en veillant aux dates de publications.

Un croisement des résultats d'interprétation de cette méthode mixte a été réalisé dans le but de définir des critères de sélection/exclusion des architectures de déploiement d'objets connectés exploitables dans le milieu hospitalier béninois. Enfin pour évaluer chacun de ces paramètres, nous avons déterminé trois valeurs probables pouvant influencer la sélection ou non d'une solution architecturale donnée.

Chapitre 3:

Résultats et discussions

1. Résultats

1.1. Les résultats de l'enquête sommaire pour évaluer l'adhésion des spécialistes de santé au déploiement de l'IoMT en milieu hospitalier béninois

Pour un impact efficace et durable de la politique de transformation digitale du secteur de la santé, il faut non seulement de bonnes actions gouvernementales pour mettre en place les infrastructures mais aussi l'adhésion du personnel soignant et de la population aux différentes réformes. Nous avons réalisé à cet effet une enquête sommaire pour évaluer le niveau d'information des agents de santé par rapport à la question de la E-santé et leur disposition à accepter le déploiement des solutions IoMT dans les milieux hospitalier béninois. Le questionnaire et les réponses de l'enquête sont disponibles en annexe. Nous présentons dans cette section les statistiques commentées des grandes tendances obtenues.

a) L'échantillon obtenu a une taille de 50 individus de différents sexes et exerçant diverses fonctions (infirmier, sage femme, médecins généraliste et spécialiste, radiologues etc.) dans le corps médical béninois. L'enquête a été faite en ligne et est anonyme. La sélection des individus est entièrement aléatoire.

Q1. Quelle est votre fonction dans le corps médical?

50 réponses

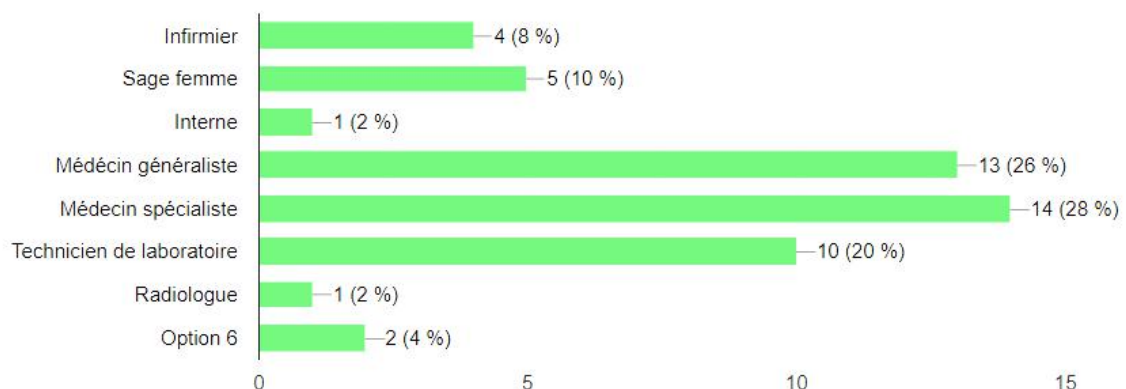


Figure 3.1: Distribution des individus de l'échantillon-cible selon la fonction

b) Les 42% des personnes enquêtées, soit 21 personnes sur 50, évaluent à 3 sur 5 leur niveau de connaissance en matière d'objets médicaux connectés. Ces résultats montrent que moins de la moitié des personnes interrogées ont une connaissance moyenne des objets médicaux connectés.

Q2. Sur une échelle de 1 à 5, comment jugeriez-vous votre niveau de connaissance en matière d'objets médicaux connectés ?

50 réponses

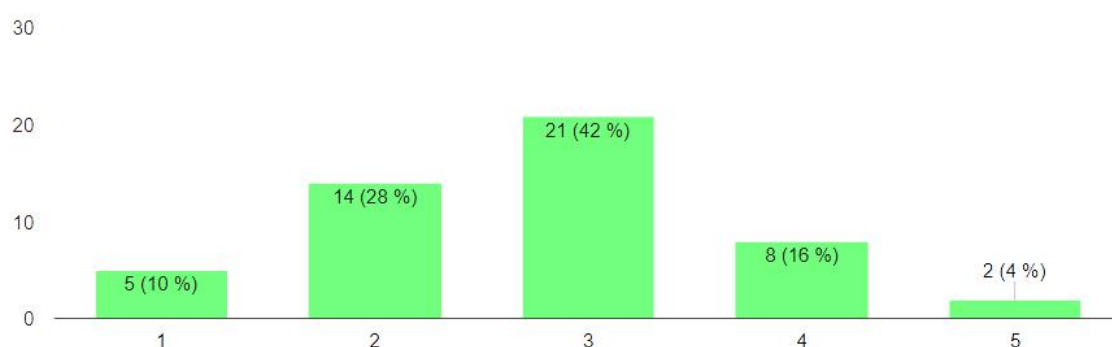


Figure 3.2: Niveau de connaissance des individus de l'échantillon sur une échelle de 1 à 5

c) 46% (23 personnes sur 50) se servent rarement des objets connectés dans le cadre de leur travail et 26% (13 sur 50) ne s'en servent jamais. Ces pourcentages montrent la très faible utilisation des objets connectés par les agents de santé interrogés.

Q3. A quelle fréquence vous servez-vous d'objets connectés dans le cadre de votre travail?

50 réponses

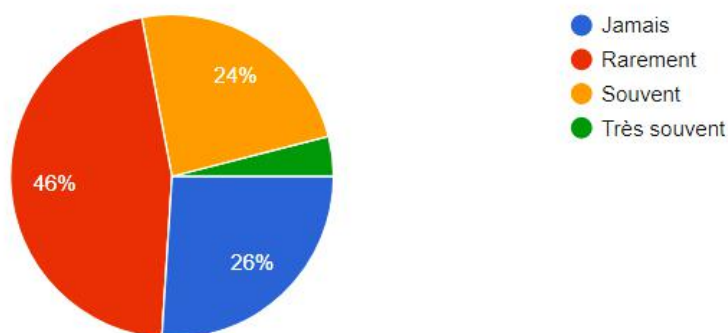


Figure 3.3: Fréquence d'utilisation des objets connectés par les individus de l'échantillon

d) 43 personnes sur 50 (soit 86%) sont favorables au déploiement d'objets connectés en milieu hospitalier béninois. Sur les sept personnes restantes, nous avons 4 avis mitigés et deux personnes qui ne savent pas quoi répondre. Nous n'avons reçu qu'un seul non franc.

