



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE

DEPARTEMENT : ELECTRONIQUE

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme master II

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Génie Electrique**

Spécialité : **Electronique des Systèmes Embarqués**

Thème

Conception et implémentation d'un système de communication sans fil basse consommation à base des capteurs piézoélectriques pour la détection de chute d'une personne âgée.

Encadré par :

Mme. CHELLI.Z éps. GANA

Présenté par :

M. AIT SAI Salim

M. BACHA Kousseila

Promotion : 2023/2024

Remerciements

Avant tout, nous adressons notre remerciement au dieu le Tout Puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'études pour la réalisation de ce travail que nous espérons être utiles.

Nous exprimons notre profonde et sincère gratitude à Mme. Chelli.Z épouse Mr GANA et Mr GANA.M lui-même qui ont acceptés de nous encadrer, leurs gentillesse, leurs sérieux et leurs sens de responsabilité ont été pour nous un précieux encouragement. Ils n'ont jamais hésité, malgré leurs nombreuses obligations, à être toujours à notre disposition, depuis le début de notre travail.

Nous tenons à dire en particulier un grand merci pour les membres qui se trouvent au laboratoire de notre université pour la coopération et la sympathie qu'ils nous ont toujours montré.

Nous tenons également à remercier infiniment les membres de jury, veuillez accepter de ce travail notre sincère respect et notre profonde reconnaissance.

Enfin, un remerciement éternel à nos parents, ainsi qu'à toute nos familles et à tous nos amis et nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail,

Au dieu le Tout puissant qui m'a inspiré, Qui m'a guidé dans le bon Chemin.

Louanges et remerciements pour votre clémence et miséricorde.

À MES CHERS PARENTS

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentie pour mon instruction Et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutient et L'amour que vous me portez depuis mon enfance Et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours.

Puisse Dieu, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

À tout ma famille en particulier mon frère et sa femme et mes sœurs, merci pour votre sagesse inébranlable et vos conseils qui ont fait de moi la personne qui je suis aujourd'hui.

À mon binôme SALIM, pour son sérieux.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Kosseila

Dédicaces

Je dédie ce travail extraordinaire,

Au dieu le tout puissant qui m'a inspiré, Qui m'a guidé dans le bon Chemin, Remerciements de nous avoir gardé en bonne santé.

À MES TRES CHERS PARENTS « ALLAOUA » et « NADIA »,

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consentie pour mon instruction Et mon bien être, et Toute la famille,

Mon grand frère « AMAYES » pour ces conseils,

Mon petit frère « RAYANE » qui m'obéi toujours,

Et ma petite sœur « THILLELI » pour le dérangement,

Et Pour leurs encouragements et soutiens, je leurs témoignes ma profonde gratitude. Que DIEU les protège.

À tous LES AMIES QUE J'AI CONNU AU COURS MON PARCOURS D'ETUDE

À tous MES AMIES DU VILLAGE « TIROURDA » pour tous leurs dérangements et les bons moments

À mon binôme « KOSSEILA » pour son sérieux.

À tous ceux et celles qui m'ont soutenu pendant ma vie et dans mon parcours d'études de près ou de loin.

Salim

Résumé

Notre projet se concentre sur la surveillance et la détection des chutes chez les personnes âgées, en utilisant un système d'alerte avancé basé sur l'utilisation des capteurs piézoélectriques flexibles PU/NKLNT, conçus par nous-mêmes au laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique (LACGC) de la faculté des sciences.

Ces capteurs génèrent de charges électriques, converties en tension et traitées par un microcontrôleur (ESP32). En calibrant ces capteurs avec une balance électronique afin de déterminer la force appliquée puis nous avons établi une courbe d'étalonnage permettant de détecter avec précision les chutes. Lorsqu'une chute est détectée, une alerte est immédiatement envoyée via un module de transmission LoRaWAN, assurant une réponse rapide et efficace du centre d'assistance professionnelle, améliorant ainsi la sécurité et la prise en charge des personnes âgées.

*Mots clés : Capteurs piézoélectriques flexibles, PU/NKLNT, ESP 32, LoRaWAN

Abstract

Our project focuses on the monitoring and detection of falls among the elderly, using an advanced warning system based on the use of PU/NKLNT flexible piezoelectric sensors, designed by ourselves at the Applied Chemistry and Chemical Engineering Laboratory (LACGC) in the Faculty of Science.

These sensors generate electrical charges, which are converted into voltage and processed by a microcontroller (ESP32). By calibrating these sensors with an electronic balance to determine the force applied, we then established a calibration curve enabling us to accurately detect falls. When a fall is detected, an alert is immediately sent via a LoRaWan transmission module, ensuring a rapid and effective response from the professional assistance center, improving the safety and care of the elderly.

Key-words : Flexible piezoelectric sensor, PU/NKLNT, ESP 32, LoRaWAN

Table des matières

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| CHAPITRE I. État de l'art..... | 3 |
| I.1. Introduction | 3 |
| I.2. Généralités sur la télémédecine..... | 3 |
| I.2.1 Télémédecine pour les personnes âgées | 3 |
| I.2.1.1 Définition de la télémédecine..... | 3 |
| I.2.1.2 Avantages et applications de la télémédecine dans le suivi des personnes âgées | 4 |
| I.2.1.3 Technologies utilisées dans les systèmes de télémédecine pour les personnes âgées | 6 |
| I.3. Systèmes de détection de chute pour les personnes âgées..... | 9 |
| I.3.1 Importance de la détection précoce des chutes chez les personnes âgées | 11 |
| I.3.2 Techniques et technologies de détection de chute existantes | 12 |
| I.4. Conclusion | 14 |
| CHAPITRE II. Fondements théoriques et conception du système | |
| II.1 Introduction | 15 |
| II.2 La piézoélectricité | 15 |
| II.2.1 Historique | 15 |
| II.2.2 Principe de la piézoélectricité | 16 |
| II.2.3 Types de capteur piézoélectrique | 17 |
| II.2.3.1 Cristaux piézoélectriques | 17 |
| II.2.3.2 Céramiques piézoélectriques..... | 17 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| II.2.3.3 Capteur piézoélectrique de type semelles connectées | 18 |
| II.2.4 Caractéristiques des capteurs piézoélectriques..... | 19 |
| II.2.5 Avantages de capteur piézoélectrique | 20 |
| II.2.6 Sélection et caractérisation des capteurs piézoélectriques | 20 |
| II.3 Applications potentielles | 21 |
| II.4 Mécanismes de détection de chute utilisant des capteurs piézoélectriques | 22 |
| II.5 Techniques de transmission sans fil à faible consommation d'énergie | 23 |
| II.5.1 Bluetooth Low Energy (BLE) | 23 |
| II.5.2 Zigbee | 24 |
| II.5.3 LoRaWAN..... | 25 |
| II.6. Conclusion..... | 27 |
| CHAPITRE III. Implémentation et évaluation | 28 |
| III.1 Introduction..... | 28 |
| III.2 Description du système réalisé..... | 28 |
| III.3 Représentation du système réalisé | 29 |
| III.3.1 Capteur piézocomposite PU/NKLNT | 29 |
| III.3.1.1 Procédé de fabrication du film PU/NKLNT..... | 30 |
| III.3.1.2 Conditionnement du capteur piézoélectrique | 32 |
| III.3.2 L'étalonnage (balance électronique)..... | 33 |
| III.3.3 La carte ESP32..... | 34 |
| III.3.4 Le module LoRaWAN | 36 |
| III.4 Résultats et discussions..... | 38 |

Table des matières

| | |
|-----------------------------|----|
| III.5 Conclusion | 40 |
| Conclusion générale | 41 |
| Références bibliographiques | |

Liste des figures

Chapitre I :

| | |
|---|----|
| Figure I.1 : Image représentative du concept de la télémédecine | 3 |
| Figure I.2 : Schématisation du processus de la télécommunication | 5 |
| Figure I.3 : Les différentes technologies utilisées par les utilisateurs de la télémédecine | 6 |
| Figure I.4: Caméras de surveillance utilisées dans la télémédecine | 8 |
| Figure I.5 : Architecture d'un système de pavé piézoélectrique intelligent | 9 |
| Figure I.6 : détecteur de chute pour les personnes âgées à domicile | 10 |
| Figure I.7 : Pavé piézoélectrique équipés d'un capteur de force..... | 11 |
| Figure I.8 : Fonctionnement des capteurs corporels | 13 |

Chapitre II :

| | |
|---|----|
| Figure II.1.A : Effet piézoélectrique direct et B. effet piézoélectrique inverse | 16 |
| Figure II.2 : Représentation du fonctionnement d'une montre en quartz..... | 17 |
| Figure II.3 Exemple de capteur piézoélectrique de type céramique | 18 |
| Figure II.4.A Image représentative des différents éléments constituant les capteurs piézoélectriques et B. image d'un capteur piézocomposite..... | 19 |
| Figure II.5 : Image représentative de l'utilisation du Bluetooth Low Energy dans le domaine de la télémédecine..... | 24 |
| Figure II.6 : Architecture réseau sans fil (maillage) pour le protocole ZigBee | 24 |
| Figure II.7 : Architecture globale de LoRaWAN | 26 |

Chapitre III :

| | |
|---|----|
| Figure III.1 Schéma synoptique de notre système..... | 29 |
| Figure III.2 : Image montre les différentes étapes suivies pour élaborer nos matériaux PU/NKLNT | 31 |
| Figure III.3 : Capteur piézoélectrique de type composite..... | 31 |
| Figure III.4 : Image représentative du processus de polarisation..... | 32 |
| Figure III.5: Circuit de conditionnement du capteur piézoélectrique | 33 |
| Figure III.6 : Balance utilisé pour étalonner le capteur piézoélectrique | 34 |
| Figure III.7: Image représente la carte ESP32 | 35 |
| Figure III.8 : Le module LoRaWAN utilisé dans notre système | 36 |
| Figure III.9 Réponse électrique avec un seul capteur piézoélectrique..... | 39 |
| Figure III.10 Réponse électrique avec deux capteurs piézoélectriques | 40 |

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : Tableau des caractéristiques de quelques technologies sans fil 27

Chapitre III :

Tableau III.1 : Branchement du module LoRaWAN sur la carte ESP32 37

Liste des abréviations

NKLNT : $(\text{Na}_{0.535}, \text{K}_{0.48})_{0.966} \text{Li}_{0.058} \text{Nb}_{0.9} \text{Ta}_{0.1} \text{O}_3$

SPI: Serial Peripheral Interface

SCK: Serial Clock

MOSI: Master Out, Slave In

MISO: Master In, Slave Out

SS: Slave Select

IdO: Internet des Objets

LoRa: Longue Porté

WAN : Réseau Étendu

CAN : Convertisseur Analogique Numérique

LACGC : Laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique

Introduction Générale

Introduction générale

Le vieillissement de la population mondiale est un phénomène majeur aux multiples enjeux, notamment en termes de santé et de bien-être des personnes âgées. L'augmentation de l'espérance de vie et la baisse de la natalité entraînent une hausse croissante du nombre de personnes âgées, souvent confrontées à des problèmes de santé, de mobilité et de fragilité [1].

De nombreuses personnes âgées vivent seules à leur domicile, ce qui les expose à des risques accrus d'accidents domestiques [2], de chutes et de problèmes de santé non détectés. La détection de leur présence et de leur état devient donc un enjeu crucial pour prévenir les situations d'urgence, leur apporter une assistance médicale rapide et assurer leur bien-être général.

Dans ce travail, nous proposons d'employer les capteurs piézoélectriques dans le domaine de la télémédecine afin d'explorer leur utilisation pour la détection des chutes à domicile chez les personnes âgées vivant seules [3]. Cette approche s'appuie sur l'utilisation de ce type de capteurs pour mesurer la force d'une personne lors d'une chute. Ces données précieuses permettent d'identifier la qualité des chutes et d'analyser sa gravité selon notre étude basée sur l'expertise de nos médecins et d'envoyer des alertes aux secours dans le cas d'un humain, favorisant ainsi une intervention rapide et efficace [4].

L'exploitation de la piézoélectricité dans le domaine de la télémédecine pour la détection des chutes constitue une approche récente et innovante. Elle présente un avantage certain par rapport aux techniques existantes en prenant en compte la force et le poids de la personne, permettant une analyse plus précise de la gravité de la chute et une meilleure prise en charge médicale.

