

**Conservatoire National des Arts et  
Métiers  
CENTRE REGIONAL ASSOCIÉ DU LIBAN  
CENTRE D'ENSEIGNEMENT DE BEYROUTH**

**MÉMOIRE INGÉNIEUR UAMM96  
Pour  
CYC9600A – DIPLÔME D'INGÉNIEUR SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES**

Année universitaire 2022-2023

**Système de Maintenance prédictive IOT  
IOSS LLC (Confidentiel)**

Présenté par Garen L. Arabkirlian

Soutenu le 29.11.2023

Jury :

Dr. Didier Le Ruyet

Dr. Abbas Ibrahim

Dr. Ahmad Raad

Mr. Saro Aynedjian

Dr. Hmayag Partamian

Mr. Harout Arslanian

## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon directeur de mémoire, Dr. Ahmad RAAD. Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Je remercie le président du jury et les membres du Jury.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les membres du cnam, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant ce projet.

Je remercie la famille de IOSS qui m'a permis l'opportunité de travailler sur le projet AiSense.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie ma sœur Cynthia et ma nièce Arina pour leur encouragement.

Enfin, je remercie mes amis qui m'ont toujours supporté. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

## Résumé

La maintenance prédictive a pris une importance considérable dans les environnements industriels, dans le but de minimiser les temps d'arrêt, de réduire les coûts de maintenance et d'améliorer la fiabilité des équipements. Ce mémoire étudie la mise en œuvre d'un système de maintenance prédictive utilisant la technologie de l'Internet des objets (IoT), en mettant l'accent principalement sur l'analyse des vibrations.

Ce projet commence par examiner les principes fondamentaux de la maintenance prédictive et de l'intégration de l'IoT. Il explore diverses techniques d'analyse des vibrations et leur application dans la surveillance de l'état des machines, en mettant l'accent sur leur rôle dans la détection précoce des défauts et l'évaluation de l'état. L'étude aborde également le rôle essentiel de l'acquisition et du prétraitement des données pour garantir l'exactitude et la fiabilité des systèmes de maintenance prédictive.

Le mémoire présente un examen complet des solutions de maintenance prédictive basées sur l'IoT existantes, mettant en évidence leurs forces, leurs limites et leurs applications réelles. Il traite de l'intégration de capteurs, de protocoles de transmission de données et de plates-formes basées sur le cloud pour une collecte et une analyse efficaces des données.

Une partie importante de ce travail est consacrée au développement et aux tests d'un nouveau système de maintenance prédictive. Le système intègre des capteurs de vibrations de pointe, des dispositifs informatiques de pointe et des analyses basées sur le cloud pour fournir une surveillance en temps réel et des alertes de maintenance prédictive. Des études de cas et des résultats expérimentaux sont présentés pour démontrer l'efficacité du système dans la détection des défauts des machines et l'optimisation des calendriers de maintenance.

En outre, ce mémoire étudie les avantages économiques et opérationnels de la mise en œuvre d'une maintenance prédictive basée sur l'IoT, notamment la réduction des temps d'arrêt, la durée de vie prolongée des équipements et les économies de coûts. Il aborde également l'évolutivité et l'adaptabilité du système pour divers secteurs industriels.

En conclusion, ce mémoire contribue au domaine de la maintenance prédictive en démontrant le potentiel des systèmes d'analyse vibratoire basés sur l'IoT pour améliorer la fiabilité des équipements et l'efficacité de la maintenance. Il fournit des informations précieuses aux entreprises et aux industries qui cherchent à adopter des stratégies avancées de maintenance prédictive, améliorant ainsi leurs performances opérationnelles globales.

**Mots-clés :** Maintenance prédictive, Internet des objets (IoT), Analyse des vibrations, Acquisition de données, Capteurs, cloud, Automatisation industrielle.

# Abstract

Predictive maintenance has gained significant importance in industrial environments, with the aim of minimizing downtime, reducing maintenance costs and improving equipment reliability. This dissertation studies the implementation of a predictive maintenance system using Internet of Things (IoT) technology, with a primary focus on vibration analysis.

This project begins by examining the fundamentals of predictive maintenance and IoT integration. It explores various vibration analysis techniques and their application in machine condition monitoring, with emphasis on their role in early fault detection and condition assessment. The study also addresses the critical role of data acquisition and preprocessing in ensuring the accuracy and reliability of predictive maintenance systems.

The brief presents a comprehensive review of existing IoT-based predictive maintenance solutions, highlighting their strengths, limitations and real-world applications. It deals with the integration of sensors, data transmission protocols and cloud-based platforms for efficient data collection and analysis.

A significant part of this work is devoted to the development and testing of a new predictive maintenance system. The system integrates state-of-the-art vibration sensors, edge computing devices and cloud-based analytics to provide real-time monitoring and predictive maintenance alerts. Case studies and experimental results are presented to demonstrate the effectiveness of the system in detecting machine faults and optimizing maintenance schedules.

Additionally, this dissertation explores the economic and operational benefits of implementing IoT-based predictive maintenance, including reduced downtime, extended equipment life, and cost savings. It also addresses the scalability and adaptability of the system for various industrial sectors.

In conclusion, this dissertation contributes to the field of predictive maintenance by demonstrating the potential of IoT-based vibration analysis systems to improve equipment reliability and maintenance efficiency. It provides valuable insights to businesses and industries looking to adopt advanced predictive maintenance strategies, thereby improving their overall operational performance.

**Keywords:** Predictive maintenance, Internet of Things (IoT), Vibration analysis, Data acquisition, Sensors, cloud, Industrial automation.



# Abréviations

IOT - Internet of Things

MEMS - Micro-Electro-Mechanical Systems

ISO - International Organization for Standardization

BPFO - Ball-Pass Frequency Outer

BPFI - Ball-Pass Frequency Inner

BSF - Ball Spin Frequency

FTF - Fundamental Train Frequency

FFT - Fast Fourier Transform

RMS – Root Mean Square

PCB - Printed Circuit Board

CNC - Computerized Numerical Control

GBF - Générateur à basse fréquence

LPF - Low Pass Filter

ADC – Analog Digital Converter

PSOC – Programmable System on Chip

BOM – Bill of Materials

RT – Room Temperature

GMF – Gear Mesh frequency

SKF – Svenska Kullagerfabriken (Swedish Ball Bearing Factory)

IOSS – Industrial Optimum Solutions & Services

CPU – Central Processing Unit

LP – Low Power

ULP – Ultra Low Power

API – Application Program Interface

HAL – Hardware Abstract Layer

SMART – Specific Measurable Achievable Relevant Time-Bound

ISR – Interrupt Service Routine

IRQ – Interrupt request

RTOS – Real Time Operating System

SoC – System on Chip

CAN – Controller Area Network

SIG – Special Interest Group

AES – Advanced Encryption Standard

CCM – Cloud Controls Matrix

Txt – Text

UUID – Universal Unique Identifier

FTP – File Transfer Protocol

SQL – Structured query language

CAO – Conception assistée par ordinateur

SMD – Surface-mounted device

THT – Through-hole technology

VS – Visual Studio

RTC – Real Time Clock

UART – Universal asynchronous receiver Transmitter

IDE – Integrated Development Environment

# Table de matière

|                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>REMERCIEMENTS .....</b>                                         | <b>2</b>  |
| <b>RESUME .....</b>                                                | <b>3</b>  |
| MOTS-CLES :.....                                                   | 3         |
| <b>ABSTRACT .....</b>                                              | <b>4</b>  |
| <b>ABREVIATIONS .....</b>                                          | <b>5</b>  |
| <b>TABLE DE MATIERE .....</b>                                      | <b>7</b>  |
| <b>CHAPITRE 1. INTRODUCTION .....</b>                              | <b>10</b> |
| <b>CHAPITRE 2. DE L'IDEE AU PRODUIT .....</b>                      | <b>13</b> |
| 2.1 SOLUTIONS PRÉSENTS .....                                       | 14        |
| 2.2 PRINCIPES DE L'ANALYSE VIBRATOIRE.....                         | 15        |
| 2.3 PRINCIPAUX DEFAUTS D'UN MOTEUR A INDUCTION.....                | 16        |
| 2.3.1 Déséquilibre du rotor.....                                   | 16        |
| 2.3.2 Désalignement .....                                          | 16        |
| 2.3.3 Desserrement mécanique.....                                  | 17        |
| 2.3.4 Défaut d'isolement .....                                     | 17        |
| 2.3.5 Barres de rotor cassées .....                                | 18        |
| 2.3.6 Défauts de roulement.....                                    | 18        |
| 2.4 ANALYSE DE VIBRATION ET DE COURANT DE STATOR .....             | 19        |
| 2.4.1 Méthode de tendance .....                                    | 19        |
| 2.4.2 Analyse FFT .....                                            | 20        |
| 2.5 MÉTHODE TRADITIONNELLE .....                                   | 20        |
| 2.6 COMPARAISON ENTRE LES DONNEES DE COURANT ET DE VIBRATION ..... | 21        |
| 2.7 INCONVENIENTS DE LA METHODE TRADITIONNELLE .....               | 21        |
| 2.7.1 Sécurité.....                                                | 22        |
| 2.7.2 Fréquence d'acquisition.....                                 | 23        |
| 2.7.3 Erreur humaine .....                                         | 23        |
| <b>CHAPITRE 3. CONCEPTION DU SYSTEME .....</b>                     | <b>26</b> |
| 3.1 OBJECTIFS DU SYSTEME .....                                     | 26        |
| 3.1.1 Niveau 0 .....                                               | 26        |
| 3.2 PANNE DU SYSTEME .....                                         | 27        |
| 3.2.1 Niveau -1 .....                                              | 27        |
| 3.2.2 Niveau -2 .....                                              | 27        |
| <b>CHAPITRE 4. COMPOSANTS .....</b>                                | <b>29</b> |
| 4.1 S1.1 - QUANTIFICATION DES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES : .....   | 29        |
| 4.1.1 S1.1.1 Acquisition de signaux analogiques.....               | 29        |
| 4.1.2 Surveillance des vibrations et de la température : .....     | 30        |
| 4.1.3 Exigences matérielles .....                                  | 30        |
| 4.1.4 Types de capteurs :.....                                     | 30        |
| 4.1.5 Technologies de capteurs :.....                              | 32        |
| 4.1.6 Spécifications techniques .....                              | 34        |
| 4.1.7 Brochage des composants.....                                 | 34        |
| 4.1.8 Architecture des composants .....                            | 35        |
| 4.2 S1.1.2 TRAITEMENT DU SIGNAL ANALOGIQUE .....                   | 36        |
| 4.2.1 Exigences matérielles des composants .....                   | 36        |
| 4.2.2 Traitement du signal analogique : .....                      | 36        |
| 4.2.3 Architecture des composants .....                            | 38        |
| 4.2.4 Branchement des composants .....                             | 39        |
| 4.2.5 System on Chip (SoC).....                                    | 39        |