Ces résultats montrent que la grande majorité des enquêtés est favorable à l'intégration des solutions IoT dans la prise en charge des patients.

Q4. Etes-vous favorable au déploiement des objets connectés en milieu hospitalier béninois?

50 réponses

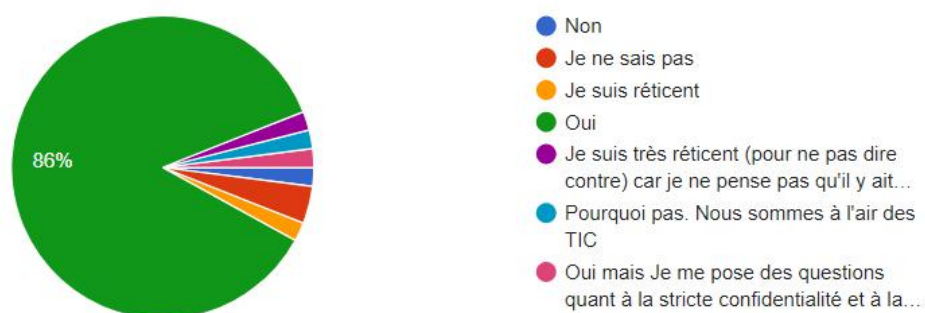


Figure 3.4: Niveau d'adhérence des enquêtés à l'idée du déploiement des objets connectés en milieu hospitalier.

e) Dans l'ordre décroissant, les étapes de la prise en charge que les enquêtés ont choisies parmi 10 propositions que nous leur avons faites sont:

-Le suivi de l'état du patient en hospitalisation (30%)

-La collecte des données à distance (22%)

Le choix des enquêtés se porte donc sur l'intégration de l'IoMT pour faciliter la surveillance des paramètres vitaux des patients hospitalisés ou à domicile.

Q6. A quelle étape de la prise en charge d'un patient, pensez-vous que cette nouvelle technologie serait bénéfique dans notre contexte actuel à Cotonou?

50 réponses



Figure 3.5: Choix des enquêtés par rapport à l'étape de la prise en charge à prioriser pour l'introduction des objets connectés

f) 38% des agents ne savaient pas à quelle catégorie de patients les objets connectés seraient le plus utiles. 40% estiment qu'il serait mieux de les tester avec les patients qui ont au moins un âge adulte et 22% opte pour les enfants de moins de 5 ans.

Ces chiffres montrent une préférence relative des enquêtés pour l'intégration de l'IoMT pour les soins des patients qui sont au moins adultes.

Q7. Pensez-vous que les objets connectés médicaux seraient beaucoup plus utiles à des patients d'une tranche d'âges donnée

50 réponses

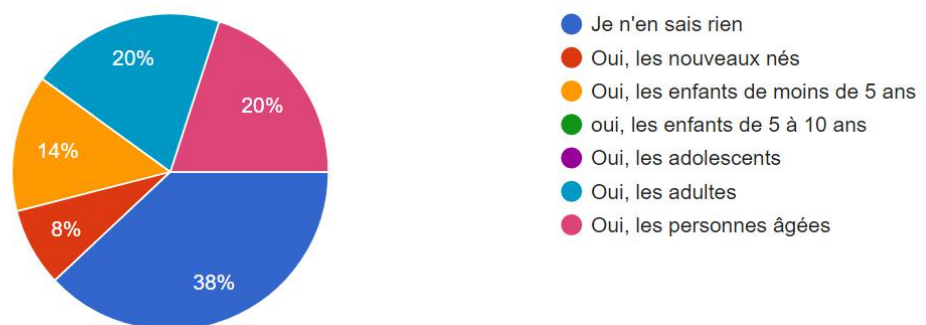


Figure 3.6: Choix des enquêtés par rapport à la tranche d'âge des patients à prioriser pour l'introduction des objets connectés.

g) Sur un total de neuf maladies proposées, les trois affections à prioriser pour introduire les objets connectés en milieu hospitalier béninois devraient être: les maladies cardio-vasculaires (82% des votes), le diabète (62%) et les maladies respiratoires (54%).

Q8. S'il fallait introduire des objets médicaux connectés dans la prise en charge des patients aujourd'hui au Bénin, quelles affections devraient être priorisées à votre avis ?

50 réponses

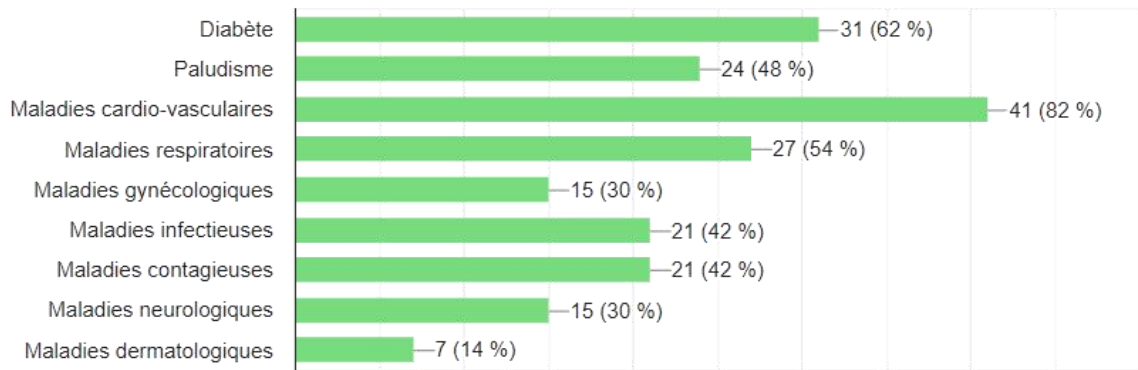


Figure 3.7: Types d'affections à prioriser pour l'introduction des objets connectés en milieu hospitalier béninois

h) Sur un total de 14 raisons qui seraient susceptibles de freiner l'adoption de l'IoMT par les professionnels de santé, 54% des votes évoquent les risques liés à la sécurité des données médicales collectées et 52% indexent le coût de la technologie.