Le premier chapitre vise à explorer les fondements théoriques et techniques de la télémédecine et de la piézoélectricité. Dans ce même chapitre nous présenterons également les résultats d'études récentes portant sur l'efficacité de cette technologie et discuterons de ses perspectives d'application concrète dans le domaine de la prise en charge des personnes âgées. Par la suite, nous analyserons en détail les principes de fonctionnement des capteurs piézoélectriques, les modalités de collecte et de traitement des données, ainsi que les algorithmes de détection des chutes. Enfin, nous aborderont l'architecture globale de notre système de surveillance et la méthode de réalisation complète de ce dernier, en suite nous expliqueront toutes les approches utilisées pendant la réalisation et nous exposeront les résultats précis obtenues après une étude approfondie et plusieurs tests effectués.

Introduction générale

En conclusion, ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche visant à identifier des solutions technologiques innovantes pour améliorer la sécurité et le bien-être des personnes âgées vivant seules [5]. L'utilisation des pavés piézoélectriques pour la détection des chutes se présente comme une approche prometteuse et pleine de potentiel, pouvant contribuer à réduire la mortalité et à améliorer la qualité de vie de cette population fragilisée.

Chapitre : I

État de l'art

Chapitre I : État de l'art

I.1 Introduction

Ce premier chapitre explore l'état de l'art sur la télémédecine et les systèmes de détection de chute chez les personnes âgées. Il met en lumière les avantages et les applications de la télémédecine dans le suivi de cette population, par conséquent l'importance de ces technologies dans leurs quotidiens qui est devenue un facteur majeur pour le bien être des personnes âgées.

I.2 Généralités sur la télémédecine

I.2.1 Télémédecine pour les personnes âgées

I.2.1.1 Définition de la télémédecine

La télémédecine est la prestation de services de soins de santé à distance à l'aide de technologies de communication. Cela peut inclure des consultations virtuelles, des échanges de données médicales et des séances de suivi à distance.

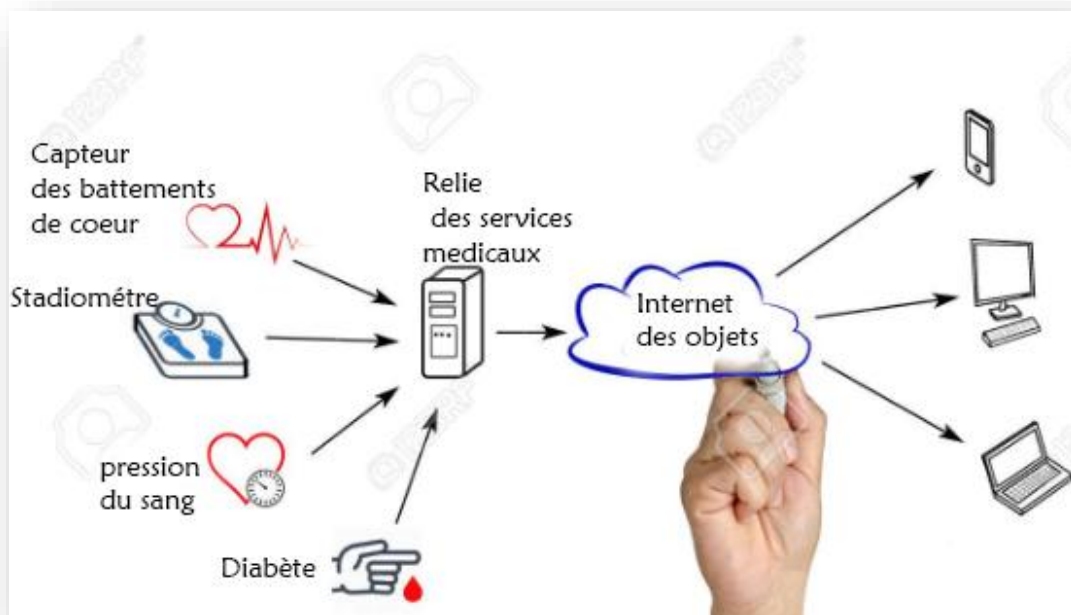


Figure I.1 : Image représentative du concept de la télémédecine.

Chapitre I : État de l'art

I.2.1.2 Avantages et applications de la télémédecine dans le suivi des personnes âgées

La télémédecine continue de se développer rapidement et les informations sur ses coûts et ses avantages intéressent de plus en plus les décideurs dans le domaine des soins de santé [2].

- **Avantages de la télémédecine dans le suivi des personnes âgées**

- **Réduction des déplacements**

La télémédecine permet aux personnes âgées de consulter un médecin à distance, sans avoir à se déplacer au cabinet médical. Cela est particulièrement bénéfique pour les personnes qui ont des difficultés à se déplacer, qui vivent dans des zones rurales ou isolées, ou qui ont des problèmes de santé chroniques [3].

- **Amélioration de l'accès aux soins**

La télémédecine peut combler le manque de médecins dans certaines régions et améliorer l'accès aux soins pour les personnes âgées. Elle permet également de réduire les délais d'attente pour les rendez-vous médicaux.

- **Suivi régulier et personnalisé**

La télémédecine permet de mettre en place un suivi régulier et personnalisé des personnes âgées, notamment celles souffrant de maladies chroniques. Cela permet de détecter et de traiter les problèmes de santé plus rapidement, et d'améliorer la qualité de vie des patients.

- **Diminution des coûts**

La télémédecine peut réduire les coûts des soins de santé pour les patients et pour le système de santé. En effet, elle permet de réduire les déplacements, les hospitalisations et les interventions chirurgicales.

- **Meilleure coordination des soins**

La télémédecine permet de coordonner les soins entre différents professionnels de santé, tels que les médecins, les infirmières, les pharmaciens et les aidants familiaux. Cela permet d'améliorer la qualité des soins et d'éviter les erreurs médicales.

- **Autonomie et sentiment de sécurité**

La télémédecine permet aux personnes âgées de rester à domicile plus longtemps et de se sentir plus en sécurité. En effet, elles peuvent avoir accès à des soins médicaux de qualité sans avoir à quitter leur environnement familial.

Chapitre I : État de l'art

- **Applications de la télémédecine pour le suivi des personnes âgées**

- **Téléconsultation**

La téléconsultation permet aux personnes âgées de consulter un médecin à distance par vidéoconférence. Cela permet au médecin de poser des questions au patient, d'examiner ses symptômes et de prescrire un traitement si nécessaire [4].



Figure I.2 : Schématisation du processus de la télécommunication.

- **Télesurveillance**

La télesurveillance permet de surveiller à distance les paramètres de santé des personnes âgées, tels que la tension artérielle, la glycémie et le poids. Cela permet de détecter les problèmes de santé plus rapidement et d'intervenir avant qu'ils ne s'aggravent [5].

- **Téléassistance**

La téléassistance permet aux personnes âgées de recevoir une assistance à distance en cas d'urgence. Cela permet de leur garantir une sécurité optimale et de leur permettre de vivre plus longtemps à domicile [6].

Chapitre I : État de l'art

➤ **Éducation thérapeutique**

L'éducation thérapeutique permet aux personnes âgées d'apprendre à gérer leur maladie chronique. La télémédecine peut être utilisée pour dispenser de l'éducation thérapeutique à distance, ce qui est particulièrement utile pour les personnes qui vivent dans des zones rurales ou isolées [7].

➤ **Formation des aidants**

La télémédecine peut être utilisée pour former les aidants familiaux à prodiguer des soins à leurs proches. Cela permet d'améliorer la qualité des soins et de réduire la charge des aidant.

I.2.1.3 Technologies utilisées dans les systèmes de télémédecine pour les personnes âgées

Les systèmes de télémédecine pour les personnes âgées utilisent une variété de technologies pour faciliter la communication et le suivi médical à distance.



Figure I.3 : Les différentes technologies utilisées par les utilisateurs de la télémédecine.

Chapitre I : État de l'art

➤ **Téléconsultations vidéo**

Les consultations médicales à distance sont réalisées via des plateformes de visioconférence sécurisées. Les patients âgés peuvent interagir en temps réel avec leurs médecins, discuter de leurs symptômes, poser des questions et obtenir des conseils médicaux[8].

➤ **Applications mobiles de suivi de santé**

Les applications mobiles permettent aux personnes âgées de surveiller leurs paramètres de santé à domicile. Elles peuvent enregistrer des mesures telles que la pression artérielle, le rythme cardiaque, la glycémie, etc. Les données sont automatiquement transmises aux professionnels de santé pour une évaluation continue[9].

➤ **Dispositifs portables de surveillance des signes vitaux**

Les dispositifs portables, tels que les montres intelligentes et les bracelets connectés, permettent de surveiller en temps réel les signes vitaux tels que la fréquence cardiaque, le niveau d'activité physique et la qualité du sommeil. Ces données peuvent être transmises aux professionnels de santé pour un suivi régulier[10].

➤ **Capteurs de mouvement**

Les capteurs de mouvement sont utilisés pour détecter les changements d'activité et de position des personnes âgées. Ils peuvent alerter les professionnels de santé en cas de chute ou de comportement anormal, ce qui permet une intervention rapide en cas d'urgence [11].

Chapitre I : État de l'art

➤ Systèmes de surveillance à domicile

Les systèmes de surveillance à domicile sont équipés de caméras de sécurité qui permettent aux professionnels de santé de surveiller à distance les personnes âgées. Ces caméras peuvent détecter les mouvements et les chutes, et envoyer des alertes en cas de situation critique [12].

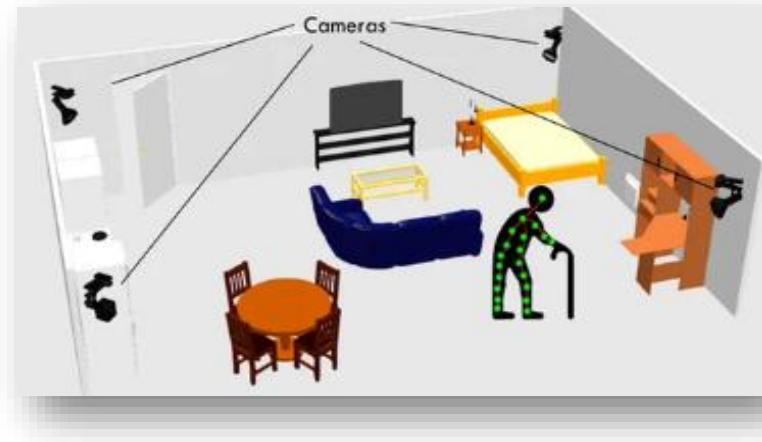


Figure I.4: Caméras de surveillance utilisées dans la télémédecine.

Ces technologies sont conçues pour faciliter la collecte de données médicales, assurer la communication entre les patients et les professionnels de santé, et permettre un suivi médical à distance. Elles contribuent à améliorer la qualité des soins de santé pour les personnes âgées, en offrant un suivi plus régulier, une intervention précoce en cas de problème de santé et une plus grande autonomie dans la gestion de leur propre santé.

Malgré toutes ces techniques le pavé piézoélectrique reste un outil très envisagé par les professionnels de la télémédecine pour la détection des chutes, ce qui permet aux autres technologies de la télémédecine de communiquer l'information de la personne âgée concernée transmise par le pavé piézoélectrique après une chute causée par une crise cardiaque ce qui est cruciale pour la vie de ce patient :

Chapitre I : État de l'art

➤ Pavé piézoélectrique

Les pavés piézoélectriques constituent une solution efficace pour la détection des chutes chez les personnes âgées, offrant une surveillance continue et contribuant de manière significative à la prévention des blessures graves. Ils permettent une détection rapide des chutes, alertant ainsi rapidement les professionnels de santé et leur permettant d'intervenir rapidement en cas de besoin.

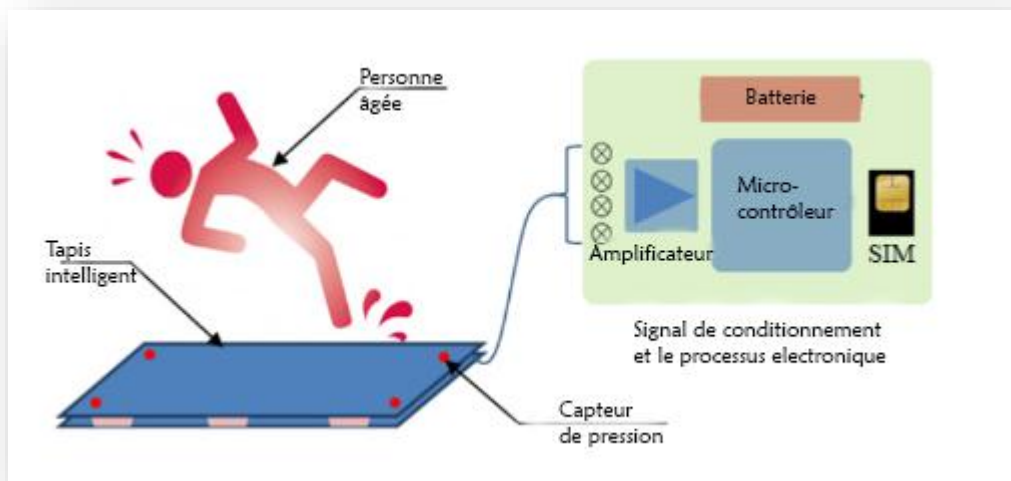


Figure I.5 : Architecture d'un système de pavé piézoélectrique intelligent [13].