|                    |                                                                                               |           |
|--------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3                | S1.1.3 NUMÉRISATION DU SIGNAL .....                                                           | 41        |
| 4.3.1              | <i>Exigences des composants</i> .....                                                         | 41        |
| 4.3.2              | <i>Architecture des composants</i> .....                                                      | 42        |
| 4.3.3              | <i>Branchage des composants</i> .....                                                         | 43        |
| 4.4                | S1.1.4 STOCKAGE DE DONNEES.....                                                               | 43        |
| 4.4.1              | <i>Exigences des composants</i> .....                                                         | 43        |
| 4.4.2              | <i>Architecture des composants</i> .....                                                      | 43        |
| 4.5                | S1.2 - TRANSMISSION DE DONNEES : .....                                                        | 44        |
| 4.5.1              | <i>S1.2.1 Protocole de transmission local</i> .....                                           | 44        |
| 4.5.2              | <i>Qu'est-ce que le Bluetooth Low Energy (BLE) ?</i> .....                                    | 46        |
| 4.5.3              | <i>Principe de fonctionnement des balises Bluetooth à faible consommation d'énergie</i> ..... | 47        |
| 4.5.4              | <i>Sous-composant S1.2.1.1 – Émetteur BLE</i> .....                                           | 48        |
| 4.5.5              | <i>Sous-composant S1.2.1.2 – Récepteur BLE</i> .....                                          | 49        |
| 4.5.6              | <i>Sous-composante S1.2.1.3 – Système de fichier</i> .....                                    | 50        |
| 4.5.7              | <i>Sous-composant S1.2.1.4 – Connexion Wifi</i> .....                                         | 52        |
| 4.5.8              | <i>S1.2.2 Système de fichiers cloud</i> .....                                                 | 52        |
| 4.6                | S1.2.3 BASE DE DONNEES .....                                                                  | 55        |
| 4.7                | S1.3 - TRAITEMENT ET ANALYSE : .....                                                          | 56        |
| 4.7.1              | <i>S1.3.1 Logiciel de prétraitement backend</i> .....                                         | 56        |
| 4.8                | S1.3.2 LOGICIEL D'ENREGISTREMENT DE DONNEES .....                                             | 59        |
| 4.9                | S1.4 - INTERFACE UTILISATEUR : .....                                                          | 61        |
| 4.9.1              | <i>S1.4.1 Système de fichiers local</i> .....                                                 | 61        |
| 4.9.2              | <i>S1.4.2 Interface graphique d'analyse</i> .....                                             | 61        |
| <b>CHAPITRE 5.</b> | <b>CONCEPTION HARDWARE .....</b>                                                              | <b>71</b> |
| 5.1                | CONCEPTION DU CIRCUIT IMPRIME DU CAPTEUR .....                                                | 71        |
| 5.2                | CONCEPTION DE CARTES ACCELEROMETRES.....                                                      | 72        |
| 5.3                | ÉVOLUTION DE LA CONCEPTION .....                                                              | 73        |
| 5.3.1              | <i>Planches à test</i> .....                                                                  | 74        |
| 5.3.2              | <i>Méthode Gravure</i> .....                                                                  | 74        |
| 5.3.3              | <i>Méthode CNC</i> .....                                                                      | 77        |
| 5.3.4              | <i>Commander des PCB d'un fabricant</i> .....                                                 | 80        |
|                    | .....                                                                                         | 81        |
| 5.4                | PROTOTYPAGE MECANIQUE .....                                                                   | 81        |
| 5.4.1              | <i>3D Printing</i> .....                                                                      | 82        |
| 5.4.2              | <i>Fabrication manuel par machine de tour</i> .....                                           | 83        |
| 5.5                | CONFIGURATIONS DES TESTS EN LABORATOIRE.....                                                  | 84        |
| 5.5.1              | <i>Shaker et G.B.F.</i> .....                                                                 | 84        |
| 5.5.2              | <i>Configuration de la machine de laboratoire</i> .....                                       | 86        |
| 5.6                | HUB – IOT GATEWAY .....                                                                       | 89        |
| 5.7                | CONCLUSION .....                                                                              | 90        |
| <b>CHAPITRE 6.</b> | <b>CONCEPTION SOFTWARE .....</b>                                                              | <b>91</b> |
| 6.1                | CONCEPTION SOFTWARE DU CAPTEUR.....                                                           | 91        |
| 6.2                | INTERFACE UTILISATEUR GRAPHIQUE.....                                                          | 93        |
| 6.3                | GATEWAY IOT.....                                                                              | 94        |
| <b>CHAPITRE 7.</b> | <b>TEST ET RESULTATS .....</b>                                                                | <b>97</b> |
| 7.1                | TEST DE MISE A L'ECHELLE .....                                                                | 97        |
| 7.1.1              | <i>Réponse fréquentielle des accéléromètres</i> .....                                         | 97        |
| 7.1.2              | <i>Ondes sinusoïdales et mise à l'échelle sur différents axes</i> .....                       | 100       |
| 7.1.3              | <i>Sensor vs Microlog</i> .....                                                               | 103       |
| 7.1.4              | <i>Combinaison de défauts sur banc d'essai</i> .....                                          | 105       |
| 7.1.5              | <i>Déséquilibre statique</i> .....                                                            | 106       |
| 7.1.6              | <i>Déséquilibre dynamique</i> .....                                                           | 107       |

|                                    |                                                   |            |
|------------------------------------|---------------------------------------------------|------------|
| 7.1.7                              | Défaut roulement BPFO .....                       | 107        |
| 7.1.8                              | Défaut roulement BPFI .....                       | 108        |
| 7.1.9                              | Désalignement .....                               | 109        |
| 7.1.10                             | Déséquilibre et désalignement .....               | 109        |
| 7.1.11                             | BPFO + Désalignement .....                        | 110        |
| 7.1.12                             | .....                                             | 110        |
| 7.1.13                             | .....                                             | 110        |
| 7.1.14                             | BPFO + BPFI + Désalignement .....                 | 110        |
| 7.2                                | FIELD TESTS .....                                 | 111        |
| 7.2.1                              | Sicomo .....                                      | 111        |
| 7.2.2                              | Cimenterie National : Test de Stress .....        | 113        |
| 7.2.3                              | Autres tests sur le terrain .....                 | 116        |
| 7.3                                | TEST DE BATTERIE .....                            | 119        |
| <b>CHAPITRE 8.</b>                 | <b>: FUTURE DU PROJET .....</b>                   | <b>121</b> |
| 8.1                                | ACCORDEUR AUTOMATIQUE DE PIANO .....              | 121        |
| 8.2                                | LUBRIFICATEUR INTELLIGENT .....                   | 122        |
| 8.3                                | INTERFACE UTILISATEUR GRAPHIQUE BASE SUR WEB..... | 122        |
| 8.4                                | CONCLUSION .....                                  | 123        |
| <b>LISTE DE FIGURES</b>            | <b>.....</b>                                      | <b>124</b> |
| <b>LISTE DE TABLEAUX</b>           | <b>.....</b>                                      | <b>127</b> |
| <b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b> | <b>.....</b>                                      | <b>127</b> |

## Chapitre 1. Introduction

Depuis le début de la révolution industrielle, la demande des machines a augmenté de façon exponentielle, ceci pour répondre à la demande croissante du marché. La forte demande de biens et de services a motivé les innovateurs et les ingénieurs du monde entier à développer des machines plus en plus complexes et rapides, dans le but d'obtenir une production plus élevée à moins coût. Ces concepts, bien qu'innovants, ont introduit des problèmes et des défauts plus complexes sur les machines.

D'où, c'est pour cela, que la fiabilité des machines est devenue le facteur le plus important de la production manufacturière et des machines industrielles. Une machine est « fiable » lorsqu'elle fonctionne comme prévu dans un ensemble de conditions d'exploitation spécifiques et répond aux exigences commerciales et réglementaires. C'est pourquoi les principaux avantages d'avoir des machines efficaces sont les suivants :

- Réduction des pertes de production
- Augmentation du temps de fonctionnement continu
- Diminution des coûts de production
- Réduction des coûts de maintenance
- Amélioration de la sécurité des employés

Dans le monde actuel des machines industriels, les moteurs à induction sont aujourd'hui largement utilisés dans tous les types d'applications industrielles en raison de leur construction simple, de leur haute fiabilité et de la disponibilité des variateurs à basse fréquences, utilisées pour contrôler des séquences de manufacturas et de différents services industriels.

Ces machines trouvent un large rôle dans la plupart des industries, en particulier dans l'industrie manufacturière, l'industrie pétrochimique et dans les bâtiments commerciaux pour les climatiseurs centraux, les pompes à eau, les pompes à carburant et à huile etc...