Q10. A votre avis, en tant que professionnel béninois de la santé, qu'est ce qui pourrait constituer pour vous un frein à l'adoption des objets médicaux connectés ?

50 réponses

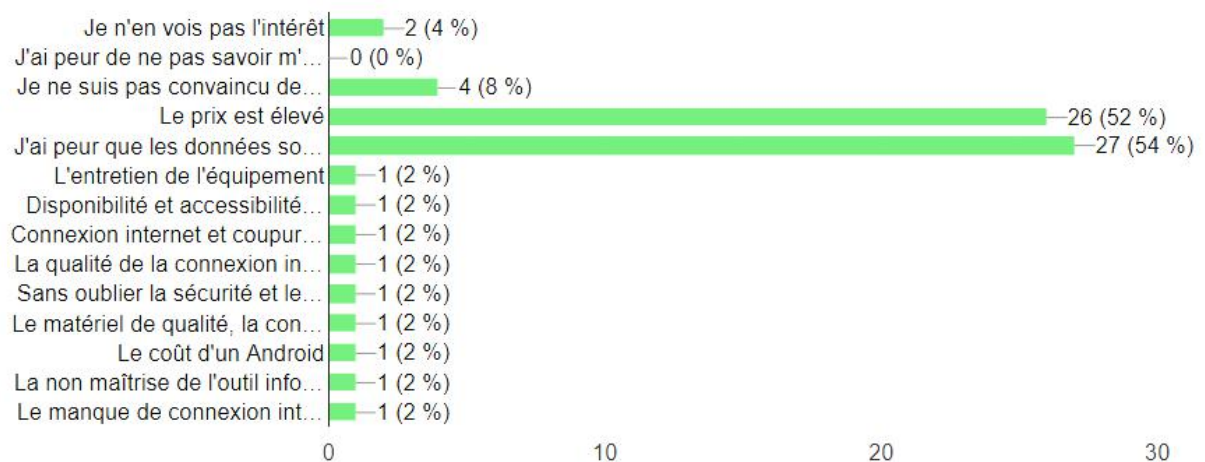


Figure 3.8: Types de raisons susceptibles de freiner l'adoption de l'IoMT par les professionnels de santé

(i) Synthèse des résultats

Les personnes enquêtées ont manifesté globalement un grand intérêt à l'idée d'intégrer les technologies IoMT dans le système sanitaire béninois. Les statistiques montrent qu'il serait plus utile et plus urgent de commencer l'introduction des objets connectés par la surveillance à distance et en hospitalisation des patients adultes atteints des maladies suivantes: maladies cardiovasculaires, diabète et maladies respiratoires. Majoritairement, deux facteurs sont indexés par les enquêtés comme pouvant constituer un frein à la mise en œuvre durable et efficace de cette technologie: la sécurité des données médicales collectées et le coût de la technologie.

1.2. Les éléments clés ressortant de l'état de l'art

L'analyse des régularités et grands thèmes découlant de la recherche documentaire nous a permis de retenir les principaux points suivants:

a) Aucun modèle architectural n'est imposable aux systèmes IoMT mais l'IUT a fourni un modèle de référence permettant de faciliter l'organisation et la standardisation de l'IoT.

b) Selon les objectifs à atteindre et les domaines d'application, l'architecture de la solution IoMT est définie et adaptée.

c) Le Fog computing est une technologie incontournable en matière de solution IoMT dans les scénarios de soins nécessitant la transmission des données en temps réel

d) D'importants travaux ont été menés pour rendre le moins énergivore possible les solutions IoMT grâce à l'introduction des solutions de connectivité Low Power.

e) Les solutions de connectivité à déployer dépendent du contexte et de l'application de la solution IoMT concernée.

f) Le principal défi du déploiement de l'IoMT en milieu hospitalier est l'aspect sécuritaire et plusieurs travaux sont effectués pour offrir des solutions optimales aux utilisateurs.

g) Certains paramètres sont proposés dans la littérature (spécifiquement par Naresh et al.) pour orienter le choix d'une architecture IoMT donnée: le nombre de couches dans l'architecture, la complexité de l'architecture, la fiabilité des données, le support des applications en temps réel, la sécurité.

Les spécificités de l'IoMT étudiées dans notre revue bibliographique nous amènent à compléter cette liste en ajoutant quatre nouveaux paramètres. Le tableau XX nous présente la synthèse des paramètres principaux retenus:

Table 3.1: Critères de sélection des architectures de déploiement des solutions IoMT dans le milieu hospitalier béninois

| Paramètres | Caractéristiques | Valeurs possibles | | |
|---|---|-------------------|---------|--------|
| le nombre de couches dans l'architecture | Il renseigne sur la structure et la complexité de l'architecture | Faible | Modérée | Elevée |
| la complexité de l'architecture | Elle dépend du nombre de couches, leur fonctionnalité ou les modules exécutés sur chaque couche | Faible | Modérée | Elevée |
| la fiabilité des données | Elle a rapport aux précautions prises au niveau de chaque couche de l'architecture pour assurer la fiabilité des données transmises | Faible | Modérée | Elevée |
| le support des applications en temps réel | Il est lié à l'existence de la couche de brouillard et de la quantité de travail effectué à cette couche. | Faible | Modérée | Elevée |
| la sécurité | Elle est relative aux dispositions prises au niveau de chaque couche de l'architecture pour protéger le système contre les attaques. | Faible | Modérée | Elevée |
| Le rapport qualité/prix | Il permet de justifier les choix technologiques faits en fonction des résultats attendus et des contraintes budgétaires | Faible | Modérée | Elevée |
| la consommation énergétique | Elle permet d'évaluer l'autonomie et les ressources énergétiques nécessaires pour le bon fonctionnement des composants du système | Faible | Modérée | Elevée |
| les solutions de connectivité exploitées | Elle permet d'évaluer l'adéquation des solutions de communication avec les infrastructures réseaux disponibles sur le site. | Faible | Modérée | Elevée |
| la pertinence contextuelle | Elle est relative à l'adéquation des paramètres des composants du système avec les exigences du milieu (climat, contraintes de gestion et de maintenance, interopérabilité) | Faible | Modérée | Elevée |

h) Un grand retard est accumulé dans le domaine de la transformation numérique du secteur hospitalier béninois mais il y a une volonté politique soutenue pour relever ce défi. En effet,

l'introduction des solutions IoMT pourrait impacter plusieurs domaines du système hospitalier béninois:

Table 3.2: Impact du déploiement des solutions IoMT sur le système hospitalier béninois

| Impact du déploiement des solutions IoMT sur le système hospitalier béninois |
|--|
| le renforcement des systèmes nationaux de santé pour accélérer les progrès vers la réalisation des objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) et dans l'amélioration des résultats sanitaires dans le pays. |
| l'amélioration de la disponibilité, la qualité et l'utilisation de l'information et des bases factuelles pour l'élaboration des politiques et la prise de décisions, notamment par le renforcement des systèmes d'information sanitaire et des systèmes de surveillance de la santé publique. |
| l'efficacité des services de santé en apportant des solutions telles que les assistants numériques personnels à ce niveau des soins, les dossiers médicaux électroniques et d'autres applications pour la facturation, la programmation et le suivi des patients, la transmission électronique des ordonnances, contribuant en fin de compte à l'amélioration de la qualité des soins. |
| la contribution à l'équité en santé grâce à la connexion entre les populations mal desservies des zones rurales et les formations sanitaires implantées dans les zones urbaines, qui sont dotées de personnels hautement qualifiés et de technologies médicales. |
| la contribution à la formation et au perfectionnement professionnel des agents de santé par l'éducation sanitaire continue, en recourant à des programmes ciblés de cyber-apprentissage, |
| l'aide à la résolution de la crise des ressources humaines pour la santé. |

i) Le gouvernement prévoit d'ici 2022, la mise en place d'un Réseau National Numérique de la Santé (RNNS) pour fournir les infrastructures TIC nécessaires au déploiement des solutions de santé numérique.

j) L'intégration efficace et durable de la technologie IoMT requiert l'adhésion des principaux utilisateurs.

Ce dernier point confirme le besoin d'évaluer le niveau d'information et d'adhésion des agents de santé béninois par rapport à l'intégration des technologies IoT pour les soins de santé.

2. Discussions générales

L'éventail des recherches présentées dans ce document démontre un besoin important de transformation digitale du milieu hospitalier béninois qui confirme l'intérêt d'étudier les architectures de déploiement des solutions IoMT adaptées à notre contexte.

Le but de nos travaux était d'identifier les paramètres importants à prendre en compte dans le déploiement d'une solution IoMT et de montrer l'impact probable de cette technologie sur le système hospitalier béninois.

2.1. Impact des solutions IoMT sur le système hospitalier béninois

La question de l'intérêt que présente l'introduction de la technologie IoMT dans le système sanitaire béninois a été assez facile à traiter car plusieurs études scientifiques l'abordent et les expériences faites dans divers environnements hospitaliers dans le monde le confirment. Un élément important qui l'atteste est la pluralité des recommandations et orientations de la section régionale de l'OMS pour l'Afrique de l'Ouest sur le sujet. Le gouvernement béninois l'a compris et fait montre d'une forte volonté politique en investissant considérablement dans le secteur pour rattraper le retard accumulé.

Les différents avantages que peut apporter l'intégration des objets connectés dans notre système hospitalier n'annulent pas le besoin de considérer les nouveaux défis qu'il faudra relever pour en tirer entièrement profit.

A notre entendement, l'impact des technologies IoMT pourrait être évalué à deux niveaux: l'amélioration du bien-être et de la santé de la population et le soulagement apporté aux agents de santé dans l'exercice de leur fonction. Ces éléments qui sont foncièrement liés expliquent en partie le sondage effectué auprès de quelques agents de santé pour évaluer leur degré de préparation, d'information et d'acceptation de cette technologie. Ce sondage a révélé une grande adhésion des enquêtés à l'idée d'intégrer l'IoMT dans notre système sanitaire. Ce point est primordial à évaluer car la motivation et l'implication des principaux utilisateurs

sont essentielles pour l'efficacité des solutions à déployer. En suivant les tendances, nous notons qu'il serait plus utile et plus urgent d'offrir des solutions IoMT pour la surveillance en hospitalisation et à distance des patients ayant au moins l'âge adulte et souffrant des affections telles que: les maladies cardio-vasculaires, le diabète et les maladies respiratoires. Il convient de relever à ce sujet que selon un rapport récent de l'OMS: « *La mortalité et la morbidité dues aux MNT constituent l'un des grands enjeux du développement au XXIe siècle. Plus de 36 millions de personnes meurent chaque année en raison des MNT, dont 15 millions qui meurent trop jeunes (entre 30 et 70 ans). La charge continue d'augmenter de manière disproportionnée dans les pays à revenu faible ou intermédiaire de la tranche inférieure alors que dans l'ensemble des pays, ces décès touchent de façon disproportionnée les populations les plus pauvres et les plus vulnérables. La majorité des décès prématurés dus aux MNT, survenant chez les personnes âgées entre 30 et 70 ans, sont dus aux quatre principales maladies non transmissibles : une maladie cardiovasculaire, le cancer, le diabète ou une affection respiratoire chronique.* »³⁵. De plus dans un communiqué de presse³⁶ datant du 03 Février 2021, Michael R. Bloomberg (Ambassadeur mondial de l'OMS) et le Dr Tedros Adhanom Ghebreyesus (Directeur général de l'OMS) appellent à « *à une action urgente dans la lutte contre les maladies non transmissibles (MNT) telles que le diabète, l'hypertension, les cardiopathies, le cancer et les maladies respiratoires, qui représentent plus de 74 % des décès dans le monde et aggravent les résultats sanitaires des patients atteints de COVID-19.*»

Il est donc crucial à la vue de ces éléments d'orienter les solutions IoMT pour la prise en charge de ces cas spécifiques de maladies.