I.3. Systèmes de détection de chute pour les personnes âgées

Le risque de chute est en effet l'un des problèmes les plus courants et préoccupants chez les personnes âgées. Selon une étude publiée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS), les chutes sont la principale cause de blessures et de décès accidentels chez les personnes âgées. Il est estimé qu'environ 37,3 millions de chutes nécessitant des soins médicaux surviennent chaque année, dont 646 000 entraînent un décès[14].

➤ Caméras de surveillance

Les caméras de surveillance, installées dans les domiciles ou les établissements de soins, peuvent être utilisées pour détecter les chutes. Les algorithmes de détection d'activité peuvent analyser les mouvements et identifier les chutes, déclenchant ainsi une alerte [15].

Chapitre I : État de l'art

➤ Systèmes de détection de choc

Ces systèmes utilisent des capteurs de choc intégrés dans des dispositifs portables tels que des colliers ou des bracelets. Lorsqu'un impact important est détecté, par lors d'une chute le système déclenche une alerte [16].

➤ Systèmes de détection de position

Les systèmes de détection de position utilisent des technologies telles que le GPS (Global Positioning System) qui est un système de navigation par satellite qui permet de déterminer avec précision la position géographique d'un récepteur GPS n'importe où sur terre, il utilise des signaux émis par des satellites en orbite pour calculer la distance entre le récepteur et les satellites qui le rend un outil indispensable pour suivi la localisation des personnes âgées. Si une personne sort d'une zone prédéfinie ou ne se déplace pas pendant une période prolongée, une alerte est déclenchée.

➤ Boutons d'alerte

Portés autour du cou ou du poignet, ils permettent à la personne âgée de déclencher manuellement une alerte en cas de chute.

➤ Détecteurs de chute portables

Montres, bracelets ou pendentifs qui détectent automatiquement les chutes et déclenchent une alerte.



Figure I.6 : détecteur de chute pour les personnes âgées à domicile.

Chapitre I : État de l'art

➤ Pavé piézoélectrique équipés d'un capteur de force

Sont des dispositifs efficaces pour la détection des chutes chez les personnes âgées. Lorsqu'une personne âgée marche ou se déplace sur le tapis, le capteur de force détecte les changements de pression provoqués par ses mouvements. En cas de chute, la pression exercée sur le tapis change brusquement et parfois jusqu'à atteindre le maximum, ce qui déclenche une alerte[17].

Ils offrent une surveillance continue, discrète et sans dispositif supplémentaire, permettant une intervention rapide en cas de chute et contribuant ainsi à assurer la sécurité et le bien-être des personnes âgées.

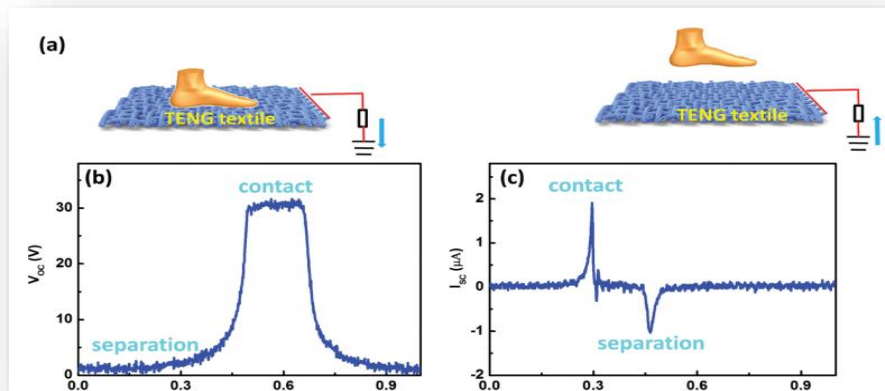


Figure I.7 : Pavé piézoélectrique équipés d'un capteur de force[17].

I.3.1 Importance de la détection précoce des chutes chez les personnes âgées

Les chutes sont un problème de santé publique majeur chez les personnes âgées. En France, on estime que 30% des personnes âgées de plus de 65 ans chutent chaque année. Parmi elles, 10% se blessent gravement et 2% en meurent. La détection précoce des chutes est essentielle pour réduire les risques de blessures graves et de décès. En effet, plus une chute est détectée rapidement, plus vite la personne peut recevoir les soins dont elle a besoin [18].

➤ **Réduction des risques de blessures graves :** Une intervention rapide peut aider à prévenir les complications graves des chutes, telles que les fractures, les hémorragies internes et l'hypothermie.

Chapitre I : État de l'art

- **Amélioration de la qualité de vie** : La détection précoce des chutes peut aider les personnes âgées à retrouver leur confiance en elles et leur indépendance.
- **Surveillance régulière des personnes âgées à risque** : Les membres de la famille, les amis et les professionnels de la santé peuvent surveiller les personnes âgées à risque de chute afin de détecter les premiers signes de fragilisation.
- **Prise en charge médicale immédiate** : En détectant rapidement une chute, les professionnels de santé peuvent fournir une assistance médicale immédiate à la personne âgée. Cela peut inclure des soins d'urgence, des examens médicaux appropriés et des traitements précoces pour minimiser les complications.
- **Rétablissement plus rapide** : Une intervention rapide après une chute peut favoriser un rétablissement plus rapide de la personne âgée. Les soins médicaux précoces, les traitements adéquats et la réadaptation peuvent contribuer à une récupération plus efficace et à une réduction de la durée de convalescence.

Il est important de mettre en place des mesures pour détecter les chutes le plus rapidement possible afin de réduire les risques de complications graves et de décès.

I.3.2 Techniques et technologies de détection de chute existantes

➤ Les réseaux de capteurs sans fil

Utilisent des capteurs de mouvement et de pression pour surveiller les mouvements des personnes âgées et détecter les chutes en temps réel. Ils peuvent être utilisés dans divers environnements tels que les maisons de retraite, les hôpitaux ou les domiciles privés [19].

➤ Les algorithmes de traitement audio

Peuvent détecter les sons caractéristiques des chutes, tels que les bruits de chute ou les cris de douleur. Cette technologie peut être intégrée dans des dispositifs portables ou dans des systèmes de surveillance à domicile [20].

Chapitre I : État de l'art

➤ Détection de fréquence cardiaque

La détection de la fréquence cardiaque peut être utilisée pour détecter les chutes chez les personnes âgées. Lorsqu'une chute se produit, le rythme cardiaque peut subir des variations importantes. Les appareils portables tels que les montres connectées peuvent surveiller en continu la fréquence cardiaque et détecter les changements soudains qui indiquent une chute [21].

➤ Utilisation de réseaux de capteurs corporels

Les réseaux de capteurs corporels sont composés de multiples capteurs portés sur différentes parties du corps, tels que le torse, les membres ou les pieds. Ces capteurs sont capables de détecter les mouvements et les changements de posture, et peuvent être utilisés pour détecter les chutes en analysant les données en temps réel[22].

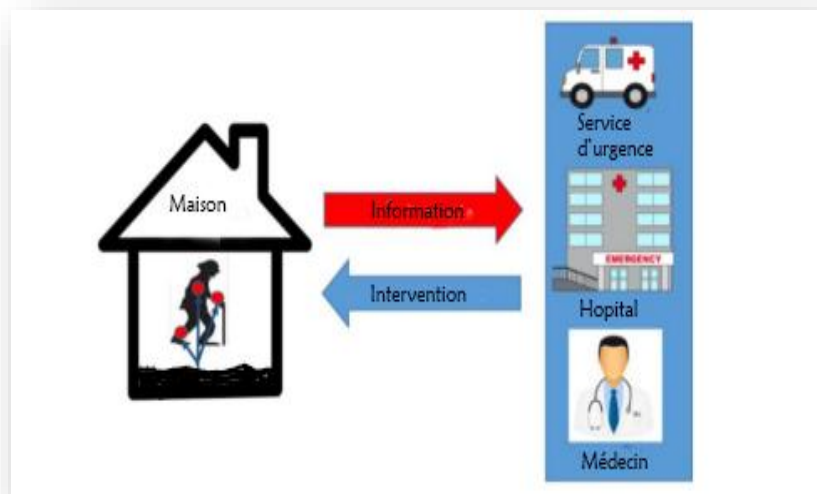


Figure I.8 : Fonctionnement des capteurs corporels.

➤ Systèmes de détection par ultrasons

Les systèmes de détection par ultrasons peuvent être utilisés pour surveiller les mouvements des personnes et détecter les chutes. Ces systèmes utilisent des capteurs à ultrasons pour mesurer les distances entre les objets et peuvent détecter les changements brusques de position qui indiquent une chute [23].

Chapitre I : État de l'art

➤ Utilisation de la technologie GPS

La technologie GPS peut être utilisée pour détecter les chutes en suivant les mouvements d'une personne. Lorsqu'une chute se produit, les changements de position peuvent être détectés par les données GPS, ce qui permet de déclencher une alerte [24].

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté diverses technologies prometteuses en télémédecine et en systèmes de détection de chutes, visant à améliorer le bien-être et la sécurité des personnes âgées. Nous avons également discuté des différents types de capteurs utilisés pour surveiller les chutes chez ces individus.

Chapitre : II

Fondements théoriques et conception du système

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

II.1 Introduction

Dans ce chapitre consacré aux fondements théoriques et à la conception du système de détection de chute pour les personnes âgées, nous allons explorer les principes essentiels et les considérations clés pour mettre en place un système efficace de détection de chute pour les personnes âgées, et nous examinerons en détail les aspects importants à prendre en compte pour garantir l'efficacité de ce système.

II.2 La piézoélectricité

II.2.1 Historique

La piézoélectricité, précisément l'effet piézoélectrique direct, a été découvert sur des cristaux de quartz en 1880 par Pierre et Jacques Curie à la faculté des sciences de Paris [25]. L'effet inverse de la piézoélectricité en revanche a été prédit un an plus tard par Gabriel Lippmann en se basant sur des calculs thermodynamiques, un effet que les frères Curie ont vérifié et validé par la suite. La première application de la piézoélectricité a été montrée pendant la première guerre mondiale, une période pendant laquelle Paul Langevin [26] et ses collaborateurs ont pu concevoir un sonar permettant, grâce à deux plaques en acier et un hydrophone, de calculer la distance entre les objets. Le premier oscillateur à quartz, quant à lui, a vu le jour au début de l'année 1920 grâce à Walter Cady [27]. C'est dans les années 40 que furent découverts des sels piézoélectriques comme le baryum. À partir de ce moment-là, d'autres applications ont vu le jour, ouvrant la porte à de multiples travaux de recherches. Cette thématique qui aborde plusieurs points, allant de la compréhension du phénomène jusqu'à la course vers la découverte de nouveaux matériaux, a sollicité l'intérêt de plusieurs laboratoires et même des industriels. Pendant la seconde guerre mondiale, un véritable saut technologique a été réalisé, plusieurs équipes de recherche mondiales (Japon, États-Unis, Russie) se sont mises à travailler sur la piézoélectricité. Ces travaux de recherches ont contribué à la découverte des propriétés piézoélectriques dans la céramique de synthèse composée d'oxydes à structure pérovskite : le titane de baryum (BaTiO_3) puis un peu plus tard le titano-zirconate de plomb (PZT).

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

II.2.2 Principe de la piézoélectricité

La piézoélectricité, du mot grec pézein qui veut dire presser ou appuyer, est une propriété que possèdent certains matériaux comme le quartz, topaze, polymères etc. Depuis sa découverte, le phénomène piézoélectrique est largement utilisé en raison de sa capacité à exploiter l'effet direct, l'effet inverse ou les deux simultanément.

Lorsqu'une contrainte mécanique est appliquée à ces matériaux, le déplacement des ions génère un potentiel électrique, c'est ce qu'on appelle l'effet piézoélectrique direct (Figure 2. 1). Inversement, lorsqu'un champ électrique est appliqué, le déplacement des ions par des forces électrostatiques entraîne une déformation mécanique, on parle dans ce cas de l'effet piézoélectrique inverse.

La piézoélectricité est reconnue pour son efficacité, sa fiabilité, sa facilité de mise en œuvre et son coût relativement abordable. Ce phénomène utilisé dans les domaines de l'acoustique, de la médecine, de la détection de vibrations, de l'industrie et bien d'autres.