Les défauts des moteurs à induction peuvent non seulement provoquer l'interruption du fonctionnement du produit, mais également augmenter les coûts, diminuer la qualité du produit et affecter la sécurité des opérateurs. Par conséquent, la surveillance des conditions de fonctionnement et de la fiabilité des machines industrielles utilisant des moteurs à induction est cruciale pour éviter des pannes inattendues, dangereuses et coûteuses. Les principaux défauts électriques et mécaniques pouvant survenir dans un moteur à induction peuvent être classés comme suit :

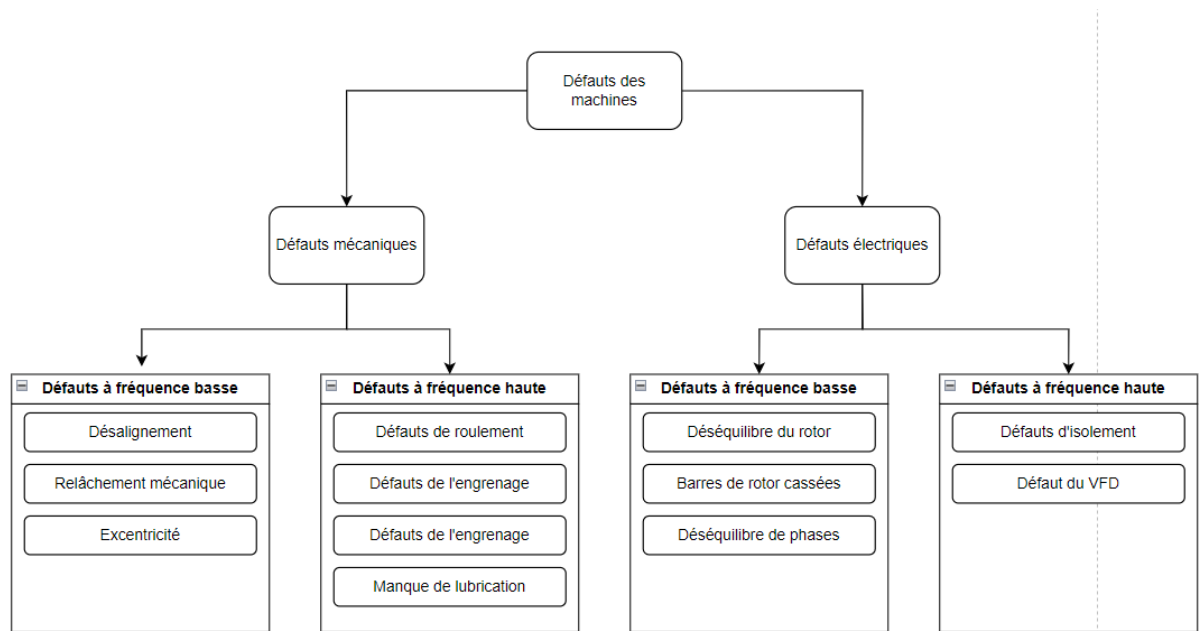


Figure 1 Défauts communs des machines industrielles

Bien sûr, ce diagramme ne couvre pas toutes les pannes mécaniques et électriques qu'une machine peut présenter, mais ils donnent une image générale des pannes les plus probables d'une machine industrielle qui utilise un moteur à induction.

Au cours des dernières décennies, les méthodes traditionnelles de maintenance prédictive ont été utilisées afin de détecter un problème et de l'analyser. Bien que ces méthodes ont montré des résultats plutôt positifs, ils étaient principalement limités par l'expertise de l'opérateur, ainsi que par le coût élevé de l'acquisition manuelle des données pour les usines contenant plusieurs machines avancées.

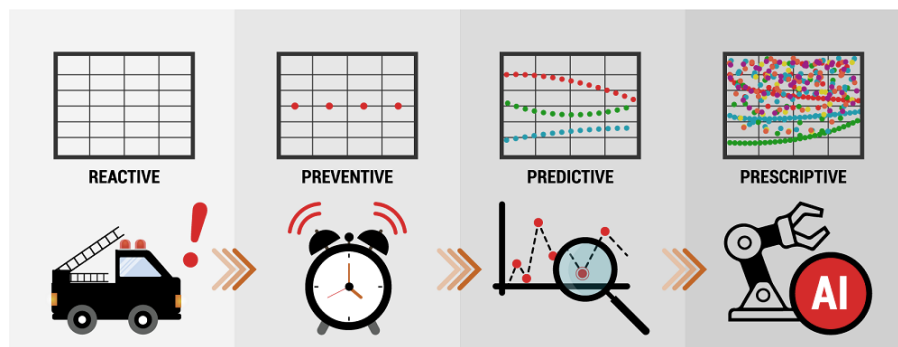


Figure 2 Types de maintenances

Voyons comment la maintenance de machines industrielles a évolué à travers l'histoire :

- La maintenance réactive** : étant la méthode de maintenance la plus primitive, c'est le cas lorsque l'opérateur ne maintient la machine que lorsqu'elle est déjà en panne.
- La maintenance préventive** : Cette méthode d'entretien repose sur des révisions périodiques régulières de la machine. Ces contrôles sont similaires à ceux que nous effectuons sur les voitures, comme le remplacement de l'huile moteur et le remplissage de liquide de refroidissement du radiateur.
- La maintenance prédictive** : ici, nous surveillons toujours plusieurs paramètres tels que les vibrations, la température, le courant, etc. mais en utilisant des équipements sophistiqués et

des techniques d'analyse des données. Cette méthode de maintenance repose sur deux piliers principaux : L'acquisition périodique des données et de l'expertise de l'analyste. C'est pour cela, Les pannes des machines peuvent être prédites dans une certaine mesure. Cette procédure prend beaucoup de temps et d'efforts.

- d. **La maintenance prescriptive** : c'est là que les actifs sont surveillés 24h/24 et 7j/7 à l'aide d'un système utilisant des capteurs IOT qui collectent et analysent automatiquement les données des machines, afin d'estimer « la santé » générale de la machine. Cette méthode peut éventuellement utiliser un modèle d'intelligence artificielle.

Dans ce mémoire, on va présenter la procédure du développement d'un système de surveillance à distance entièrement autonome capable de prédire et de rendre compte de l'état d'une machine industrielle.

Les solutions actuelles sur le marché sont coûteuses, manuelles ou n'utilisent pas tout le potentiel de l'IOT.

De plus, la plupart des clients du marché utilisent des méthodes de maintenance traditionnelles et obsolètes qui nuisent à leurs machines à court et à long terme.

Nous serons chargés de décomposer le problème en 3 grandes parties et de les développer respectivement :

**1. IOT** : Nous concevrons un système IOT qui gérera l'acquisition et la transmission des données.

**2. Traitement des données** : Nous développerons un serveur en ligne, une base de données et un programme back-end qui s'occupera du prétraitement, des calculs principaux et du stockage des valeurs requises.

**3. Surveillance de l'état** : Nous développerons une interface graphique qui aidera l'utilisateur à surveiller, analyser et générer activement des rapports concernant ses machines.

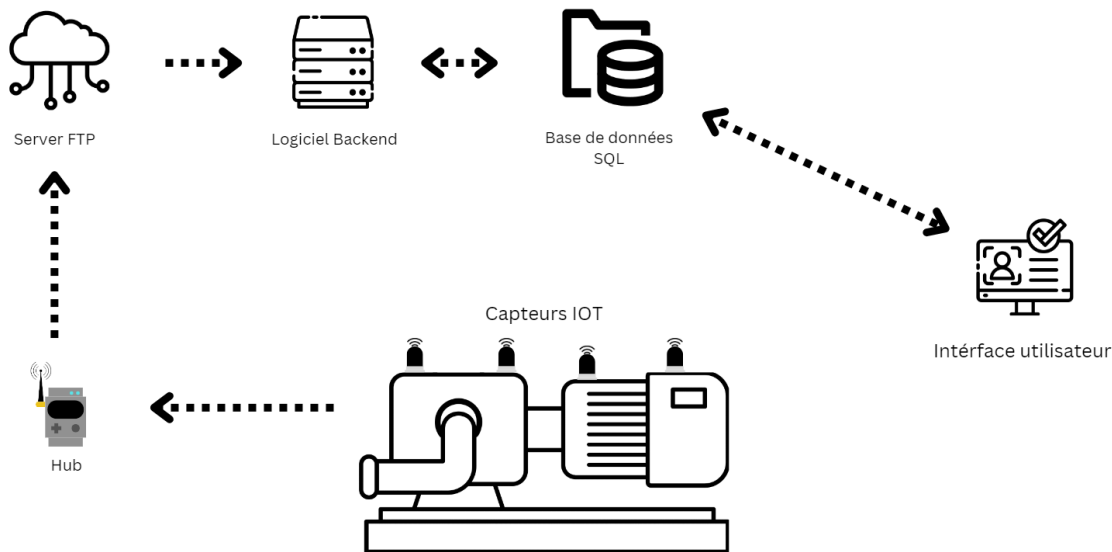


Figure 3 Overview du système de maintenance prédictive conçu durant ce projet

Enfin, la sélection des méthodes, protocoles ou algorithmes sera effectuée scientifiquement.

Un produit final qui couvrira les trois points mentionnés ci-dessus sera présenté ainsi qu'un rapport détaillé expliquant les étapes d'ingénierie suivies tout au long du développement du produit.



## Chapitre 2. De l'idée au produit

S'attaquer à un projet de cette taille peut être un défi. C'est pourquoi il est très important de consacrer beaucoup de temps à la définition de la configuration système requise. Un projet comme celui-ci n'est pas simplement une pièce de logiciel ou de hardware embarqué, mais c'est un système entier, dérivé d'une idée, composé de plusieurs sous-systèmes de logiciels et de composants et de sous-composants.

Ici, l'idée est naï d'une perspective commerciale, qui peut ne pas être techniquement détaillées, mais c'est notre travail ici, tels qu'ingénieurs, de comprendre les exigences données afin de définir l'objectif du système, puis de les décomposer en plusieurs sous-systèmes fonctionnelles. C'est notre responsabilité aussi, qu'étant ingénieur, de garder en considération toutes les contraintes techniques, environnementaux et surtout institutionnelles.