Le deuxième élément qui ressort de cette enquête est le défi que constitue la sécurité des données dans la mise en œuvre des solutions IoMT. Ce facteur a été pointé par les enquêtés comme pouvant freiner l'utilisation des objets connectés par les professionnels de santé béninois. En effet, le déploiement à grande échelle de la technologie IoMT pourrait conduire à

³⁵ Combattre les MNT (page 2) [39]

³⁶ <https://www.who.int/fr/news/item/03-02-2021-michael-r.-bloomberg-and-dr-tedros-adhanom-ghebreyesus-call-for-global-focus-on-noncommunicable-diseases-to-save-lives-from-covid-19> [40]

l'acquisition d'appareils bon marché, en priorité dans un contexte budgétaire difficile comme le nôtre. Pour tenir compte de cette sensibilité au prix, les fournisseurs IoT proposent des appareils avec une puissance minimale de traitement et de mémoire pour prendre en charge les tâches principales. Il est donc de la responsabilité du réseau et du reste de l'infrastructure informatique de protéger les appareils IoT et les données qu'ils traitent.

La sécurité d'une solution IoMT dépend non seulement de celle des appareils mais aussi de celle des technologies utilisées. Il convient de mettre en place des solutions pouvant surveiller le comportement de chaque appareil IoT pour identifier des attaques extérieures ou des problèmes internes de fiabilité des données. La gestion de la sécurité des objets connectés s'avère complexe dans beaucoup de secteurs, et davantage dans le domaine des soins de santé. Les enjeux y sont très importants car les vulnérabilités en matière de sécurité sont susceptibles de nuire à la sécurité des personnes, de mettre leur vie en danger. Un grand nombre de recherches sont faites sur le sujet et plusieurs approches de solution sont proposées.

Nous en voulons pour preuves les chiffres de la part de marché de la sécurité mondiale de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine de la santé en 2018 et 2028, par région.³⁷ En effet, les prévisions annoncent 40,98% pour l'Amérique, 28,46% pour l'Europe, 22,45% pour l'Asie pacifique et 8,11% pour le reste du monde dans lequel nous pouvons inclure l'Afrique et plus précisément le Bénin. Il est donc primordial de réfléchir profondément sur les dispositions de sécurité et de fiabilité des données si nous voulons une transformation digitale durable du secteur hospitalier béninois.

L'autre facteur considéré comme un frein au déploiement des solutions IoMT dans nos milieux hospitaliers est le coût de la technologie. Ce facteur mérite en effet un intérêt particulier car nous avons remarqué lors de nos investigations une absence presque totale de projet de recherche et de développement d'objets connectés conçus par les africains pour les africains. Nous sommes donc contraints de tout importer de l'extérieur et il est évident que sans une bonne politique gouvernementale et l'appui de partenaires étrangers, toute initiative prise dans le domaine risque de ne pas prospérer.

³⁷ <https://www.statista.com/statistics/1033013/healthcare-iot-security-market-share-forecast-worldwide-by-region/> [34]

2.2. Critères de choix des architectures de déploiement des objets connectés médicaux adaptées au contexte hospitalier béninois.

Un volet principal de notre recherche a consisté à identifier les paramètres importants dont il faut tenir compte pour déployer une solution IoMT en milieu hospitalier béninois. Nous avons soulevé dans nos résultats qu'il n'existe pas d'architecture standard retenue pour la technologie IoMT par contre, il existe un modèle de référence fourni par l'IUT pour servir de base aux différentes architectures déployées. Ces architectures sont influencées par les applications, le contexte et les objectifs visés.

Nous devons reconnaître que cette tâche n'a pas été des plus simples à cause de la pluralité d'articles et de notions à étudier pour cerner le sujet. Aussi, étant donné que nous devions proposer des solutions adaptées au contexte béninois, nous avons été confrontés à la quasi inexistence de publications scientifiques faites à ce sujet par les chercheurs africains dans un contexte environnemental tout au moins proche du nôtre. Les études de recherche présentées dans cet article n'abordent donc qu'une facette du problème, puisque les paramètres sociaux, économiques, techniques et environnementaux propres au contexte ne sont pas pris en compte. Une solution complète devrait être tenir compte de toutes ces précieuses informations . La recherche présentée dans cet article présente donc une lacune évidente due à l'important retard accumulé en Afrique subsaharienne dans le déploiement des technologies IoMT.

Nous avons néanmoins identifié des paramètres spécifiques qui sont déterminants pour l'efficacité d'une solution IoMT: le nombre de couches dans l'architecture, la pertinence contextuelle, les solutions de connectivité exploitées, le rapport qualité/prix, la consommation énergétique, la sécurité, le support des applications en temps réel, la complexité de l'architecture, la fiabilité des données.

Le choix de ces facteurs est motivé par les problèmes dont nous sommes conscients dans les milieux hospitaliers béninois et dont la non prise en compte pourrait entraver le déploiement des technologies IoMT:

- le manque de ressources humaines qualifiées pour la mise en place et la gestion de solutions IoMT doit être prise en compte par la considération du nombre de couches dans l'architecture et sa complexité. Cet aspect pourrait conduire à la formation des professionnels concernés.
- l'IoMT ayant pour but d'accélérer la transformation digitale de la société, il est important d'évaluer les besoins sociaux et l'adhésion des utilisateurs visés avant tout déploiement. Ceci justifie l'importance de la prise en compte de la pertinence contextuelle.
- les solutions de connectivité exploitées dépendent du besoin en bande passante, en débit, mobilité, portée et ont une grande influence sur les ressources énergétiques. Il est important de faire à ce niveau les choix appropriés à l'application. Nous avons présenté plusieurs solutions dites Low Power. Nous pensons néanmoins que pour le contexte béninois les technologies IoT cellulaires tels que LTE Cat-M1 et NB-IoT pourraient être envisagées à cause des infrastructures cellulaires existantes.
- la sécurité et la fiabilité des données sont d'autant plus importants qu'une légère vulnérabilité pourrait avoir des conséquences dramatiques sur les patients. Le choix des appareils sécurisés dès la conception et une approche de défense en profondeur de bout en bout pour placer des contrôles de sécurité dans l'ensemble du système IoT afin de minimiser les risques.
- Plusieurs scénarios de soins de santé nécessitent une transmission en temps réel sans aucune latence. Par exemple, la surveillance d'un patient en hospitalisation est un cas critique qui nécessite une fluidité dans le flux de données et une absence totale de congestion. Dans ce cas d'espèce, le support des applications en temps réel est un critère déterminant pour le choix d'un modèle architectural donné. Il serait risqué de se passer du fog computing et effectuer tous les traitements sur un serveur distant.
- Le rapport qualité/prix est déterminant dans le choix d'un équipement donné. Un dispositif peut avoir les mêmes fonctionnalités qu'un autre et coûter plus cher à cause d'autres facteurs tels que sa robustesse et sa durée de vie. Dans un contexte budgétaire difficile, il est important de tenir compte de ce facteur pour des solutions IoMT efficaces

et durables.