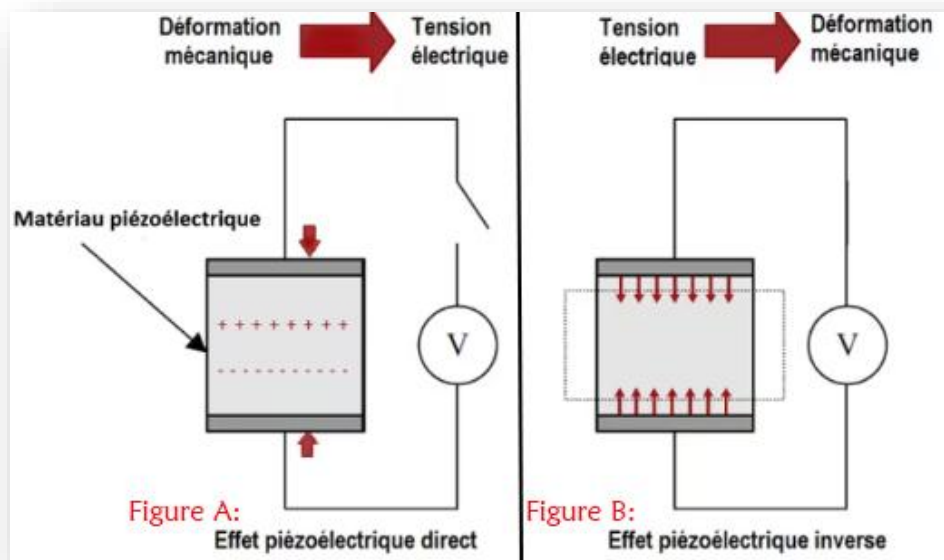


Figure II.1.A : Effet piézoélectrique direct et B. effet piézoélectrique inverse.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

II.2.3 Types de capteur piézoélectrique

II.2.3.1 Cristaux piézoélectriques

La piézoélectricité est présente dans de nombreux cristaux, parmi lesquels on peut citer la tourmaline, les phosphates, les sucres et bien d'autres cristaux. Cependant, cet effet n'est pratiquement exploité que dans le quartz, qui est un matériau avec un coefficient piézoélectrique faible, mais avec des caractéristiques stables dans le temps, il est utilisé dans la fabrication de capteurs comme l'accéléromètre sismique et dans la plupart des montres mécaniques disponibles sur le marché [28].

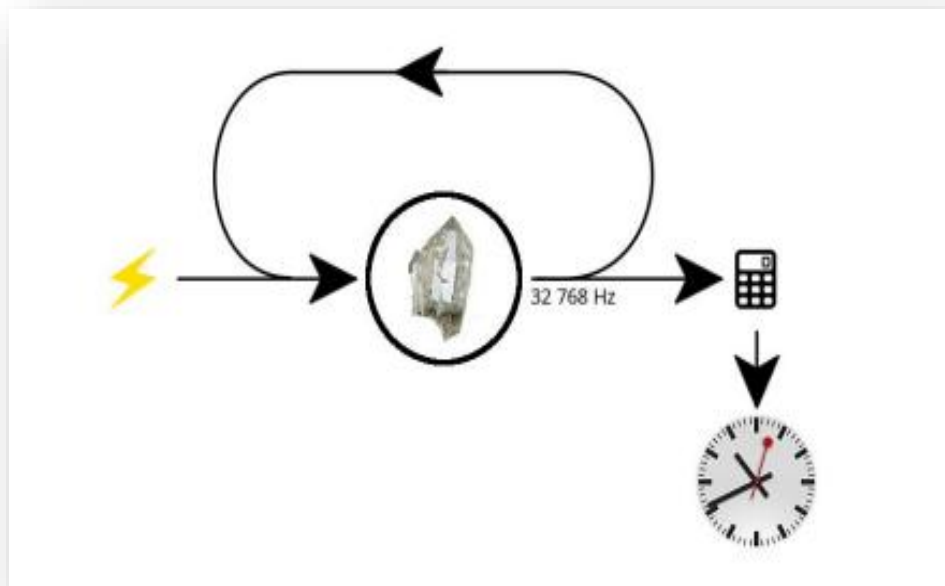


Figure II.2 : Représentation du fonctionnement d'une montre en quartz.

II.2.3.2 Céramiques piézoélectriques

Les céramiques synthétiques représentent le pourcentage des matériaux piézoélectriques le plus utilisé de nos jours. Elles sont fabriquées par frittage de mélange d'oxydes dont le procédé de fabrication est adapté aux besoins industriels. Dans la télémédecine par exemple, les céramiques sont utilisées dans la conception des tapis piézoélectrique [29].

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

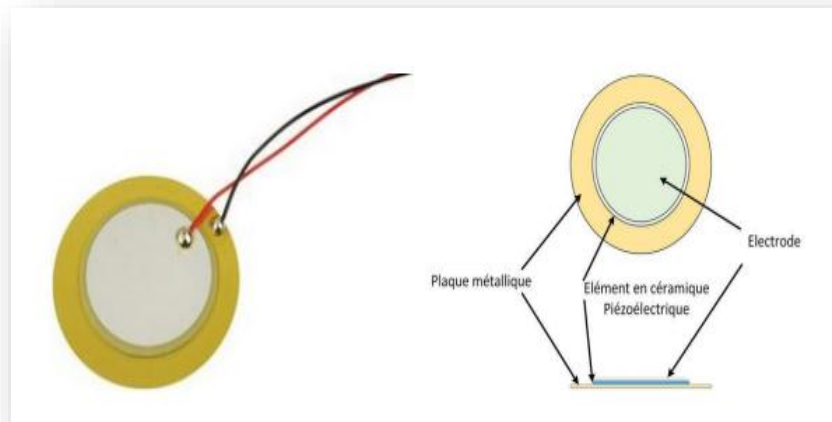


Figure II.3 Exemple de capteur piézoélectrique de type céramique.

Un capteur piézoélectrique peut être constitué, par exemple, d'une couche de PZT (TitanioZirconate de Plomb) placé en sandwich entre deux électrodes métalliques, la simplicité de fabrication est un grand avantage des céramiques. Il existe de très nombreuses compositions différentes de céramiques dont les propriétés diélectriques et mécaniques varient considérablement (formes, tailles et différentes orientations de la polarisation) de sorte que l'on trouve toujours une céramique adaptée à une application particulière.

II.2.3.3 Capteur piézoélectrique de type semelles connectées

Un capteur piézoélectrique de type semelles connectées, est un dispositif qui utilise l'effet piézoélectrique pour mesurer la pression, la force et le mouvement du pied pendant la marche ou la course et les chutes.

Les capteurs piézoélectriques utilisés dans ce travail ont été fabriqués au sein de notre université en collaboration avec le laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique de la faculté des sciences. Ce Type de capteur a été développé sous forme de films minces utilisant un matériau composite sans plomb. Ces films minces sont réalisés par la méthode tape casting, procédé que nous allons bien expliquer par la suite de ce chapitre.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

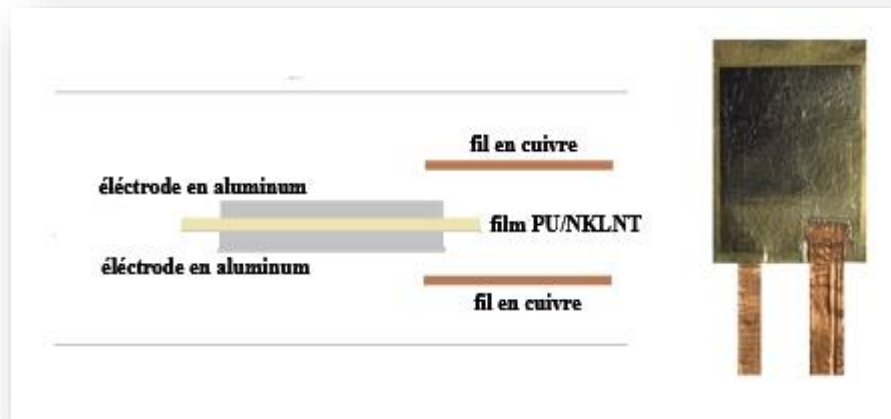


Figure II.4.A Image représentative des différents éléments constituant les capteurs piézoélectriques et B. image d'un capteur piézocomposite.

II.2.4 Caractéristiques des capteurs piézoélectriques

Les capteurs piézoélectriques possèdent plusieurs caractéristiques qui les rendent adaptés à de nombreuses applications.

➤ **Sensibilité élevée**

Les capteurs piézoélectriques ont une sensibilité élevée, ce qui signifie qu'ils peuvent détecter de petites variations de pression, de force ou de déformation. Cela les rend idéaux pour des mesures précises et sensibles.

➤ **Réponse rapide**

Les capteurs piézoélectriques ont une réponse rapide, ce qui signifie qu'ils peuvent détecter et mesurer des variations rapides de pression ou de force. Cela les rend appropriés pour des applications nécessitant une détection en temps réel.

➤ **Large plage de fréquence**

Les capteurs piézoélectriques peuvent détecter des variations de fréquence allant de très basses fréquences à des fréquences élevées. Ce qui les rend polyvalents et adaptés à une large gamme d'applications, y compris la détection de vibrations et les mesures acoustiques.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

➤ Large plage de température

Les capteurs piézoélectriques peuvent fonctionner dans une large plage de températures, allant généralement de -40 °C à 150 °C. Cela les rend adaptés à des environnements extrêmes et à des applications nécessitant des mesures dans des conditions de température variables.

➤ Compact et léger

Les capteurs piézoélectriques sont généralement compacts et légers, ce qui facilite leur intégration dans des dispositifs et des systèmes. Cela les rend pratiques pour une utilisation dans des applications où l'espace et le poids sont des facteurs critiques.

➤ Large bande passante

Les capteurs piézoélectriques ont une large bande passante, ce qui signifie qu'ils peuvent détecter des variations de fréquence sur une large plage. Cela les rend appropriés pour des mesures dans des domaines tels que l'acoustique, la dynamique des structures et la surveillance des vibrations.

II.2.5 Avantages de capteur piézoélectrique :

- **Flexibilité et confort** : La conception souple des capteurs assure un confort optimal pour l'utilisateur, permettant une utilisation prolongée sans gêne.
- **Portabilité** : Intégrés dans des semelles, les capteurs s'intègrent discrètement dans les chaussures et peuvent être utilisés dans des environnements quotidiens.
- **Mesure précise** : La technologie piézoélectrique offre une mesure précise de la pression et d'autres paramètres biomécaniques.

II.2.6 Sélection et caractérisation des capteurs piézoélectriques

Lors de la sélection et de la caractérisation des capteurs piézoélectriques, il est important de prendre en compte plusieurs aspects. :

➤ Type de capteur

Il existe différents types de capteurs piézoélectriques, tels que les capteurs de pression, les capteurs d'accélération, les capteurs de vibration, etc.[38].

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

➤ Gamme de mesure

Indique la plage de valeurs de la grandeur physique que le capteur peut mesurer. Il est crucial de choisir un capteur avec une plage de mesure adaptée à l'application [39].

➤ Sensibilité

La sensibilité d'un capteur piézoélectrique indique la variation du signal de sortie en réponse à une variation donnée de la pression, de l'accélération ou de la vibration, exprimée en mV/N, pc/g ou mV/m/s. Une sensibilité élevée est généralement souhaitable pour des mesures précises de faibles signaux [40].

II.3 Applications potentielles :

➤ **Domaine médical :**

- Suivi de la rééducation et de la démarche chez les patients souffrant de troubles musculo-squelettiques.
- Analyse de la posture et de la répartition de la pression pour prévenir les blessures et améliorer la santé des pieds.
- Évaluation de l'efficacité des traitements et des interventions médicales.

➤ **Domaine sportif :**

- Optimisation des performances des athlètes en analysant la technique de course et en identifiant les zones d'amélioration.
- Prévention des blessures sportives en surveillant les charges et les impacts sur les articulations.
- Personnalisation de l'entraînement et du matériel sportif en fonction des données biomécaniques individuelles.

➤ **Domaine de la vie quotidienne :**

- Surveillance de l'activité physique et de la posture pour promouvoir un mode de vie sain.
- Aide à la navigation et à l'orientation pour les personnes âgées ou malvoyantes.
- Développement de jeux vidéo et d'applications interactives immersives basées sur les mouvements du corps.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

II.4 Mécanismes de détection de chute utilisant des capteurs piézoélectriques

Les capteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour la détection de chute de différentes manières.

➤ **Détection d'impact**

Lorsqu'une personne tombe, il y a généralement un impact ou une force de choc associée à la chute. Les capteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour détecter ces impacts en mesurant les variations de pression ou de force. Lorsque le capteur détecte une force d'impact au-dessus d'un certain seuil prédéfini, il déclenche une alarme ou une action pour signaler la chute[30].