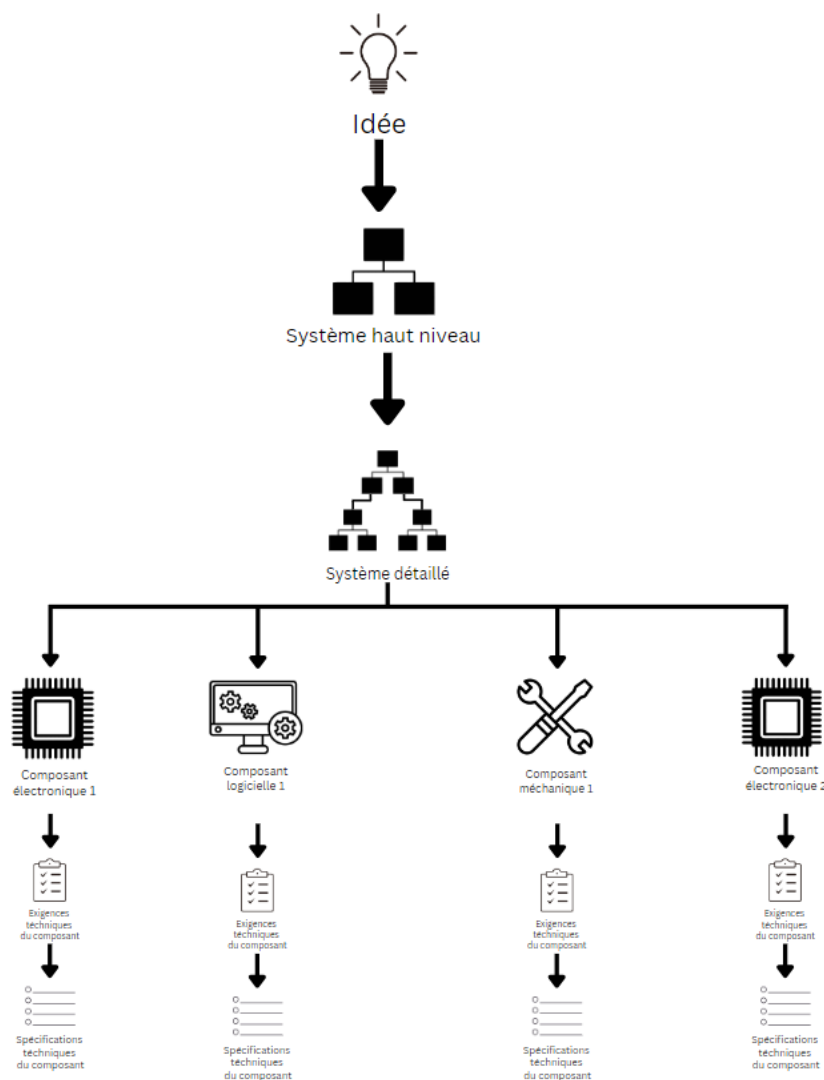


Figure 4 De l'idée à des spécifications

Lorsqu'on a commencé à travailler sur ce projet de maintenance prédictive, nommé en interne : « AISense », les directeurs de l'entreprise étaient très enthousiastes à l'idée de livrer un prototype aux investisseurs dans les plus brefs délais. Cela peut sembler très motivant, mais il appartient à l'ingénieur au travail d'identifier les contraintes d'un tel projet. C'est là que l'ingénierie des systèmes est très utile. Cela permet d'identifier les principaux piliers du projet, l'objectif et les exigences de manière séquentielle. Il incombe ensuite à l'ingénieur système de mettre en œuvre les exigences fonctionnelles du système en décomposant l'idée principale en exigences quantifiables et exactes qui seront ensuite décomposées en exigences de sous-système, puis de composants et puis de sous-composants.

C'est finalement ce qui différencie l'ingénierie du loisir. L'ingénieur doit suivre une procédure scientifique conforme aux normes modernes pour développer un produit.

Le diagramme ci-dessus donne une explication graphique de cette procédure de conception du système.

De plus, une fois que on aura les exigences fonctionnelles, on peut diviser le système en sous-systèmes plus détaillées. Ces sous-systèmes peuvent en outre être décomposés en composants logiciels et matériels.

Ainsi, ces composants logiciels et matériels pourraient être dérivés dans des spécifications techniques, ce qui nous permettraient d'établir plusieurs nomenclatures conformes aux spécifications du composant, par exemple : de choisir un composant électronique ou un algorithme pour la conception d'une logicielle...

Ainsi, afin que le lecteur de ce mémoire d'ingénieur puisse atteindre à une compréhension profonde du système, nous allons tout d'abord introduire la méthode traditionnelle, en la décomposant en tant que service, afin d'identifier les principales fonctions du système. Dans le but de découvrir leurs avantages ainsi que leurs inconvénients.

## **2.1 Solutions présents**

Avant de commencer ce projet, une recherche de marché a été effectuée pour identifier d'éventuelles solutions déjà existantes visant à résoudre le problème de la maintenance prédictive dans les machines industrielles utilisant des moteurs à induction. Examinons certaines de ces catégories de produits :

- Variateurs de fréquence intelligents (Smart VFDs) :

Ces variateurs de fréquence font exactement ce que leur nom indique, ils sont des variateurs de fréquence. Cependant, ils sont qualifiés d'intelligents car ils peuvent lire le courant d'entrée du variateur et l'envoyer vers le cloud pour analyse. Cela peut être une solution élégante pour la surveillance de l'état et la détection précoce des défauts, car ces signaux de courant sont acquis en interne, ce qui signifie qu'aucune sonde ou capteur externe ne doit être monté sur la machine elle-même. De plus, le variateur de fréquence peut être intégré aux systèmes Modbus actuellement présents dans les usines de fabrication.

Le principal inconvénient de cette solution réside dans son coût élevé de mise en œuvre. Étant donné qu'un variateur de fréquence peut être très coûteux, les coûts de R&D s'ajoutent considérablement, au point que pour les variateurs de faible puissance (1 à 10 kW), le coût du variateur de fréquence intelligent serait le double de celui de son homologue "non intelligent". Et pour les variateurs de grande puissance (10 à 50 kW), le coût de remplacement des variateurs dépasse le coût de remplacement des pièces de la machine à long terme, ce qui rend la maintenance prédictive non rentable du point de vue financier.

Oltre le coût élevé, il y a la nature des données, où l'analyse spectrale des données de courant ne couvre pas tous les défauts mécaniques pouvant être détectés par l'analyse des vibrations. Nous découvrirons les détails de l'analyse des vibrations plus tard dans ce chapitre.

- Accéléromètres industriels pouvant être connectés à des PLC :

Les avantages de ces capteurs sont leur coût relativement bas, certains d'entre eux coûtant quelques centaines d'euros. Un avantage majeur de ces capteurs est qu'ils peuvent être connectés à des PLC via des entrées analogiques 0-10V, voire certains d'entre eux disposent de pilotes RS-485 internes. Cela fait de l'ensemble du produit une solution plug-and-play, où le directeur de l'usine peut ajouter des fonctionnalités importantes de surveillance de l'état en modifiant le script du PLC.

Le principal inconvénient de ce système ne réside pas dans le capteur, mais dans le PLC. Les PLC sont connues pour être facilement programmables et très robustes pour les environnements industriels. Cependant, elles ne possèdent pas une puissance de calcul suffisante pour exécuter les calculs et algorithmes complexes nécessaires à la maintenance prédictive et à la surveillance de l'état. On peut imaginer définir une limite de seuil, de manière à informer l'opérateur en cas de dépassement d'une certaine limite d'amplitude des vibrations globales, mais le PLC n'est pas capable d'appliquer une FFT (transformée de Fourier rapide) à un signal acquis périodiquement, puis d'envoyer les données relativement importantes via le protocole Modbus. Ce n'est pas que les PLCs ne sont pas utiles, mais elles n'ont pas été conçues pour ce type d'applications.

- Moteurs à induction intelligents (Smart induction motors) :

Cette solution combine tous les éléments d'une application de maintenance prédictive parfaite : un accéléromètre, un microcontrôleur dédié et une interface utilisateur spécifique pour une solution de surveillance de l'état sans fil et d'analyse des vibrations. Cependant, ce système n'est pas considéré comme parfait pour plusieurs raisons. Comme le produit se compose uniquement du moteur, il s'agit de la seule partie à partir de laquelle nous pourrions lire les données de vibration, en ignorant tous les autres composants de la machine tels que les boîtes de vitesses, les roulements, les compresseurs, etc. D'autres inconvénients de cette solution sont les tailles et les pièces limitées disponibles pour ce moteur, ainsi que le prix élevé par rapport à leur homologue intelligent.

## **2.2 Principes de l'analyse Vibratoire**

Normalement, l'analyse des vibrations et l'analyse du courant du stator sont basées sur l'hypothèse que les défauts peuvent être détectés en analysant les caractéristiques de fréquence. Tout défaut provoque une altération spécifique du spectre de fréquence, par rapport à l'état de fonctionnement normal. Il existe différentes techniques pour détecter un type spécifique de défauts, cependant, la capacité de détecter un plus grand nombre de défauts différents avec la même technique impliquerait une réduction des coûts et une optimisation des processus.

Pour la détection de défauts électriques avec les techniques traditionnelles de maintenance prédictive, il est nécessaire d'arrêter le fonctionnement du moteur asynchrone, pour le test de court-circuit inter-spires et de barres rompues. La détection de déséquilibre de phase nécessite l'accès à des câbles d'alimentation qui, dans la majorité des cas, ne sont pas accessibles, voire peuvent être dangereux pour l'opérateur.

Afin d'éviter ces restrictions, l'analyse spectrale utilisant des signaux acquis de vibration et/ou de courant statoriques, a été une percée dans le secteur de la maintenance prédictive. Ainsi, dans la partie suivante, nous présenterons les principaux défauts pouvant survenir dans un moteur à induction, puis nous découvrirons les bases de l'analyse spectrale aussi bien en vibration qu'en courant stator.

## 2.3 Principaux défauts d'un moteur à induction

### 2.3.1 Déséquilibre du rotor

Le déséquilibre du rotor est sans aucun doute la principale cause de vibration dans les machines tournantes. Ce phénomène est causé par la présence d'un poids additionnel déséquilibrée par rapport au centre de l'axe de rotation. La vibration qui en résulte est principalement radiale, une forte composante de la fréquence de rotation.

$$\text{Eq. 1. } f_{unbalance} = (1 \times f_{rotation})$$

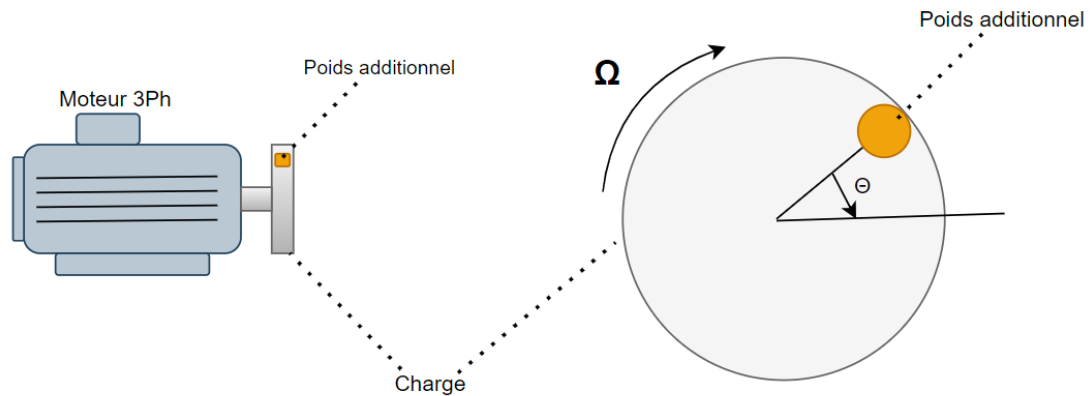


Figure 5 Défaut de déséquilibre

### 2.3.2 Désalignement

Le désalignement est presque aussi fréquent que le déséquilibre. Ce défaut est causé à cause d'une différence d'alignement sur le sens verticale ou horizontal, ce qui cause la rotation non circulaire de la charge par rapport au centre de l'axe. Dans le désalignement, la vibration est plus importante dans le sens radial, avec de fortes composantes en harmoniques de la fréquence de rotation.

$$\text{Eq. 2. } f_{misalignment} = \sum_{i=1}^4 i \times f_{rotation}$$



Figure 6 Défaut de désalignement

Ce défaut est souvent corrigé en mesurant la différence à l'aide d'un instrument de mesure à laser, et en alignant ses différences par des épaisseurs placées sous les pieds du moteur.