Aucun travail n'ayant été réalisé dans le domaine au Bénin ou en Afrique de l'Ouest, il nous est difficile de situer nos résultats par rapport à ceux d'autres auteurs.

3. Nos Suggestions

Les exigences des outils IoT sont différentes de celles des appareils technologiques traditionnels. Le niveau de maintenance des dispositifs médicaux connectés doit être plus élevé, leur support réseau plus accru et des mesures de sécurité plus renforcées.

Au regard des différents éléments abordés dans notre étude théorique et contextuelle, nous préconisons sur le plan technique, qu'un véritable travail soit fait au niveau des infrastructures des réseaux pour assurer la couverture, les performances, l'interopérabilité et l'accessibilité. Ces éléments sont essentiels pour obtenir des solutions réutilisables et de grandes portées.

Sur le plan opérationnel, il faut assurer la confiance numérique en veillant à l'adhésion des usagers et des professionnels de la santé, à la qualité des ressources humaines et à la mise en place d'un cadre réglementaire et juridique.

Il est important que cette recherche soit poursuivie et améliorée pour un impact de qualité. Les résultats de notre sondage devraient être vérifiés par une étude faite auprès des agents d'un milieu hospitalier tel que le CNHU Hubert Maga de Cotonou. Ce centre qui dispose d'un plateau technique d'un certain niveau et qui est un carrefour de plusieurs spécialités de santé représente à notre avis un cadre idéal pour des résultats pouvant être extrapolés à l'échelle nationale. A partir des résultats obtenus, il serait intéressant de concevoir des objets connectés spécifiques répondant aux besoins détectés mais tenant aussi compte des contraintes environnementales, techniques, sociales et budgétaires de notre pays. Une phase expérimentale pourrait être envisagée dans l'hôpital cible. Elle permettra de relever les insuffisances et d'améliorer la solution IoMT mise en œuvre. Après le suivi-évaluation, une étude pourra être envisagée pour étendre la solution au niveau d'autres centres de santé.

Conclusion

Depuis quelques décennies, une grande révolution numérique bouleverse tous les secteurs de la société. Il est primordial pour chaque pays africain de tirer profit des ouvertures de développement qu'offre cette transformation digitale, en s'équipant et en adaptant les nouvelles technologies à ses réalités économiques et socioculturelles. Dans cette optique, nous avons entrepris d'étudier les enjeux de l'intégration des objets connectés dans le milieu hospitalier béninois, en recherchant les caractéristiques principales des architectures de déploiement qui correspondront le mieux à notre contexte.

Sur la base d'une étude comparative de dix différentes architectures IoMT disponibles dans la littérature, nous avons relevé neuf critères déterminants pour le choix d'un modèle architectural: le nombre de couches, la complexité du modèle, la fiabilité des données, le support des applications en temps réel, la sécurité, le rapport qualité/prix, la consommation énergétique, le type de solutions de connectivité exploitées et la pertinence contextuelle.

Les résultats de notre étude contextuelle nous ont permis d'anticiper sur les éventuels problèmes qui pourraient survenir au cours du déploiement des solutions IoMT dans le milieu hospitalier béninois. Nous avons fait à ce sujet des recommandations techniques telles que l'adoption des solutions basées sur le fog computing, l'IOT cellulaire et une approche basée sur les systèmes pour sécuriser les infrastructures.

Cette étude nous a permis de remarquer le grand retard accumulé par l'Afrique de l'Ouest sur la question de la cybersanté. Nous pensons qu'il serait grandement profitable à toute la sous-région d'investir dans la recherche pour concevoir des objets connectés qui tiennent compte des nos contraintes environnementales, techniques, sociales et budgétaires pour une efficacité optimale.

Bibliographie

- [1] L. Cerina, S. Notargiacomo, M. G. Paccaniti, and M. D. Santambrogio, “*A fog-computing architecture for preventive healthcare and assisted living in smart ambients,*” 2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). 2017.
- [2] C. S. Nandyala and H.-K. Kim, “*From Cloud to Fog and IoT-Based Real-Time U-Healthcare Monitoring for Smart Homes and Hospitals,*” International Journal of Smart Home, vol. 10, no. 2. pp. 187–196, 2016.
- [3] P. Verma and S. K. Sood, “*Fog Assisted-IoT Enabled Patient Health Monitoring in Smart Homes,*” IEEE Internet of Things Journal, vol. 5, no. 3. pp. 1789–1796, 2018.
- [4] I. Azimi et al., “*HiCH: Hierarchical Fog-Assisted Computing Architecture for Healthcare IoT,*” ACM Trans. Embed. Comput. Syst., Sep. 2017.
- [5] A. P. Plageras, K. E. Psannis, Y. Ishibashi, and B.-G. Kim, “*IoT-based surveillance system for ubiquitous healthcare,*” IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2016.
- [6] R. Mahmud, F. L. Koch, and R. Buyya, “*Cloud-Fog Interoperability in IoT-enabled Healthcare Solutions,*” Proceedings of the 19th International Conference on Distributed Computing and Networking - ICDCN '18. 2018.
- [7] O. Debauche, S. Mahmoudi, P. Manneback, and A. Assila, “*Fog IoT for Health: A new Architecture for Patients and Elderly Monitoring,*” Procedia Computer Science, vol. 160. pp. 289–297, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.11.087.
- [8] K. S. Awaisi, S. Hussain, M. Ahmed, A. A. Khan, and G. Ahmed, “*Leveraging IoT and Fog Computing in Healthcare Systems,*” IEEE Internet of Things Magazine, vol. 3, no. 2. pp. 52–56, 2020, doi: 10.1109/iotm.0001.1900096.
- [9] M. T. Villalba, M. Teresa Villalba, M. de Buenaga, D. Gachet, and F. Aparicio, “*Security Analysis of an IoT Architecture for Healthcare,*” Internet of Things. IoT Infrastructures. pp. 454–460, 2016.
- [10] Vankamamidi S. Naresh, Suryateja S. Pericherla, Pilla Sita Rama Murthy, and “*Sivaranjani Reddi Internet of Things in Healthcare, Architecture, Applications, Challenges, and Solutions*” Computer Systems Science & Engineering pp: 411–421, 2020
- [11] P. Sethi and S. R. Sarangi, “*Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications,*” J. Electr. Comput. Eng., vol. 2017, Jan. 2017.