➤ **Détection de mouvement brusque**

Les capteurs piézoélectriques peuvent également être utilisés pour détecter des mouvements brusques ou des changements rapides de vitesse. Lorsqu'une personne tombe, il y a souvent une accélération soudaine suivie d'un arrêt brusque. Les capteurs piézoélectriques peuvent mesurer ces variations rapides de l'accélération et du mouvement, ce qui permet de détecter la chute[28].

➤ **Détection de position ou d'orientation anormale**

Les capteurs piézoélectriques peuvent être utilisés pour surveiller la position ou l'orientation d'une personne. En détectant des changements significatifs dans la position ou l'orientation du corps, les capteurs piézoélectriques peuvent identifier des situations anormales qui pourraient indiquer une chute.

➤ **Détection de vibrations ou de secousses**

Les capteurs piézoélectriques peuvent également être utilisés pour détecter les vibrations ou les secousses associées à une goulotte. Lorsqu'une personne tombe, il y a souvent des mouvements vibratoires ou des secousses du corps. Les capteurs piézoélectriques peuvent mesurer ces vibrations et secousses, ce qui permet de détecter la chute [31].

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

II.5 Techniques de transmission sans fil à faible consommation d'énergie

À l'avenir, les capacités de détection biochimique pourraient être améliorées en développant des systèmes de détection sans fil autoalimentés. En intégrant les tapis piézoélectriques avec des technologies de communication sans fil à faible consommation, telles que Bluetooth Low Energy (BLE), LoRaWAN ou Zigbee. Avec ces technologies on peut arriver à créer des systèmes de détection sans fil auto-alimentés de pointe. Ces systèmes innovants ont le potentiel de révolutionner la surveillance et la transmission de données dans les régions éloignées, inaccessibles ou dangereuses. Dans des environnements éloignés, inaccessibles ou dangereux, en fournissant des informations en temps réel pour améliorer la prise de décision et les interventions en temps voulu. Décisionnelles et des interventions opportunes.

Le développement de ces systèmes non seulement souligne l'importance de la recherche interdisciplinaire, mais ouvre également de nouvelles possibilités pour une détection biochimique durable, efficace et accessible dans diverses applications[32].

II.5.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

Depuis son apparition en 1999 [33], la transmission sans fil Bluetooth n'a cessé d'évoluer et de progresser au fil du temps. Comme d'autres protocoles, le Bluetooth utilise une onde radio sur la bande de fréquence de 2.4 GHz pour communiquer avec les appareils et leur permettre d'échanger des données ou des fichiers. Contrairement aux autres réseaux, le Bluetooth n'utilise pas de pont pour le contrôle ni de passerelle, rendant ainsi son utilisation facile et pratique. Cette technologie s'est rapidement intégrée dans de nombreuses applications et appareils du quotidien. Le Bluetooth LOW Energy (BLE) ou Bluetooth basse consommation est une méthode de transmission apparue en 2010 avec la sortie de la version 4.0 du Bluetooth présentant le même débit que le Bluetooth classique mais avec une consommation d'énergie 10 fois plus faible. Comme le Bluetooth classique, le BLE a connu plusieurs évolutions dès son apparition. L'intégration du Bluetooth dans les systèmes connectés intelligents a orienté les recherches vers une nouvelle direction, celle du Bluetooth moins gourmand en énergie avec les meilleures performances possibles [34] .

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

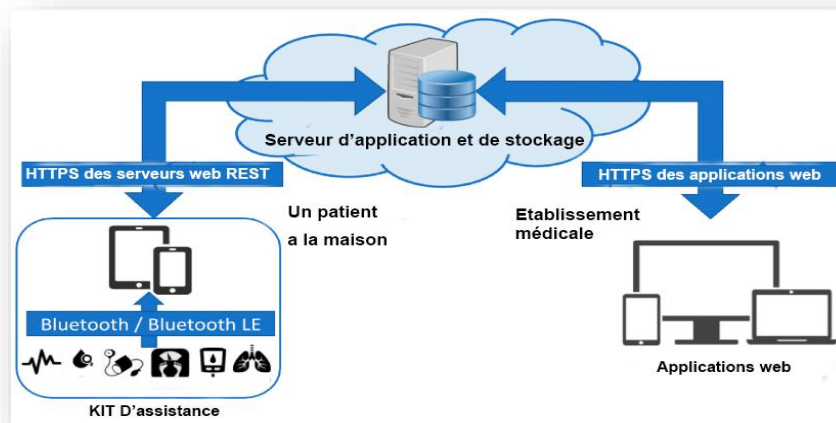


Figure II.5 : Image représentative de l'utilisation du Bluetooth Low Energy dans le domaine de la télémédecine.

II.5.2 Zigbee

Le ZigBee est un protocole de communication radio apparu en 2002 [35]. Ce protocole à faible consommation est basé sur la norme IEEE 802.15.4, il est conçu pour fonctionner en mode veille jusqu'à la réception d'un signal, ce qui lui donne une plus grande autonomie énergétique comparée au wifi et au Bluetooth. Ce protocole est utilisé dans la domotique pour les maisons intelligentes dans le but de relier un nombre illimité d'objets connectés, mais à courte portée. L'open source est l'avantage du protocole ZigBee ce qui rend ses spécifications modifiables, améliorables et personnalisables, mais en même temps, ceci peut nuire à sa compatibilité avec d'autres appareils.



Figure II.6 : Architecture réseau sans fil (maillage) pour le protocole ZigBee.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

Le maillage (figure II.6) représente la structure du réseau sans fil du ZigBee. Les différents appareils communiquent entre eux pour un fonctionnement optimal, néanmoins pour recevoir des notifications des appareils et envoyer des commandes avec des appareils mobiles, le ZigBee requiert l'utilisation d'une passerelle et d'une connexion internet pour le contrôle à distance des dispositifs connectés.

II.5.3 LoRaWAN

LoRaWAN est une nouvelle technologie de réseau étendu à faible consommation d'énergie (LPWAN) qui vise à devenir la norme de facto en matière de connectivité sans fil pour l'Internet de fait en matière de connectivité sans fil pour les applications de l'internet des objets (IoT). Les aspects les plus importants de la technologie LPWAN est sa capacité à fournir des services qui couvrent des zones de plusieurs kilomètres et à être mis en œuvre de manière simple et peut être implémentée dans des appareils qui fonctionnent avec une très faible consommation d'énergie[36].

LoRaWAN permet le déploiement de réseaux publics et privés, ces réseaux fonctionnent de la même manière que les réseaux cellulaires. LoRa est l'abréviation de Long Range, et il s'agit d'une couche physique qui fonctionne sur des bandes sans licence (EU 868 MHz, US 433 MHz) avec sa modulation unique. La modulation LoRa est basée sur la modulation Chirp Spread Spectrum (CSS). En outre, LoRa met en œuvre certaines améliorations par rapport à la modulation Frequency Shift [37].

➤ Architecture de LoRaWAN

LoRaWAN est une technologie LPWAN économe en énergie conçue pour résoudre les problèmes de consommation d'énergie et de couverture dans les applications de l'IOT. La spécification définit les politiques de sécurité et les services de localisation. Étant donné que la modulation LoRa fonctionne sur les bandes ISM il est possible de déployer des réseaux LoRaWAN privés et publics. D'un point de vue architectural, le système comporte trois composants principaux : (i) les nœuds d'extrémité, (ii) les passerelles (GW) et les serveurs de réseau (ou centres de données). Les réseaux LoRaWAN sont déployés sous la forme d'une topologie en étoile et les GW constituent le lien entre les serveurs et les nœuds du réseau. Entre les serveurs de réseau et les nœuds. La communication du nœud au GW peut s'appuyer sur la modulation LoRa ou FSK avec différents

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

canaux et débits de données. Les GW sont connectés au serveur de réseau via la technologie IP standard. L'aperçu architectural de LoRaWAN est présenté dans la figure 2.6[37].

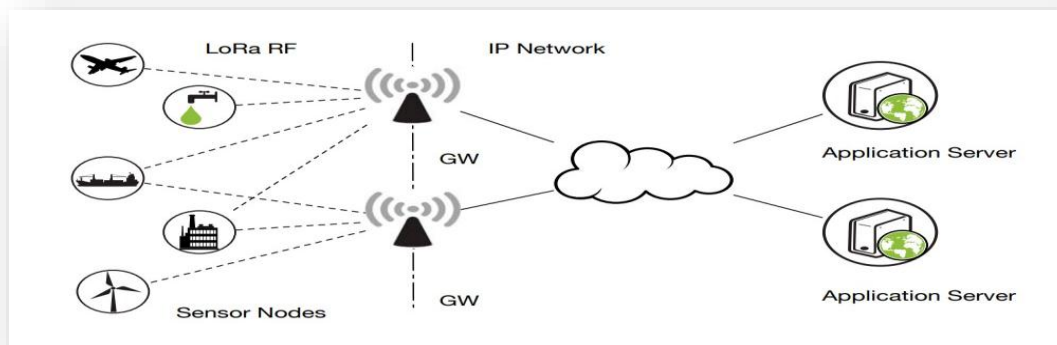


Figure II.7 : Architecture globale de LoRaWAN.

➤ Avantages du protocole LoRaWAN

Le protocole LoRaWAN présente plusieurs avantages pour les applications IoT, notamment :

- **Portée longue portée :** Les dispositifs LoRaWAN peuvent transmettre des données sur des distances allant jusqu'à plusieurs kilomètres, ce qui le rend idéal pour les applications dans des zones rurales ou reculées.
- **Faible consommation d'énergie :** Les dispositifs LoRaWAN peuvent fonctionner sur batterie pendant plusieurs années, ce qui en fait un choix idéal pour les applications où l'alimentation électrique est limitée.
- **Coût bas :** Les dispositifs et les passerelles LoRaWAN sont relativement peu coûteux, ce qui les rend accessibles à un large éventail d'applications.
- **Sécurité :** LoRaWAN utilise un cryptage de bout en bout pour protéger les données contre les accès non autorisés.
- **Évolutivité :** Les réseaux LoRaWAN peuvent être facilement étendus pour prendre en charge un grand nombre de dispositifs.

Chapitre II : Fondements théoriques et conception du système

➤ Inconvénients de la technologie LoRaWAN

Le réseau LoRa IdO présente de nombreux avantages, mais aussi elle a certains inconvénients :

- **Interface du spectre** : Les canaux de bande de fréquences sans licence de transmission de données peuvent être sensibles aux interférences.
- **Besoin de construire un nouveau réseau** : Les utilisateurs doivent créer leur propre réseau pendant le processus de déploiement LoRa.
- **Le débit de données du réseau de communication LoRaWAN** est faible et a une limite d'octets.

Pour résumer, le Tableau 1 est réalisé en regroupant les caractéristiques des différents protocoles de communication :

| Paramètre | loRaWAN | Bluetooth (BLE) | ZigBee |
|------------------------|----------------|-----------------|--------------------|
| Fréquence | 868 Mhz | 2.4 GHz | 868/915 Mhz,2.4Ghz |
| Porté | 2-15km | 10 m | 100 m |
| Consommation d'énergie | Faible | Faible | Faible |
| Débit | 300 bps-50kbps | 1 Mbits | 250 kbits |
| Cout | Elevé | Faible | Faible |
| Autonomie | Années | Mois | Années |

Tableau II.1 : Tableau des caractéristiques de quelques technologies sans fil.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a exposé les principes fondamentaux et les considérations essentielles pour concevoir un système de détection de chutes efficace destiné aux personnes âgées. Il a examiné les défis et les opportunités liés à cette détection et a posé les bases pour une discussion plus approfondie sur les différentes approches technologiques et les algorithmes de détection des chutes. L'objectif est de concevoir un système robuste, fiable et adapté aux besoins des personnes âgées.

Chapitre : III
Implémentation et
évaluation

Chapitre III : Implémentation et évaluation

III.1 Introduction :

Le dernier chapitre de notre étude se concentre sur la conception et la réalisation d'un pavé piézoélectrique pour la détection de chutes des personnes âgées. Notre objectif principal est d'identifier des solutions technologiques innovantes pour améliorer la sécurité et le bien-être des de ces personnes en utilisant des fonctionnalités intelligentes. Pour cela, nous avons sélectionné avec soin le matériel à utiliser, tel que le capteur piézoélectrique, la balance électronique, la carte de développement ESP et le module LoRaWAN.

Dans ce chapitre, nous présenterons en détail ces composants et leur fonctionnement, ainsi que les résultats obtenus grâce à notre système.