### 2.3.3 Desserrement mécanique

Le desserrement mécanique est défini par la présence d'harmoniques multiples à partir de la fréquence de rotation  $f_{rotation}$ , et il génère des vibrations dans les machines tournantes dues à des vis desserrées, des desserremments excessifs dans le roulement, entre autres. Le plan dominant est le radial avec des harmoniques plus élevées ainsi que des sous-harmoniques, comme indiqué dans l'équation. 4.

$$\text{Eq. 3. } f_{looseness} = \sum_{i=1}^4 (i - 0.5) \times f_{rotation}$$

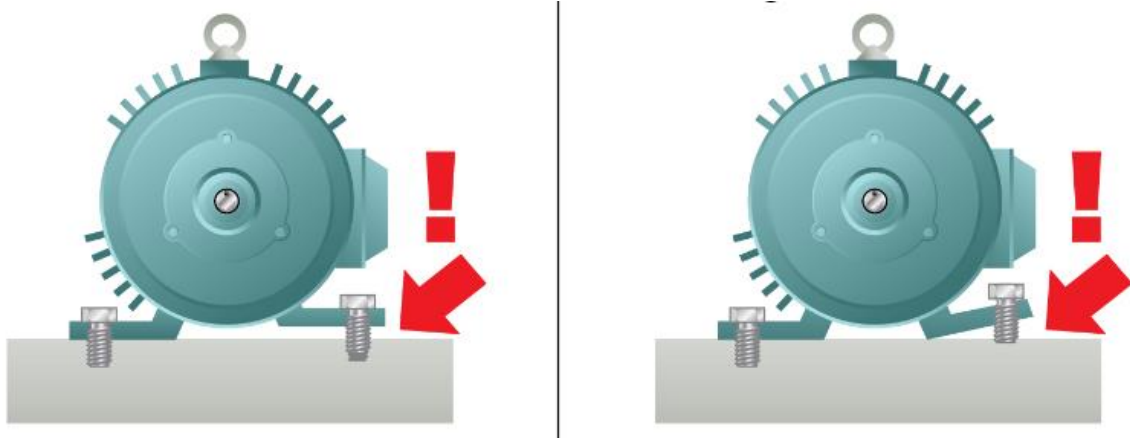


Figure 7 Défaut de desserrement

### 2.3.4 Défaut d'isolement

Le défaut d'isolement est généralement causé par la contamination de l'enroulement, l'abrasion, les vibrations ou les surtensions. Les fréquences des 19<sup>e</sup> et 21<sup>e</sup> harmoniques sont toujours présentes lorsqu'il y a un défaut dans le stator.

$$\text{Eq. 4/5. } f_{insulation} = (19 \times f_{rotation}) \quad \text{ou bien } f_{insulation} = (21 \times f_{rotation})$$



Figure 8 Défaut de faute d'isolement

### 2.3.5 Barres de rotor cassées

La rupture des barres du rotor et les soudures à froid dans la cage font partie des défauts fréquents des rotors des moteurs à induction. Les symptômes caractéristiques sont des vibrations et des bruits anormaux. Il a été démontré que dans le spectre de vibration, la détection des barres de rotor cassées se fait en tenant compte de l'Eq. 7.

$$\text{Eq. 7. } f_{\text{Broken bar}} = (1 \times f_{\text{rotation}}) \pm (2 \times s_f)$$

Avec:  $s_f$ : Fréquence de glissement du moteur à induction

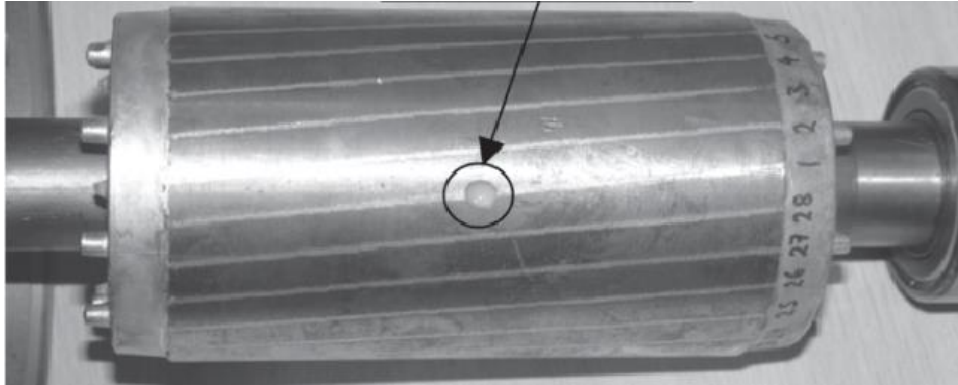


Figure 9 Défaut de Barres de rotor cassés

### 2.3.6 Défauts de roulement

Ce mémoire considère les roulements à éléments roulants avec une géométrie illustrée à la Figure. Le roulement est constitué principalement des chemins de roulement extérieur et intérieur, des billes et de la cage qui assure l'équidistance des billes. Le nombre de billes est noté  $N_b$ , leur diamètre  $D_b$ , et le pas ou diamètre de la cage est  $D_c$ . L'angle du point de contact  $\beta$ .

Les défauts de roulement peuvent être classés en régions entières du roulement. Chaque région caractérisée par des fréquences distinctes. Ainsi, les défauts ponctuels peuvent être classés selon l'élément affecté suivant.

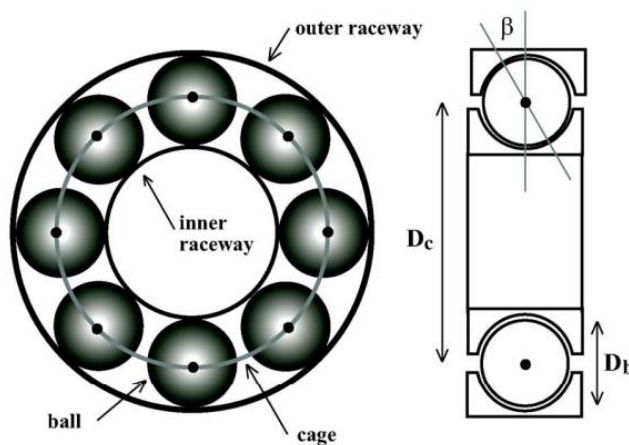


Figure 10 Explication d'un roulement mécanique

#### 2.3.6.1 Défaut de chemin de roulement extérieur

La fréquence des défauts du chemin de roulement extérieur est donnée par l'Eq.8 :

$$\text{Eq. 8. } f_o = \frac{N_b}{2} f_{\text{rotation}} \left( 1 - \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$$



### 2.3.6.2 Défaut de chemin de roulement intérieur

La fréquence des défauts du chemin de roulement intérieur est donnée par l'Eq.9 :

$$\text{Eq. 9. } f_o = \frac{N_b}{2} f_{\text{rotation}} \left( 1 + \frac{D_b}{D_c} \cos \beta \right)$$



Figure 11 Cavités sur le chemin intérieur du roulement

### 2.3.6.3 Défaut de balle

La fréquence des défauts du chemin de roulement extérieur est donnée par l'Eq.10 :

$$\text{Eq. 10. } f_o = \frac{D_b}{D_c} f_{\text{rotation}} \left( 1 - \frac{D_b^2}{D_c^2} \cos^2 \beta \right)$$



Figure 12 Cavités et rouille sur le chemin externe du roulement

## 2.4 Analyse de Vibration et de courant de stator

### 2.4.1 Méthode de tendance

La plupart des programmes de surveillance s'appuient fortement sur les tendances historiques au niveau de l'amplitude comme principal outil d'analyse. Il s'agit d'une approche valable si les données sont normalisées pour supprimer l'influence de variables, telles que la charge, sur les niveaux d'énergie vibratoire enregistrés. Cette technique d'analyse est utilisée pour le suivi de l'état mécanique global des machines depuis plus de 20 ans. La technique est basée sur la vibration ou l'énergie globale d'une plage de fréquences de zéro à la fréquence maximale sélectionnée par l'utilisateur, FMAX. Les données à large bande sont des mesures de vibrations globales présentées en unités telles que la vitesse-PK, l'accélération-RMS, etc. Ce type de données, cependant, ne fournit aucune indication sur les composants de fréquences spécifiques qui

composent la signature vibratoire de la machine. Par conséquent, les problèmes spécifiques des trains de machines ne peuvent pas être isolés et identifiés.

### **2.4.2 Analyse FFT**

L'expression signature de transformée de Fourier rapide complète est généralement appliquée au spectre de fréquences qui identifie de manière unique une machine, un composant, un système ou un sous-système à une condition et à un moment de fonctionnement spécifiques. Il fournit des données spécifiques sur chaque composante de fréquence dans la gamme de fréquences globale d'un train de machines. La plage de fréquence typique peut être de 0,1 à 20 000 Hz. Dans les systèmes à microprocesseur, la signature FFT est formée en décomposant le spectre de fréquence total en composants uniques, ou pics. Chaque ligne ou pic représente une composante de fréquence spécifique qui, à son tour, représente un ou plusieurs composants mécaniques au sein du train de machines. Les systèmes de maintenance prédictive typiques basés sur un microprocesseur peuvent fournir des résolutions de signature d'au moins 400 lignes et beaucoup fournissent jusqu'à 12 800 lignes. Un ensemble de spectres à signature complète peut être un outil d'analyse important, mais nécessite une énorme quantité de mémoire de microprocesseur. Il n'est pas pratique de collecter régulièrement des spectres complets à haute résolution sur tous les trains de machines. La gestion et le stockage des données dans l'ordinateur hôte sont extrêmement difficiles et coûteux. Les signatures complètes ne doivent être collectées que si un problème confirmé a été identifié sur un train de machines spécifique. Cela peut être déclenché automatiquement en dépassant une limite d'alarme prédéfinie dans les tendances d'amplitude historiques.