- [12] S. Movassaghi, M. Abolhasan, J. Lipman, D. Smith, and A. Jamalipour, "Wireless Body Area Networks: A Survey," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1658–1686, 2014.
- [13] F. Shanin et al., "Portable and Centralised E-Health Record System for Patient Monitoring Using Internet of Things(IoT)," presented at the International CET Conference on Control, Communication, and Computing (IC4), 2018, pp. 165–170.
- [14] K. N. Swaroop, K. Narendra Swaroop, K. Chandu, R. Gorrepotu, and S. Deb, "A health monitoring system for vital signs using IoT," *Internet of Things*, vol. 5, pp. 116–129, 2019.
- [15] M. M. Rathore, A. Ahmad, A. Paul, J. Wan, and D. Zhang, "Realtime Medical Emergency Response System: Exploiting IoT and Big Data for Public Health," *J. Med. Syst.*, vol. 40, no. 12, p. 283, Dec. 2016.
- [16] H. A. E. Zouka, H. A. El Zouka, and M. M. Hosni, "Secure IoT communications for smart healthcare monitoring system," *Internet of Things*. 2019.
- [17] V. M. Rohokale, N. R. Prasad, and R. Prasad, "A cooperative Internet of Things (IoT) for rural healthcare monitoring and control," 2011 2nd International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic Systems Technology (Wireless VITAE). 2011.
- [18] J. Mohammed, C.-H. Lung, A. Ocneanu, A. Thakral, C. Jones, and A. Adler, "Internet of Things: Remote Patient Monitoring Using Web Services and Cloud Computing," 2014 IEEE International Conference on Internet of Things(iThings), and IEEE Green Computing and Communications (GreenCom) and IEEE Cyber, Physical and Social Computing (CPSCom). 2014.
- [19] K. B. S. Kumar, K. B. Sundhara Kumar, and K. Bairavi, "IoT Based Health Monitoring System for Autistic Patients," *Proceedings of the 3rd International Symposium on Big Data and Cloud Computing Challenges (ISBCC – 16)*. pp. 371–376, 2016.
- [20] A. Onasanya and M. Elshakankiri, "Smart integrated IoT healthcare system for cancer care," *Wireless Networks*. 2019.
- [21] Union Internationale des Télécommunications (Juin 2012) "Présentation générale de l'Internet des objets" [en ligne]. Disponible: <http://tiny.cc/RecommandationUITTY20> consulté le 17/08/2021.
- [22] Organisation Mondiale de la Santé (Août 2020) "Rapport de situation sur la mise en œuvre de la résolution afr/rc62/r5 sur l'observatoire africain de la santé" [en ligne].

Disponible: <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/334107/AFR-RC70-INF-DOC-5-fre.pdf?sequence=1&isAllowed=y> consulté le 17/08/2021.

[23] Nallapaneni Manoj Kumar, Pradeep Kumar Mallick (2018) “*The Internet of Things: Insights into the building blocks, component interactions, and architecture layers*” [en ligne]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050918309049> consulté le 17/08/2021.

[24] Wi6labs (mai 2020) “*Technical aspects of blockchain and IoT*” [en ligne]. Disponible: <https://www.wi6labs.com/2020/05/25/quelle-technologie-radio-pour-vos-objets-connectes-3eme-partie/> consulté le 17/08/2021.

[25] Trend Micro (2018) “*The IoT Revolution: Uncovering Opportunities, Challenges and the Scale of the Security Threat*” [en ligne]. Disponible: <https://documents.trendmicro.com/assets/rpt/rpt-IOT-report.pdf> consulté le 17/08/2021.

[26] Ouest Valorisation (Nov 2017) “*Le Boom des objets connectés en santé*” [en ligne]. Disponible: <https://www.ouest-valorisation.fr/uploads/2021/05/Dossier-The%CC%81matique-Objets-sante%CC%81-connecte%CC%81s.pdf> consulté le 17/08/2021.

[27] Sam-solutions (Sept 2019) “*Fog Computing vs Cloud Computing pour les projets IoT*” [en ligne]. Disponible <https://www.sam-solutions.com/blog/fog-computing-vs-cloud-computing-for-iot-projects/> consulté le 20/08/2021.

[28] Lionel Sujay Vailshery (Mai 2021) “*Internet des objets (IoT) - statistiques et faits*” [en ligne]. Disponible https://www.statista.com/topics/2637/internet-of-things/#dossierSummary__chapter5 consulté le 20/08/2021.

[29] Fondateur de l’avenir (2015) “*Petit guide d’exploration au pays de la santé numérique*” [en ligne]. Disponible https://www.fondationdelavenir.org/wp-content/uploads/2015/11/2015_petitguide_sante_numerique.pdf consulté le 23/08/2021.

[30] IREPS (Juin 2017) “*Applications mobiles, objets connectés et promotion de la santé*” [en ligne]. Disponible https://ireps-bfc.org/sites/ireps-bfc.org/files/dt_ocs_promotion_sante_version_finale.pdf consulté le 02/07/2021.