III.2 Description sur notre système

Notre système offre une solution de surveillance et de détection des chutes pour les personnes âgées vivant seules, grâce à un capteur piézoélectrique flexible intégré au sol. Ce capteur repose sur le principe de l'effet direct de la piézoélectricité, générant des charges électriques en réponse à une force appliquée. Ces charges sont converties en tension via un circuit de conditionnement charge-tension. Une carte de développement ESP32 est utilisée pour acquérir les signaux électriques détectés lors d'une chute et les transmettre ensuite, grâce à un module de transmission LoRaWAN, au service de santé, alertant ainsi le médecin traitant de la personne surveillée.

La figure suivante montre le schéma synoptique de notre système réalisé :

Chapitre III : Implémentation et évaluation

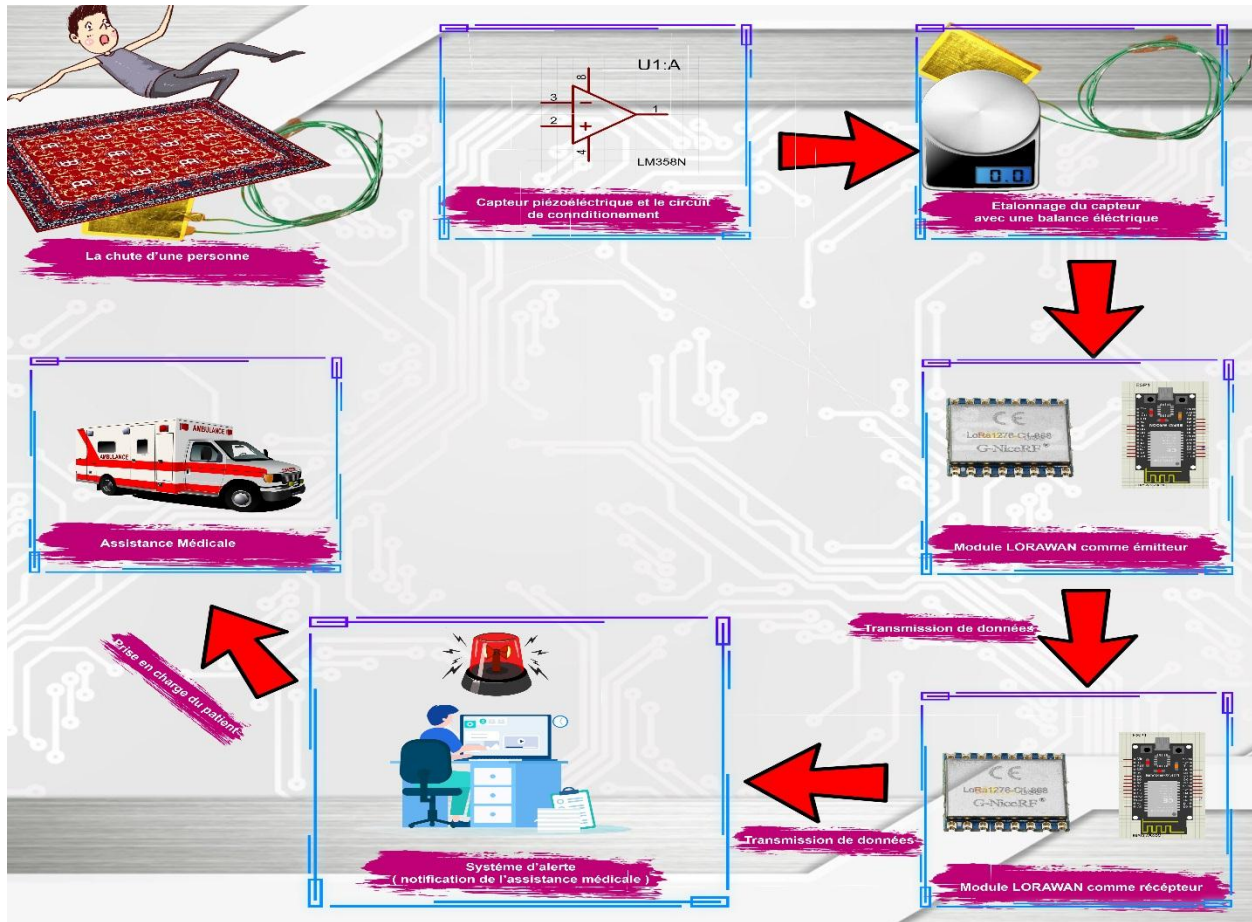


Figure III.1 Schéma synoptique de notre système.

III.3 Représentation du système réalisé

III.3.1 Capteur piézocomposite PU/NKLNT

➤ Présentation

Ce type de capteurs piézoélectriques utilisé dans ce travail a été fabriqué au sein de notre université en collaboration avec le laboratoire de Chimie Appliquée et Génie Chimique (LCAGC) de la faculté des sciences. Le composite PU/NKLNT a été développé sous forme de films minces utilisant un polymère polyuréthane (PU) renforcé par des particules ferroélectriques sans plomb abrégées NKLNT. Ce matériau composite est élaboré par la méthode tape casting, procédé que nous allons bien expliquer par la suite :

Chapitre III : Implémentation et évaluation

III.3.1.1 Procédées de fabrication du capteur piézocomposite

➤ **Élaboration des films PU/NKLNT**

Les matériaux utilisés pour l'élaboration de notre matériau composite sont composées d'une matrice polymère Polyuréthane (PU) renforcée par des particules ferroélectriques sans plomb $[(\text{Na}_{0.535} \text{K}_{0.480})_{0.966} \text{Li}_{0.058}] (\text{Nb}_{0.90} \text{Ta}_{0.10}) \text{O}_3$, abrégée NKLNT, synthétisées au sein du même laboratoire (LCAGC).

Les étapes d'élaboration de ces matériaux sont les suivantes :

1. Dissolution des granules de PU dans le Cyclohexane sous la hotte, à 80°C et à haute agitation mécanique jusqu'à l'obtention d'une solution visqueuse (environ 1 H).
2. Incorporation des charges NKLNT sous les mêmes conditions citées précédemment.
3. Agitation mécanique dans les mêmes conditions jusqu'à l'obtention d'une solution homogène.
4. Mise en forme par coulage en bande en versant la solution obtenue sur des plaques en verre afin de former de films minces.
5. Séchage des films dans une étuve à 60°C pendant 12 heures, puis à 125°C pendant 3 heures pour éliminer complètement le solvant.

Les étapes d'élaboration des films PU/NKLNT sont résumés dans la figure suivante :

Chapitre III : Implémentation et évaluation

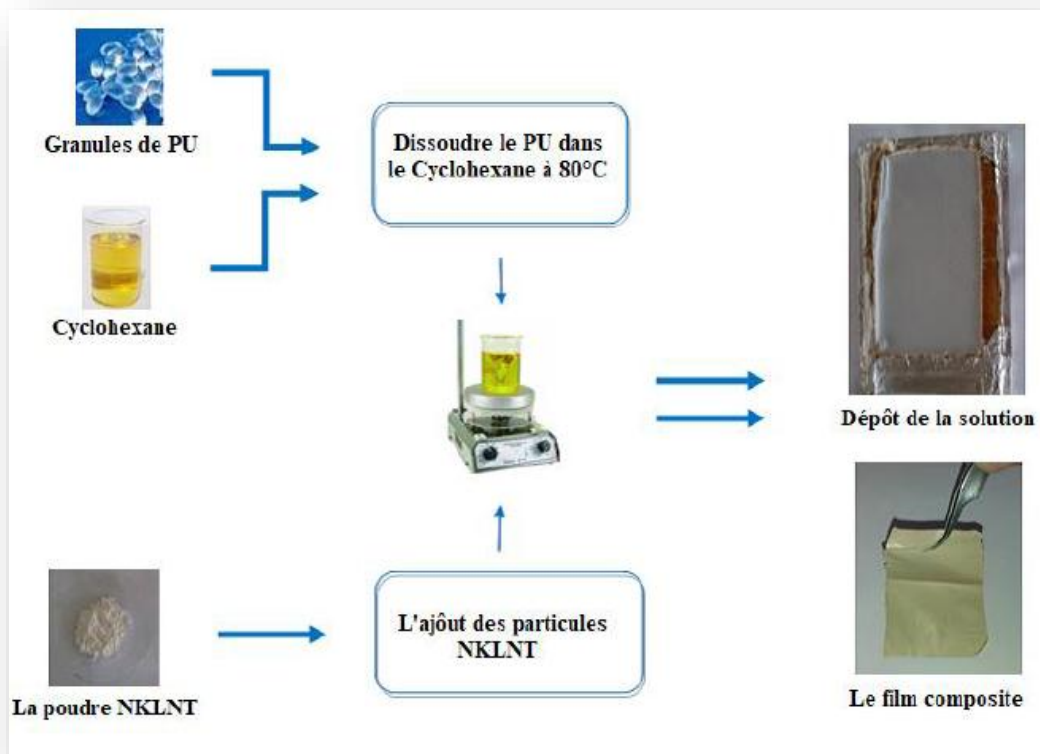


Figure III.2 : Image montre les différentes étapes suivies pour élaborer nos matériaux PU/NKLNT.

➤ **Métallisation (dépôt d'électrodes en aluminium)**

Cette étape consiste en le dépôt d'électrodes en Aluminium sur les deux faces du film composite afin d'avoir un condensateur. Des fils électriques seront ensuite placés afin d'extraire les charges pour des mesures ultérieures. La figure suivante montre le matériau composite après avoir déposé les électrodes.



Figure III.3 : Capteur piézoélectrique de type composite.

Chapitre III : Implémentation et évaluation

➤ Polarisation

La polarisation fait référence à l'application d'une tension ou d'un courant à un composant électronique pour le rendre opérationnel ou pour obtenir un certain comportement souhaité, et pour avoir ce dernier il existe plusieurs méthodes et cela dépend du domaine de travail.

Dans notre cas, le film PU/NKLNT a été placé entre deux armatures en métal à l'air libre, en lui appliquant un champ électrique intense et suffisant de 109,1 KV/Cm jusqu'à saturation pendant deux heures.

Le procédé de polarisation est illustré sur la figure suivante :



Figure III.4 : Image représentative du processus de polarisation.

III.3.1.2 Conditionnement du capteur piézoélectrique

Un circuit de conditionnement est essentiel dans la mesure électrique avec des capteurs pour plusieurs raisons telles que : l'amplification, le filtrage, la conversion et l'adaptation d'impédance. Dans notre cas, nous avons remarqué une différence d'impédance entre le capteur piézoélectrique et le système de traitement. Pour cette raison, un premier étage avec un suiveur a été utilisé pour maximiser le transfert et minimiser les pertes de données. Un deuxième étage d'amplification a

Chapitre III : Implémentation et évaluation

également été employé pour amplifier le signal généré par le capteur piézoélectrique afin de le rendre utilisable par le système de traitement.

Notre capteur piézoélectrique produit des charges électriques qui ne peuvent pas être directement utilisées par le système de traitement. Le circuit de conditionnement convertit ces charges en une tension électrique, qui est une forme exploitable. L'amplificateur de charges est principalement composé d'un amplificateur inverseur à fort gain et d'une contre-réaction capacitive. Son principe consiste à imposer, via l'amplificateur, une différence de potentiel nulle entre les deux électrodes du capteur, afin d'annuler l'influence des capacités (câblage ou capteur). Les charges sont acheminées vers la capacité C , aux bornes de laquelle on mesurera la tension pour déterminer la quantité de charges Q selon la relation suivante : $V_s = -Q/C$.

L'ajout de la résistance R permet d'effectuer un filtrage passe haut pour éliminer les parasites, la fréquence de coupure est donnée par l'équation suivante : $F_c = 1/2\pi RC$.

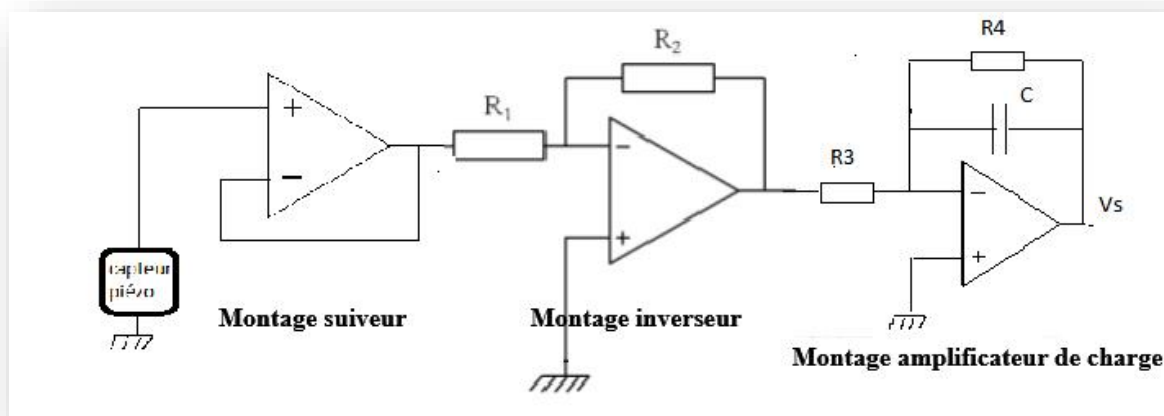


Figure III.5: Circuit de conditionnement du capteur piézoélectrique.