## **2.5 Méthode traditionnelle**

IOSS est une entreprise de près de 18 ans spécialisée dans la maintenance prédictive et la détection précoce des défauts des machines industrielles.

Le service de maintenance prédictive fourni par l'IOSS, qui commence généralement par une demande du client. La raison de la demande est généralement dans le but de réduire les coûts de maintenance de l'usine ou de l'entreprise, ou bien, dans la plupart du temps, en raison d'une vibration générée d'amplitude élevée générée par une machine spécifique.

Le client est contacté afin de recueillir des spécifications de la machine. Cette information est importante pour la configuration des paramètres d'acquisition sur l'instrument d'acquisition de vibrations utilisé plus tard par les techniciens. Ceci est réalisé en connectant l'instrument spécifique à un ordinateur sur lequel le logiciel dédié de l'instrument est installé. L'ingénieur règle ces paramètres manuellement.

Ainsi, après avoir planifié une, le technicien est tenu de suivre un cours de sécurité avant d'avoir un accès à l'usine. Cela prend généralement une heure ou deux dans la plupart des cas.

Ensuite, lorsque la machine en question est localisée, le technicien identifie les points physiques d'acquisition sur la machine où il placera ensuite l'accéléromètre afin d'acquérir les données vibratoires.

L'instrument utilisé dans notre cas, est le SKF Microlog, couplé avec un capteur piézoélectrique, nous découvrirons les spécifications de cette instrument et capteur dans les chapitres suivants.



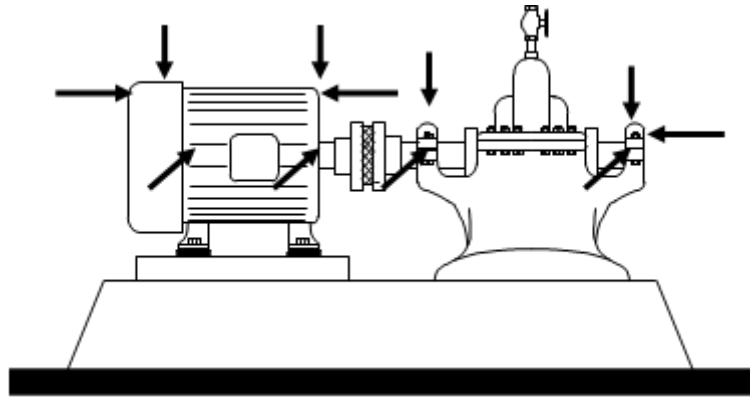


Figure 13 Placement d'un capteur sur un machine à 4 points

Une fois les données acquises avec les différentes configurations à partir d'une multitude de points d'acquisition, le technicien enregistre les données.

De retour au bureau, l'ingénieur télécharge manuellement les données acquises de l'instrument sur son ordinateur. Cela dure environ 20 minutes, selon la quantité de données collectées.

Enfin, l'ingénieur spécialisé en analyse vibratoire pourrait utiliser une multitude méthodes analyse de données. Réaliser une analyse sur une machine prend généralement 24 à 72 heures, selon la taille du projet et la complexité du défaut.

Une fois l'analyse terminée, l'ingénieur commence à rédiger un rapport sur l'état de la machine. Ce rapport est enfin envoyé au client.

## 2.6 Comparaison entre les données de courant et de vibration

Traditionnellement, l'état du moteur est supervisé à l'aide d'analyses vibratoires mais la mesure de telles grandeurs mécaniques est souvent coûteuse. En effet, les capteurs de vibrations tels que les accéléromètres piézoélectriques et l'amplificateur de charge associé sont souvent onéreux. De plus, la capacité d'une détection claire des défauts de roulement par des mesures de vibration réside dans les emplacements des capteurs. En effet, des accéléromètres doivent être montés à proximité de chaque éventuel palier défaillant de la machine. Pour pallier ce problème, la détection pourrait être basée sur la mesure des courants statoriques qui sont souvent disponibles à des fins de contrôle.

Par rapport à l'analyse vibratoire, le détecteur de courant stator nécessite une instrumentation moins coûteuse. Cependant, l'indicateur de vibration est utilisable dans plusieurs applications. Pour étendre l'application de la détection de défauts, la surveillance de l'état des variateurs de vitesse pourrait être étudiée en utilisant l'analyse temps-fréquence ou échelle de temps pour détecter les défauts de roulement au démarrage de la machine. De plus, d'autres conditions défectueuses telles que la contamination du lubrifiant ou l'usure de la graisse pourraient être étudiées sur le courant du stator tout au long de la durée de vie du roulement.

## 2.7 Inconvénients de la méthode traditionnelle

Cette méthode de maintenance prédictive est bien efficace, mais aussi ses inconvénients. Ces désavantages sont classés en 3 types :

- 1- Sécurité
- 2- Fréquence d'acquisition
- 3- Erreur humaine

### 2.7.1 Sécurité

Habituellement, lorsqu'on parle de l'évolution de l'industrie, on rencontre une grande partie de la littérature indique la grave importance de la sécurité des techniciens et ingénieurs sur site. Pour illustrer la haute priorité de la sécurité dans les usines industrielles, nous pouvons décrire la procédure d'acquisition des données de vibration dans l'une des machines d'une usine de fabrication de ciment.

L'acquisition de données de vibration des machines de fabrication de ciment présente des défis importants et des risques de sécurité élevés. Ces machines fonctionnent dans des environnements industriels hasardeux, soumettant le personnel et équipement à des températures, de la poussière et du bruit extrêmes. Le processus implique l'installation des capteurs sur les moteurs à induction, ce qui peut être dangereux et oblige aux techniciens à accéder à des zones potentiellement fatales.



Figure 14 Environnement extrême industrielle

La surveillance précise de la vibration des machines nécessite un placement précis des capteurs, souvent à proximité d'autres machines lourdes, ce qui augmente le risque d'accidents. De plus, l'exposition à des systèmes électriques à haute tension présente un risque grave lors de la collecte de données de vibration. Tout dysfonctionnement ou panne de capteurs ou d'équipements peut entraîner des temps d'arrêt coûteux ou des accidents catastrophiques.

La surveillance précise de la vibration des machines nécessite un placement précis des capteurs, souvent à proximité d'autres machines lourdes, ce qui augmente le risque d'accidents. De plus, l'exposition à des systèmes électriques à haute tension présente un risque grave lors de la collecte de données de vibration. Tout dysfonctionnement ou panne de capteurs ou d'équipements peut entraîner des temps d'arrêt coûteux ou des accidents catastrophiques.

Les précautions de sécurité, telles que les procédures de verrouillage et d'étiquetage et les équipements de protection individuelle, sont essentielles mais ne peuvent pas éliminer tous les risques. Les formations présentées aux techniciens sont essentielles pour minimiser ces risques. Malgré les défis, la surveillance est essentielle pour la maintenance prédictive dans la fabrication du ciment, améliorant l'efficacité opérationnelle et la sécurité globales en identifiant rapidement les problèmes de moteur potentiels et en évitant des pannes coûteuses.

Un autre scénario dans lequel l'acquisition des données de vibration peut être dangereux est celui de la maintenance des grands ventilateurs industriels. Les ventilateurs industriels sont utilisés dans diverses industries, notamment les centrales électriques et l'industrie petro- chimiques, pour dissiper la chaleur des processus. Ces ventilateurs sont généralement alimentés par des moteurs à induction de haute puissance. Les risques les plus notables sont les suivants :

1. Hauteur et accessibilité : Les ventilateurs des tours de refroidissement sont souvent installés à des hauteurs élevées, ce qui rend l'accès difficile. Les techniciens doivent grimper sur des échelles, les exposant ainsi à des risques de chute.
2. Pales rotatives : les pales des ventilateurs sont grandes et peuvent tourner à des vitesses élevées. Travailler à proximité de ces lames pour fixer des capteurs ou collecter des données manuellement est extrêmement dangereux, car tout contact accidentel peut entraîner des blessures graves.
3. Risques électriques : Semblables aux machines de fabrication de ciment, les ventilateurs des tours de refroidissement sont alimentés par des moteurs à haute tension. Les travailleurs manipulant des capteurs de courant ou des équipements de mesure à proximité de ces composants électriques s'exposent à des risques de chocs électriques ou d'arcs électriques.

4. Facteurs environnementaux : les tours de refroidissement fonctionnent dans diverses conditions météorologiques, notamment la chaleur extrême, le froid, le vent et la pluie. Ces facteurs environnementaux peuvent compliquer davantage les efforts de collection des données, qui rendent la lecture précise difficile.

Dans de tels scénarios, la technologie moderne des capteurs et les systèmes de surveillance à distance sont de plus en plus utilisés pour atténuer ces risques. Ces systèmes permettent l'acquisition et la transmission des données sans exposer le personnel à des conditions dangereuses. Ils fournissent l'accès aux données acquises à distance, améliorant à la fois la sécurité et l'efficacité de la maintenance de ses machines.

### 2.7.2 Fréquence d'acquisition

La méthode traditionnelle d'acquisition de données de vibration est souvent confrontée à des multitudes de défis logistiques, cela affecte à la fréquence d'acquisition. L'approche conventionnelle dépend du main d'œuvre c'est-à-dire l'accès physique des techniciens aux machines pour l'acquisition des données est un prérequis de la maintenance prédictive. Cette nature intrinsèquement manuelle de la collecte de données cause un coût véritablement élevé de chaque acquisition de donnée. Ainsi, les responsables de l'usine réduisent au minimum le nombre de visites d'acquisition de données afin d'économiser des coûts. Mais à long terme, cela peut rendre la maintenance prédictive difficile, car la machine peut présenter des dysfonctionnements entre les visites. Cela entraîne une augmentation des temps d'arrêt de l'usine, ce qui augmente de manière exponentielle le coût de la maintenance.