[31] CNOM “*Santé connectée. Le Livre Blanc du Conseil national de l'Ordre des médecins*” Paris : CNOM, 2015, p. 9. [En ligne]. Disponible : <https://www.dsih.fr/livres-blancs-sih/medecins-sante-connectee.pdf> consulté le 02/09/2021.

[32] Statista Research Department (Décembre 2016) “*L'IoT dans les revenus du marché*”

de la santé dans le monde 2016-2025” [en ligne]. Disponible <https://www.statista.com/statistics/997959/worldwide-internet-of-things-in-healthcare-market-size/> consulté le 21/08/2021.

[33] JMCR (Août 2021) “*Marché des soins de santé numériques – Les principaux géants de la technologie sont à nouveau en effervescence | Allscripts, Cerner, McKesson*” [en ligne]. Disponible <https://androidfun.fr/marche-des-soins-de-sante-numeriques-les-principaux-geants-de-la-technologie-sont-a-nouveau-en-effervescence-allscripts-cerner-mckesson/> consulté le 24/08/2021.

[34] Conor Stewart (Octobre 2020). “*Prévisions mondiales de la part de marché de la sécurité IoT dans le secteur de la santé en 2018 et 2028, par région*” [en ligne]. Disponible <https://www.statista.com/statistics/1033013/healthcare-iot-security-market-share-forecast-worldwide-by-region/> consulté le 24/08/2021.

[35] Statista Research Department (juil 2014) “*Marché mondial de la santé numérique de 2013 à 2020 par segment*” [en ligne]. Disponible <https://fr.statista.com/statistiques/577681/valeur-du-marche-mondial-de-la-sante-numerique-par-segment--2020/> [16] consulté le 24/08/2021.

[36] Laird Connectivity (2019). “*Connectivity Choices for your Medical Device and IoMT Application*” [en ligne]. Disponible <https://connectivity-staging.s3.us-east-2.amazonaws.com/2019-07/062019%20-%20White%20Paper%20-%20Medical.pdf> consulté le 24/08/2021.

[37] République du Bénin, Ministère de la santé (Août 2018) “*Plan national de développement sanitaire 2018-2022*” [en ligne]. Disponible <https://www.prb.org/wp-content/uploads/2020/06/Benin-Plan-National-de-D%C3%A9veloppement-Sanitaire-2018-2022.pdf> consulté le 24/08/2021.

[38] AMREF Health Africa (Déc 2018). “*Livre Blanc des 1ères rencontres de la santé numérique en Afrique de l’Ouest (AO)*”. [en ligne]. Disponible <https://amref.fr/wp-content/uploads/2021/05/livre-blanc-rencontres-sante-numerique-afrique-de-l-ouest.pdf> consulté le 24/08/2021.

[39] Organisation Mondiale de la santé (2017) “*Meilleurs choix et autres interventions recommandées pour lutter contre les maladies non transmissibles*”. [en ligne]. Disponible <https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/259350/WHO-NMH-NVI-17.9-fre.pdf?sequence=1> consulté le 30/08/2021.

[40] Organisation Mondiale de la santé (2021) “*Michael R. Bloomberg et le Dr Tedros appellent à axer prioritairement les efforts mondiaux sur la lutte contre les maladies non transmissibles afin de sauver des vies face à la COVID-19*” [en ligne]. Disponible <https://www.who.int/fr/news/item/03-02-2021-michael-r.-bloomberg-and-dr-tedros->

[adhanom-ghebreyesus-call-for-global-focus-on-noncommunicable-diseases-to-save-lives-from-covid-19](#) consulté le 30/08/2021.

[41] Pierre-Jean Benghozi, Sylvain Bureau, Françoise Massit-Folea (Déc 2011) “*L’Internet des objets. Quels enjeux pour les Européens ?*” [en ligne]. Disponible <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00405070/document> consulté le 28/08/2021.

[42] Lionel Sujay Vailshery (4 mai 2021) “*Chiffre d'affaires mondial des terminaux IoT gouvernementaux 2019-2021, par cas d'utilisation*” [en ligne]. Disponible <https://www.statista.com/statistics/1224790/government-iot-endpoint-revenue-by-use-case/> consulté le 28/08/2021.

[43] Arne Holst.(Mars 2021) “*Chiffre d'affaires du marché IIoT agricole dans le monde 2020-2025*” [en ligne]. Disponible <https://www.statista.com/statistics/1222813/worldwide-agricultural-industrial-iot-market-value/> consulté le 29/08/2021.

[44] Thomas Alsop. (Juil 2020) “*Chiffre d'affaires du marché des capteurs IoT dans le monde 2019-2025*” [en ligne]. Disponible <https://www.statista.com/statistics/993778/worldwide-internet-of-things-sensors-market-size/> consulté le 29/08/2021.

[45] Wikipedia. “*Histoire d’Internet*” [en ligne]. Disponible https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_d%27Internet consulté le 30/06/2021

[46] Frédéric Cavazza. (Juin 2021) “*Les différents stades d’évolution du web : 1.0, 2.0, 3.0...*” [en ligne]. Disponible <https://fredcavazza.net/2021/06/03/les-differents-stades-devolution-du-web/> Consulté le 30 Juin 2021.

[47] Vaadata (Février 2020) “*Livre blanc: Sécurité des technologies sans fil de l’IoT*” France.

[48] Fabrice Alessi (Juin 2021) ‘*Le marché de l’IoT pèsera mille milliards de dollars en 2024*’ [en ligne]. Disponible <https://www.distributique.com/actualites/lire-le-marche-de-l-iot-pesera-mille-milliards-de-dollars-en-2024-31345.html> consulté le 02/07/2021.

[49] Cerner McKesson AT & T Cisco Systems LifeWatch IBM Koninklijke Philips NV Qualcomm Biotelemetry Johnson&Johnson (1^{er} trimestre 2021) “*Analyse de l’industrie des soins de santé numériques, taille du marché, part, tendances, croissance et prévisions 2021 - 2029*” [en ligne]. Disponible <https://jcmarketresearch.com/report-details/1429185> consulté le 02/07/2021.

[50] Wikipedia “*IEEE 802.11ax Wi-Fi 6*” [en ligne]. Disponible https://fr.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.11ax consulté le 02/07/2021.