3.1.3 L'étalonnage (la balance électronique)

Pour étalonner notre capteur piézoélectrique et déterminer la force appliquée, nous avons utilisé une balance électronique sur laquelle nous avons placé notre capteur. La courbe d'étalonnage a été établie en appliquant différentes forces sur le capteur, ce qui a entraîné une déformation du matériau piézoélectrique et généré une tension électrique proportionnelle à la force appliquée. Simultanément, la balance mesurait l'intensité de la force appliquée. Grâce à cette méthode d'étalonnage utilisant une balance comme référence, nous avons pu caractériser les performances

Chapitre III : Implémentation et évaluation

de notre capteur piézoélectrique et le rendre opérationnel pour des mesures de force dans notre système.

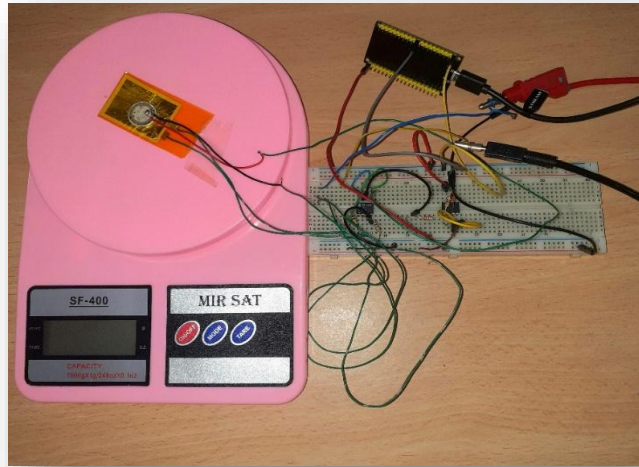


Figure III.6 : Balance utilisé pour étalonner le capteur piézoélectrique.

III.3.3 La carte ESP32

L'ESP32 est une gamme de microcontrôleurs de type système sur puce (SoC) extrêmement polyvalente, conçue principalement pour l'Internet des objets (IoT). Elle repose sur l'architecture Xtensa LX6 de Tensilica. Elle intègre la gestion du Wi-Fi et du Bluetooth, ce qui en fait une solution idéale pour les appareils connectés. La fonctionnalité Wi-Fi permet de créer des points d'accès sans fil, de se connecter à Internet et de partager des données. De plus, ce module peut être programmé à l'aide de l'environnement de développement intégré Arduino en utilisant un câble micro USB [42].

Chapitre III : Implémentation et évaluation

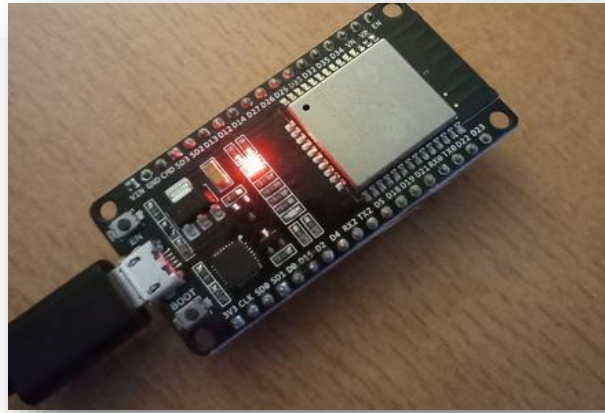


Figure III.7: Image représente la carte ESP32.

➤ Les différentes caractéristiques de la carte ESP32

- Alimentation : 5Vcc via micro-USB.
3,3Vcc via la broche Vin.
- Microcontrôleur : ESP32.
- Microprocesseur : Tensilicia LX6 Dual-Core.
- Fréquence : 240MHZ.
- Mémoire SRAM : 512KB.
- Mémoire Flash : 4MB.
- E/S disponibles : - 15 E/S digitales dont 10 compatibles PWM.
- Sorties analogiques (DAC).
- 15 x entrées analogiques (ADC).
- Interfaces: I2C, SPI, 2 x UART.
- Interfaces Wi-Fi 802.11b/g/n 2,4 GHZ.
- Bluetooth : classique / BLE.
- Antenne intégrée.
- Température de service : -40 à 125°C.
- Dimensions : 48 x 26 x 11,5mm.

Chapitre III : Implémentation et évaluation

III.3.4 Le module LoRaWAN

a) Présentation

LoRaWAN est un protocole de réseau à grande échelle et à faible consommation (LPWAN) conçu pour l'Internet des objets (IoT). Il est basé sur la technologie LoRa, une technologie de modulation par étalement de spectre (SS) qui permet une communication longue portée et à faible débit. LoRaWAN est un protocole ouvert et standardisé, soutenu par la LoRa Alliance, une communauté de plus de 500 entreprises [37].

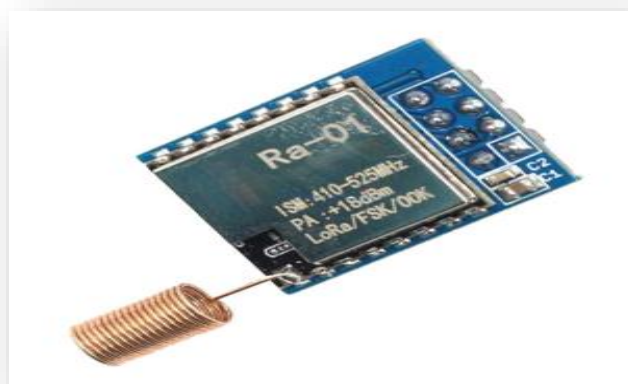


Figure III.8 : Le module LoRaWAN utilisé dans notre système.

Ce module représente les caractéristiques suivantes :

- Bande de fréquence : ISM sub-1 GHz (410 MHz - 525 MHz)
- Facteur d'étalement de spectre : LoRa (SF7~SF12)
- Puissance de sortie : +20 dBm
- Sensibilité de réception : -137 dBm
- Distance de communication : Jusqu'à 2 km en zone urbaine, jusqu'à 10 km en zone ouverte
- Interface de communication : SPI
- Consommation de courant : 100 mA (émission) / 10 mA (réception)
- Dimensions : 27 x 15 x 3.2 mm
- Température de fonctionnement : -40°C à 85°C
- Certifications : CE, FCC, RoHS

Chapitre III : Implémentation et évaluation

b) Fonctionnement de LoRaWAN

Un réseau LoRaWAN est composé de trois éléments principaux [36].

- **Les dispositifs terminaux (end devices) :** Ce sont les capteurs ou autres appareils IoT qui collectent des données et les transmettent au réseau.
- **Les passerelles (gateways) :** Ce sont des stations de base qui reçoivent les transmissions des dispositifs terminaux et les transmettent au serveur réseau.
- **Le serveur réseau (network server) :** Il s'agit d'un logiciel centralisé qui stocke les données des dispositifs terminaux, les traite et les met à disposition des applications.

Les dispositifs terminaux LoRaWAN communiquent avec les passerelles en utilisant des canaux de fréquence spécifiques. Chaque canal est divisé en plusieurs créneaux horaires, et chaque dispositif terminal est attribué un créneau horaire unique pour transmettre ses données. Cela permet d'éviter les collisions et d'assurer une communication fiable.

c) Branchement du module LoRaWAN

| LoRa SX1278 | ESP32 |
|--------------------|--------------|
| Module | |
| 3.3V | 3.3V |
| GND | GND |
| NSS | G5 |
| DIO0 | G4 |
| SCK | G18 |
| MISO | G19 |
| MOSI | G23 |
| RST | G2 |

Tableau III.1 : branchement du module LoRaWAN sur la carte ESP32.

Chapitre III : Implémentation et évaluation

➤ **Fonctionnement du SPI (Serial Peripheral Interface)**

La communication SPI se déroule entre un dispositif maître et un ou plusieurs dispositifs esclaves. Le maître initie toutes les communications et contrôle le bus SPI. Les esclaves répondent aux demandes du maître.

- **SCK (Serial Clock) :** Le signal d'horloge est généré par le maître et synchronise tous les transferts de données entre le maître et les esclaves.
- **MOSI (Master Out, Slave In) :** Sur cette ligne, le maître transmet des données aux esclaves. Les données sont généralement envoyées sous forme de bits individuels, MSB (bit de poids le plus fort) en premier.
- **MISO (Master In, Slave Out) :** Les esclaves envoient des données au maître sur cette ligne. Le format de données et le timing sont similaires à MOSI, mais dans le sens inverse.
- **SS (Slave Select) :** Le signal de sélection d'esclave est utilisé par le maître pour activer un esclave spécifique pour la communication.

III.4. Résultats obtenus

Le système réalisé est basé sur l'utilisation d'un capteur piézoélectrique flexible PU/NKLNT, intégré sur un pavé afin de détecter la chute d'une personne. La réponse électrique du capteur piézoélectrique reste constante pendant la marche et dès que la personne surveillée a fait une chute, un pic plus intense sera détecté et envoyé via le module LoRaWAN pour un personnel de santé.

La figure suivante montre l'évolution de la réponse avec un seul capteur piézoélectrique après avoir appliqué des forces au-dessus (500g à 5 Kg).

Chapitre III : Implémentation et évaluation

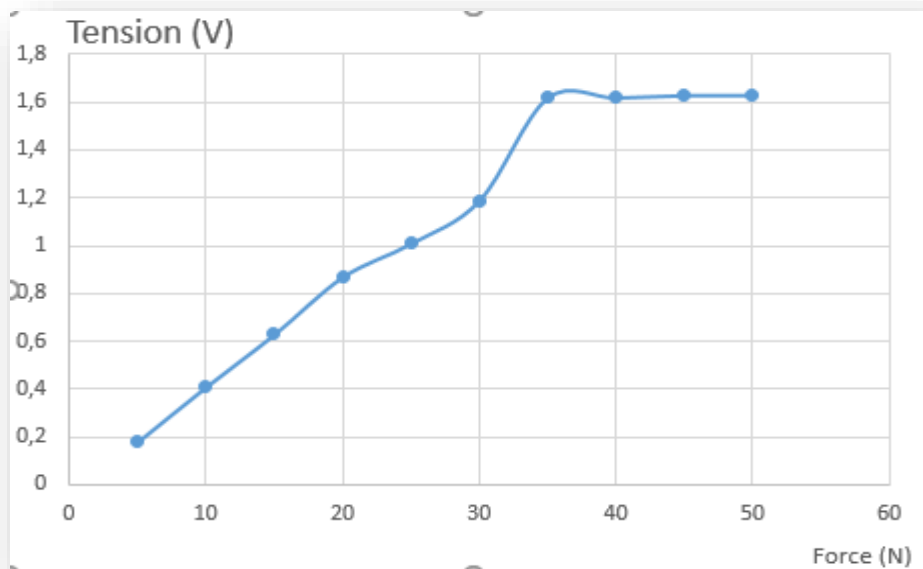


Figure III.9 Réponse électrique avec un seul capteur piézoélectrique.

De la figure III.9, on remarque que l'amplitude du signal généré augmente avec l'augmentation de l'intensité de la force appliquée jusqu'à une force appliquée de 35 N et à partir de cette valeur, le signal reste constant.

On peut constater que notre capteur élaboré présente des limitations, c'est-à-dire, qu'il ne peut pas répondre au-delà d'une force de 35 N. C'est pour cette raison qu'on a pensé d'intégrer un deuxième capteur en série afin d'augmenter la marge de mesure.