Cet acte d'arrêt entraîne invariablement des interruptions de production et des temps d'arrêt coûteux, rendant la collecte fréquente de données peu pratique dans des environnements où un fonctionnement continu est essentiel pour atteindre les objectifs de production et garantir l'efficacité.



Figure 15 Acquisition de signal vibratoire à l'aide d'un analyseur de vibration

### 2.7.3 Erreur humaine

L'erreur humaine peut contribuer de manière significative à de faux rapports d'analyse des données de vibration. Voici plusieurs raisons pour lesquelles l'erreur humaine peut avoir des effets si désastreux :

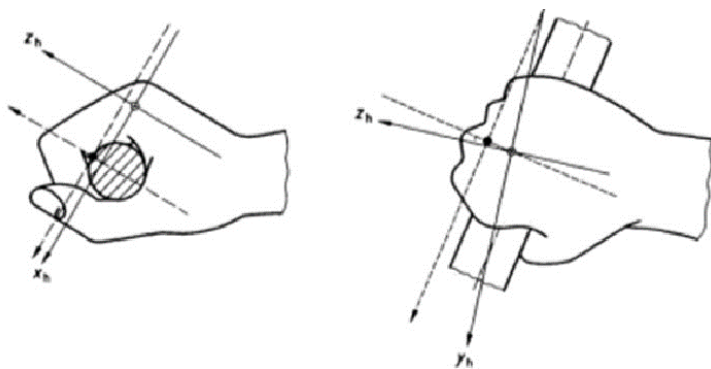


Figure 16 Standard du positionnement de l'accéléromètre industrielle par main.

1. Erreurs de placement des capteurs : les techniciens chargés de fixer les capteurs de vibrations sur les machines peuvent commettre des erreurs de placement, par exemple en plaçant le capteur de manière incorrecte. Ces erreurs peuvent entraîner des lectures de données inexactes qui ne reflètent pas les véritables caractéristiques vibratoires de l'équipement.

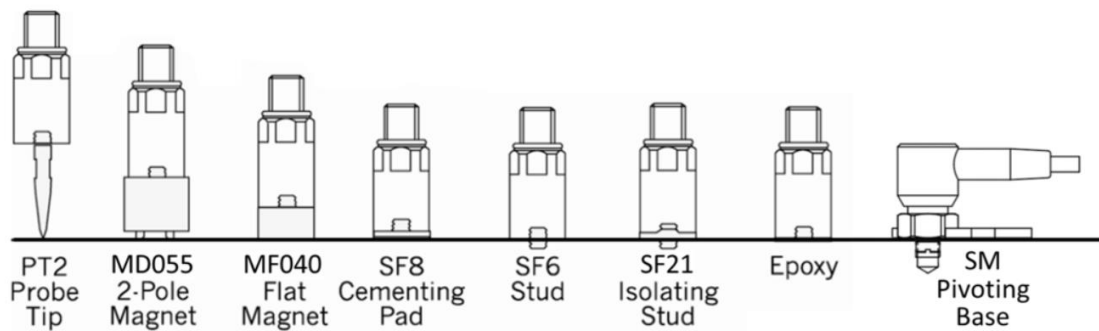


Figure 17 Types de fixations des accélérateurs industrielles

2. Erreurs de mesure : L'étalonnage des capteurs de vibrations est essentiel pour garantir une collection de données précise. Les erreurs humaines lors de l'étalonnage, telles que l'utilisation de paramètres incorrects ou le fait de ne pas calibrer régulièrement les capteurs, peuvent conduire à des données faussées ou peu fiables.

3. Erreurs de données : lors du téléchargement des données de vibration dans un logiciel d'analyse, des erreurs de saisie de données peuvent survenir. Ces erreurs peuvent inclure des fautes de frappe, des chiffres transposés ou des erreurs de lecture, qui peuvent tous conduire à une analyse et à des conclusions incorrectes.

4. Mauvaise interprétation des données : même lorsque les données sont collectées avec précision, leur interprétation peut être sujet à des biais et à des erreurs humaines. Les ingénieurs ou les analystes peuvent mal interpréter les modèles, les tendances ou les anomalies dans les données, conduisant à des conclusions de diagnostic incorrectes.

5. Collection de données incohérentes : des pratiques de collection de données incohérentes entre différents techniciens ou équipes peuvent introduire de la variabilité et de l'incohérence dans les données. Cela peut rendre difficile l'identification des véritables problèmes des machines.

6. Incapacité à agir sur les données : même lorsque des données précises sont collectées et analysées correctement, une erreur humaine peut se produire au stade de la prise de décision. Si le personnel ne respecte pas les signes d'avertissement et les recommandations de l'analyse, cela peut entraîner des pannes catastrophiques qui auraient autrement pu être évitées.

Des dommages catastrophiques peuvent se résulter de ces erreurs, car des rapports d'analyse incorrects peuvent conduire à des décisions de maintenance mal informées. Par conséquent, les machines ou infrastructures critiques peuvent continuer à fonctionner avec des défauts ou des problèmes non détectés, entraînant finalement des pannes coûteuses et des risques de sécurité.

Pour atténuer ces risques, les industries s'appuient de plus en plus sur des systèmes automatisés de collection et d'analyse de données. Ces systèmes peuvent fournir aux différents industries accès à des données critiques, et aux outils de diagnostics automatisés, améliorant ainsi l'efficacité de la maintenance dans l'objectif d'éviter des pannes catastrophiques.

Dans les prochains chapitres, on approfondira la quantification des exigences fonctionnelles essentielles au développement d'un système de maintenance prédictive basé sur l'IOT. On examinera également, comment les technologies du IOT et du cloud computing, peuvent révolutionner la façon dont on maintient les machines industrielles. L'intégration de capteurs, d'analyses de données et de techniques d'apprentissage automatique nous permettra de collecter, traiter et analyser automatiquement et plus efficacement les

données, offrant ainsi des informations en temps réel sur l'état des équipements. De plus, nous explorerons le développement d'une interface utilisateur graphique (GUI) conviviale qui facilite une interaction transparente avec le système de maintenance prédictive.

À la fin de ce mémoire, nous visons à démontrer qu'un système de maintenance prédictive basé sur l'IoT, peut être plus performante que les méthodes traditionnelles, garantissant la santé continue et les performances optimales des machines tout en minimisant les risques, les erreurs et les inefficacités.

Tout au long de ce mémoire, nous fournirons un compte rendu complet de la manière dont nous avons construit un système de maintenance prédictive IOT. On approfondira les détails complexes du développement, en couvrant diverses facettes telles que l'acquisition et la transmission de données, le prétraitement des signaux, les composants logiciels et matériels embarqués, le téléchargement des données sur le cloud et le traitement de ces données etc... De plus, nous explorerons l'aspect essentiel de la surveillance des conditions, en montrant comment les résultats sont affichés et gérés de manière efficace et intuitive via une interface utilisateur graphique (GUI). Cette évaluation globale fournira des informations précieuses sur la structure globale et les fonctionnalités de notre système de maintenance prédictive IoT. Elle mettra en évidence sa capacité à révolutionner la manière dont les industries abordent la surveillance de la santé des machines et les pratiques de maintenance.

## Chapitre 3. Conception du système

La procédure de conception d'un système est souvent sous-estimée et, dans le contexte de ce projet particulier, il existe une tendance à simplifier les requis en envisageant le système comme un simple capteur lié à un microcontrôleur, exécutant un code dans une boucle infinie. Certes, une telle approche peut être construite par un *hobbyist* pour une preuve de concept rapide. Cependant, on négligerait des aspects cruciaux de la conception robuste et de l'évolutivité du système.

La conception d'un système doit prendre en compte des facteurs et les fonctionnalités globales, c'est-à-dire il doit englober divers aspects tels que la consommation de courant électrique, le traitement des données, la gestion des erreurs, les protocoles de communication et la possibilité d'expansion à long terme. Négliger ces considérations pourrait conduire à des inefficacités, des vulnérabilités et des limitations dans la performance du système. Même si une simple configuration capteur-microcontrôleur peut suffire pour les tests initiaux, une approche plus sophistiquée de l'ingénierie système devient indispensable pour que le projet évolue.

En résumé, même si une configuration de base capteur-microcontrôleur peut constituer un point de départ, il est crucial de reconnaître qu'une conception de système efficace implique une approche plus complète pour garantir le succès du système.

### 3.1 Objectifs du système

#### 3.1.1 Niveau 0

En ingénierie système, un système est un ensemble complexe et interconnecté d'éléments ou de composants qui fonctionnent ensemble pour atteindre des objectifs ou des fonctions spécifiques.

On peut considérer, d'un point de vue architectural, qu'un système peut être interprété graphiquement, comme une boîte noire comportant une ou plusieurs entrées et sorties.

Dans le diagramme ci-dessus, nous pouvons voir que notre système, appelé ici « Système de maintenance prédictive », prend les **caractéristiques physiques** de la machine en question et génère une **prédiction de ses défauts**. Cela signifie que nous avons un objectif clairement défini au haut-niveau. Cet objectif est fixé à partir des exigences mises par la direction du projet, une fois qu'elles sont clairement définies, d'où on peut commencer à planifier l'exécution du projet.

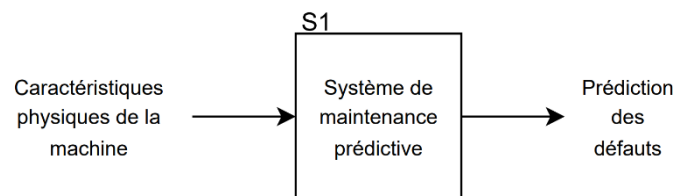


Figure 18 Système au Niveau 0

Maintenant, pour des raisons de marketing et simplement pour expliquer le projet à un collègue, ce modèle pourrait être utile, mais pour rédiger une définition précise des requis du système, on doit décomposer ce système de plus.