Les tests effectués avec deux capteurs placés en série nous a permis d'élargir la marge de mesure de force appliquée jusqu'à 5 Kg. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

Chapitre III : Implémentation et évaluation

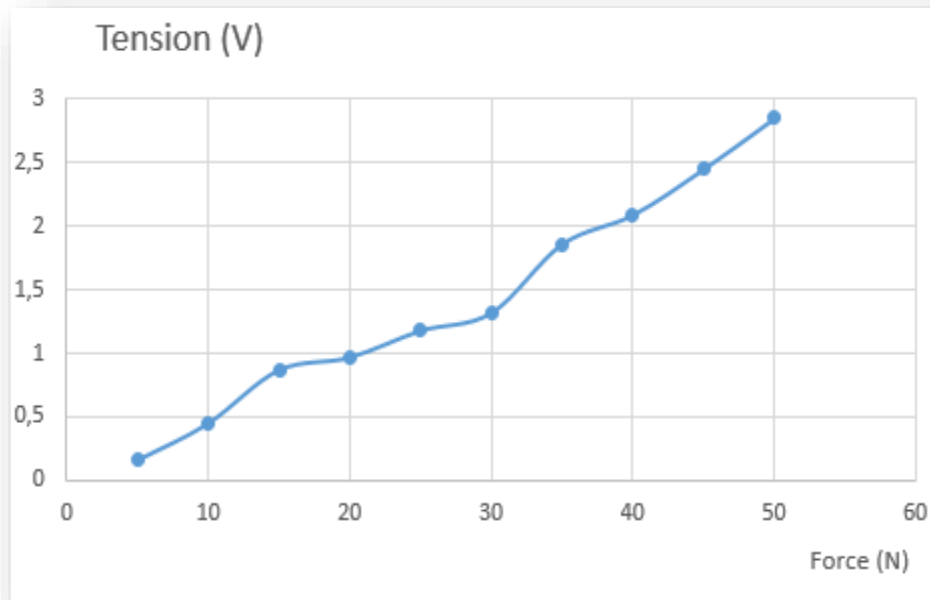


Figure III.10 Réponse électrique avec deux capteurs piézoélectriques.

III.5 Conclusion

Ce chapitre présente la conception et la réalisation d'un pavé piézoélectrique innovant pour la détection de chutes chez les personnes âgées. En combinant des capteurs intelligents de type piézoélectriques et des technologies de communication avancées LoRaWAN. Notre capteur piézoélectrique a été étalonné à l'aide d'une balance électronique pour déterminer la force appliquée lors d'une chute. La réponse de ce capteur est transmise via un module LoRaWAN à un service de santé, permettant d'alerter le médecin traitant.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le suivi à distance est devenu plus facile grâce aux techniques avancées disponibles dans le monde. Notre projet se concentre sur une technique particulière qui peut être utilisée dans divers endroits comme les maisons et les hôpitaux. Cette technique repose sur l'utilisation de pavés piézoélectriques dans le domaine de la santé pour la surveillance médicale à distance des personnes âgées. Elle joue un rôle crucial en offrant une sécurité renforcée et en créant un environnement propice à l'innovation dans le secteur médical. Grâce à cette technique, nous pouvons contribuer à réduire la mortalité et à améliorer la qualité de vie de cette population vulnérable.

Nous avons d'abord exploré les fondements théoriques et techniques de la télémédecine et de la piézoélectricité. Nous avons également présenté nos résultats sur l'efficacité de cette technique et discuté de ses perspectives d'application concrète dans le domaine de la prise en charge des personnes âgées. Ensuite, nous avons analysé en détail les principes de fonctionnement des capteurs piézoélectriques et expliqué le procédé de fabrication de ces capteurs, que nous avons fabriqués nous-mêmes. Pour ce faire, nous avons dû explorer le domaine complexe de la chimie au laboratoire LCAGC, ce qui était crucial pour le bon fonctionnement de ces capteurs que nous avons étalonnés avec une balance électronique. Enfin, nous avons abordé l'architecture globale du système de surveillance et la méthode de réalisation complète de ce dernier, en expliquant toutes les approches utilisées pendant la réalisation.

En conclusion, l'utilisation des pavés piézoélectriques pour la détection des chutes présente un immense potentiel pour réduire la mortalité et améliorer la qualité de vie des personnes âgées. Nous nous sommes particulièrement concentrés sur cette population car, dans notre société, ces personnes sont souvent laissées seules, bien que nous soyons tous concernés. Cette technique innovante ouvre la voie à de nouvelles perspectives dans le domaine de la prise en charge des personnes âgées et de la télémédecine, promettant un avenir plus sûr et serein pour cette population fragilisée.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] H. Jung et J.-E. Lee, « The impact of community-based eHealth self-management intervention among elderly living alone with hypertension », *J. Telemed. Telecare*, vol. 23, n° 1, p. 167- 173, janv. 2017, doi: 10.1177/1357633X15621467.
- [2] D. Hailey, R. Roine, et A. Ohinmaa, « Systematic review of evidence for the benefits of telemedicine », *J. Telemed. Telecare*, vol. 8, n° 1_suppl, p. 1- 7, mars 2002, doi: 10.1258/1357633021937604.
- [3] « La télémédecine s'enracine et, avec elle, la régulation du secteur », *Le Monde.fr*, 14 janvier 2024. Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.lemonde.fr/economie/article/2024/01/14/la-telemedecine-s-enracine-et-avec-elle-la-regulation-du-secteur_6210716_3234.html
- [4] « La téléconsultation ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.ameli.fr/assure/remboursements/rembourse/consultations-telemedecine/telemedecine/teleconsultation>
- [5] M. du travail, de la santé et des solidarités, M. du travail, et de la santé et des solidarités, « la téléconsultation », Ministère du travail, de la santé et des solidarités. Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sante.gouv.fr/soins-et-maladies/prises-en-charge-specialisees/telesante-pour-l-acces-de-tous-a-des-soins-a-distance/la-teleconsultation-11362/>
- [6] « Haute Autorité de Santé - Professionnels ». Consulté le: 26 février 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.has-sante.fr/>
- [7] « Haute Autorité de Santé - Éducation thérapeutique du patient (ETP) ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.has-sante.fr/jcms/c_1241714/fr/education-therapeutique-du-patient-etp
- [8] « Annuaire sociétés services téléassistance France ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.teleassistance.fr/>
- [9] « 7 applications mobile santé qui se sont fait remarquer », *Le Figaro Santé*. Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://sante.lefigaro.fr/article/7-applications-mobile-sante-qui-se-sont-faites-remarquer>
- [10] « Public health surveillance - Wikipedia ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://en.wikipedia.org/wiki/Public_health_surveillance
- [11] « Capteur de position - Fonctionnement et applications ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.mga-technologies.fr/capteur-position/>

Références bibliographiques

- [12] « Guide d'achat de systèmes de sécurité pour votre domicile ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.discoverygalleries.com/guide-dachat-de-systemes-de-securite-pour-votre-domicile>
- [13] K. Chaccour, R. Darazi, A. Hajjam El Hassans, et E. Andres, « Smart carpet using differential piezoresistive pressure sensors for elderly fall detection », in *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates: IEEE, oct. 2015, p. 225- 229. doi: 10.1109/WiMOB.2015.7347965.
- [14] « Vieillesse ». Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.who.int/fr/health-topics/ageing>
- [15] « Caméra de surveillance maison : le guide des caméras de surveillance ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.quality-securite.com/camera-de-surveillance-maison/>
- [16] « Capteur de choc - Détecteur de chocs - Indicateur de chocs ». Consulté le: 3 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.zoneindustrie.com/produits/Mesure-Contrôle-Instrumentation/Capteurs-detecteurs-sondes/Capteur-de-choc-Detecteur-de-chocs>
- [17] A. Yu, W. Wang, Z. Li, X. Liu, Y. Zhang, et J. Zhai, « Large- Scale Smart Carpet for Self- Powered Fall Detection », *Adv. Mater. Technol.*, vol. 5, n° 2, p. 1900978, févr. 2020, doi: 10.1002/admt.201900978.
- [18] « Plan antichute des personnes âgées | solidarites.gouv.fr | Ministère du Travail, de la Santé et des Solidarités ». Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://solidarites.gouv.fr/plan-antichute-des-personnes-agees>
- [19] « Réseau de capteurs sans fil », *Wikipédia*. 15 juillet 2023. Consulté le: 4 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9seau_de_capteurs_sans_fil&oldid=206023533
- [20] « Processeurs de signal audio | Comment ça marche, application et avantages ». Consulté le: 4 mars 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.electricity-magnetism.org/fr/processeurs-de-signal-audio/>
- [21] M. Yu, L. Gong, et S. Kollias, *Computer vision based fall detection by a convolutional neural network*. 2017, p. 420. doi: 10.1145/3136755.3136802.

Références bibliographiques

- [22] W.-H. Wang, P.-C. Chung, G.-L. Yang, C.-W. Lin, Y.-L. Hsu, et M.-C. Pai, *An inertial sensor based balance and gait analysis system*. 2015, p. 2639. doi: 10.1109/ISCAS.2015.7169227.
- [23] N. El-Bendary, Q. Tan, F. C. Pivot, et A. Lam, « Fall Detection and Prevention for the Elderly: A Review of Trends and Challenges », *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 6, n° 3, p. 1230- 1266, janv. 2013.
- [24] F. Barbosa et W. Silva, *Support vector machines, Mel-Frequency Cepstral Coefficients and the Discrete Cosine Transform applied on voice based biometric authentication*. 2015, p. 1039. doi: 10.1109/IntelliSys.2015.7361270.
- [25] « □ Piézoélectricité - Définition et Explications », Techno-Science.net. Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Piezoelectricite.html>
- [26] « La piézoélectricité et les frères Curie ». Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://musee.curie.fr/blog/la-piezoelectricite-le-quartz-piezoelectrique-et-les-freres-curie>
- [27] S. Katzir, « From ultrasonic to frequency standards: Walter Cady's discovery of the sharp resonance of crystals », *Arch. Hist. Exact Sci.*, vol. 62, n° 5, p. 469- 487, sept. 2008, doi: 10.1007/s00407-008-0020-3.
- [28] S. Adrar, « Semelle piézoélectrique connectée pour applications médicales ».
- [29] « Module Buzzer - Framboise 314, le Raspberry Pi à la sauce française.... » Consulté le: 16 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.framboise314.fr/scratch-raspberry-pi-composants/module-buzzer/>
- [30] S. Linda, « Elaboration et conception des dispositifs de la récupération d'énergie à base de nanofils de ZnO & de microfibres de PVDF-TrFE ».
- [31] C. Zong, « Système embarqué de capture et analyse du mouvement humain durant la marche ».
- [32] Z. Zhao, Q. Zhu, Y. Lu, Y. Mi, X. Cao, et N. Wang, « Chemical Sensor Based on Piezoelectric/Triboelectric Nanogenerators: A Review of the Modular Design Strategy », *Chemosensors*, vol. 11, n° 5, p. 304, mai 2023, doi: 10.3390/chemosensors11050304.

Références bibliographiques

- [33] « Le Bluetooth : qu'est-ce que c'est et comment ça marche ? | PRIXTEL ». Consulté le: 17 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.prixtel.com/decouvrir-prixtel/actualite/news/le-bluetooth-quest-ce-que-c-est-et-comment-ca-marche/>
- [34] Z. Chelli, « Elaboration de Structures Piézoélectriques Flexibles Performantes : Applications en Nano-générateur et Capteurs », UMMTO, TIZI-OUZOU, 2023.
- [35] J. Enki, « Zigbee : tout savoir sur ce protocole domotique », ENKI. Consulté le: 17 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://enki-home.com/fr/blog-domotique/zigbee-protocole-domotique>
- [36] A. Raychowdhury et A. Pramanik, « Survey on LoRa Technology: Solution for Internet of Things », in *Intelligent Systems, Technologies and Applications*, vol. 1148, S. M. Thampi, L. Trajkovic, S. Mitra, P. Nagabhushan, E.-S. M. El-Alfy, Z. Bojkovic, et D. Mishra, Éd., in *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1148. , Singapore: Springer Singapore, 2020, p. 259- 271. doi: 10.1007/978-981-15-3914-5_20.
- [37] M. T. Buyukakkaslar, M. A. Erturk, M. A. Aydin, et L. Vollero, « LoRaWAN as an e-Health Communication Technology », in *2017 IEEE 41st Annual Computer Software and Applications Conference (COMPSAC)*, Turin: IEEE, juill. 2017, p. 310- 313. doi: 10.1109/COMPSAC.2017.162.
- [38] « Capteur piézo - Vidéo Interface-Z ». Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: https://www.interface-z.com/conseil/videodemo/capteur_piezo.php
- [39] « Platines et actuateurs piézo-électrique pour micropositionnement », TRIOPTICS. Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.trioptics.fr/categorie-produit/micropositionnement/platines-et-actuateurs-piezo-electriques/>
- [40] « Capteurs piézoélectriques : Quel est le besoin de mon appli », HBM. Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.hbm.com/fr/6810/capteurs-piezo-electriques-quel-est-le-besoin-de-mon-appli/>
- [41] « A1: Réponse en fréquence ». Consulté le: 30 avril 2024. [En ligne]. Disponible sur: http://olympiades.briand44.free.fr/rapport/a/a1_rap.htm
- [42] M. Babiuch, P. Folynek, et P. Smutny, « Using the ESP32 Microcontroller for Data Processing », in *2019 20th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Krakow-Wieliczka, Poland: IEEE, mai 2019, p. 1- 6. doi: 10.1109/CarpathianCC.2019.8765944.