## 3.2 Panne du système

### 3.2.1 Niveau -1

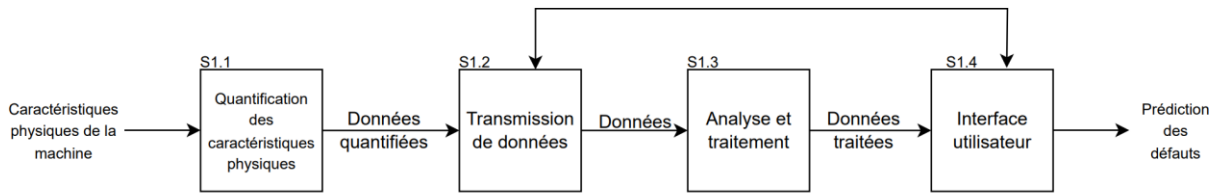


Figure 19 Système au Niveau -1

Dans le diagramme suivant, nous pouvons voir une version décomposée du système, qui est encore relativement considérée comme « haut niveau », mais peut donner une image globale plus exposée de notre système. Comme vous l'avez peut-être remarqué, l'entrée du premier sous-système est la même que l'entrée de notre système au niveau 0, et de même, nous pouvons remarquer la même chose est pour la sortie du dernier sous-système. En effet, nous avons décomposé la « boîte noire » de notre système de niveau 0 en sous-systèmes plus raffinés.

Au niveau -1, nous avons 4 sous-systèmes :

- **S1.1 - Quantification des caractéristiques physiques :**  
Nous parlons ici de l'acquisition de différentes propriétés physiques qui sont naturellement générées par la machine elle-même en fonctionnement. Il peut s'agir d'oscillations de vibration, de changements de température, de changements de courant électrique, de changements de champ électromagnétique... Et de produire des données quantifiées qui peuvent être traitées ultérieurement par d'autres sous-systèmes.
- **S1.2 - Transmission de données :**  
La transmission de données prend essentiellement les données sorties de S1.1, les transforme et les transmet vers le sous-système suivant.
- **S1.3 - Traitement et analyse :**  
Ce sous-système est responsable du traitement et de l'analyse des données acquises et de la production d'un ensemble de données traitées qui peuvent être utilisées pour la détection précoce des défauts dans les sous-systèmes à venir.
- **S1.4 - Interface utilisateur :**  
L'interface utilisateur est chargée de donner à l'utilisateur l'accès aux données précédemment analysées, ainsi que de prendre les entrées de l'utilisateur et de les envoyer à S1.2 afin qu'elles puissent également être enregistrées. Plus important encore, ce sous-système génère une prédiction du défaut, ce qui est l'objectif de notre système.

### 3.2.2 Niveau -2

Au niveau -2, nous avons encore décomposé les sous-systèmes du niveau -1, en composants plus détaillés. On voit que tous les composants sont regroupés dans leur sous-système respectif.

Les composants de chaque sous-système sont répertoriés comme suit :

- **S1.1 - Quantification des caractéristiques physiques :**
  - Acquisition de signaux analogiques
  - Traitement du signal analogique
  - Numérisation du signal
  - Stockage de données

- **S1.2 - Transmission de données :**
  - **Protocole de transmission local**
  - **Système de fichiers de stockage cloud**
  - **Base de données**
- **S1.3 - Traitement et analyse :**
  - **Logiciel de prétraitement backend**
  - **Logiciel d'enregistrement de données**
- **S1.4 - Interface utilisateur :**
  - **Système de fichiers local**
  - **Interface graphique d'analyse**
  - **Logiciel de tendance**
  - **Générateur de rapports**

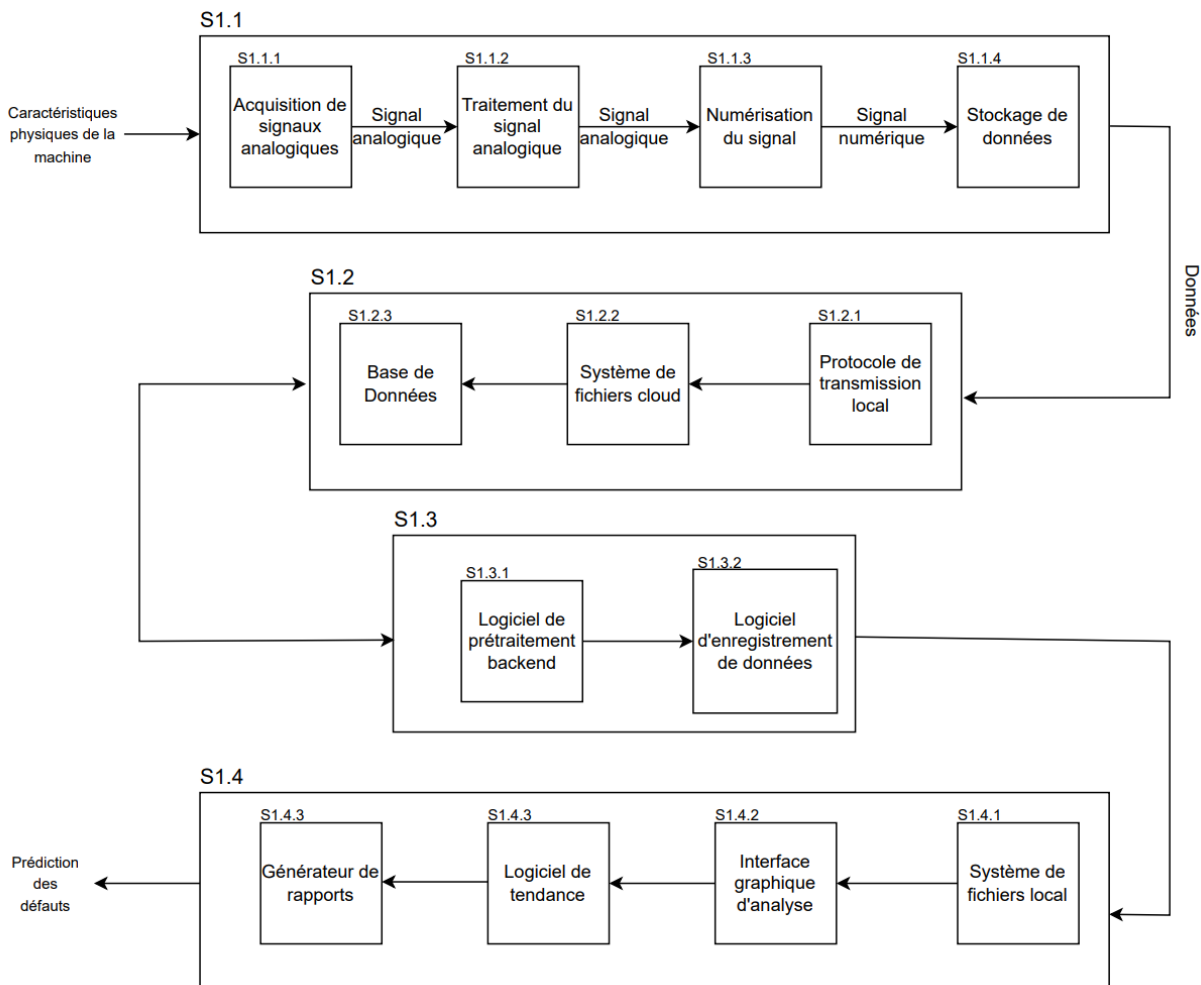


Figure 20 Système au Niveau -2

Désormais, on peut maintenant aborder individuellement chaque composant decrire le processus de développement avec ses détails techniques. Ainsi que de toutes les décisions et actions d'ingénierie et de conception prises tout au long du projet, peut être retracé vers le composant ou le system correspondant.

De plus, chaque composant peut désormais avoir un ensemble d'exigences système spécifiques aux composants, qui peuvent être décomposées en exigences logicielles, matérielles et de conception. Cela va contribuer à la traçabilité des tâches de développement, afin qu'on puisse suivre efficacement l'avancement général du projet, et également, en cas de bug, qu'on puisse déterminer efficacement le composant responsable du problème, et rendre la gestion des changements beaucoup plus simple, et surtout, quantifiable.



## Chapitre 4. Composants

Dans ce chapitre, nous plongerons dans la décomposition technique de chaque composant au niveau architectural puis au niveau du développement. Ainsi, on expliquera toutes les décisions d'ingénierie et les approches scientifiques prises lors du développement logiciel, matériel et mécanique.

### 4.1 S1.1 - Quantification des caractéristiques physiques :

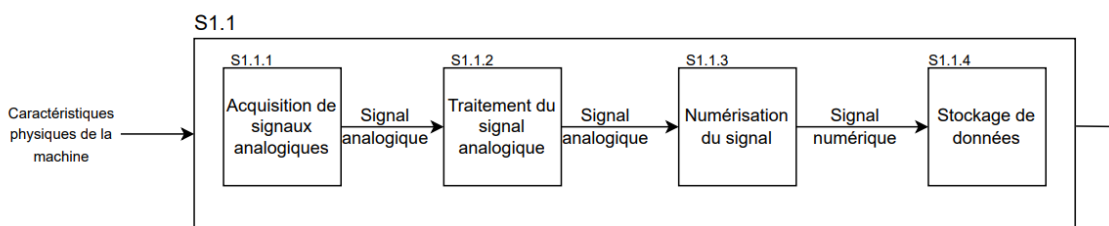


Figure 21 Composants du sous-système S1.1

Ce paragraphe traite les décisions prise pour la conception des composants responsables de la quantification des attributs physiques générés par la machine, tels que la vibration, les fluctuations de température. L'objectif principal est de collecter et de quantifier ces données pour un traitement ultérieur par d'autres sous-systèmes. Pour faciliter une exploration complète de chaque composant, on établira les requises techniques de chaque composant, puis introduire les solutions possibles disponibles et un développement de notre approche scientifique à atteindre à un choix conforme. Par la suite, nous aborderons différents aspects des domaines logiciel, matériel et mécanique, en décomposant leurs tâches et sous-tâches respectives.

#### 4.1.1 S1.1.1 Acquisition de signaux analogiques

Dans notre chapitre précédent, nous avons expliqué comment une machine industrielle équipée d'un moteur à induction triphasé génère divers attributs physiques, notamment des vibrations et des fluctuations de température. Notre objectif spécifique réside ici dans la surveillance des vibrations et de la température de la machine, car ces paramètres fournissent des informations significatives une fois leurs données sont soumises à des diverses méthodes d'analyse.

Pour détecter efficacement les vibrations et la température, l'utilisation de capteurs devient cruciale. On approfondira l'exploration de différents types de capteurs adaptés à la détection des vibrations et de la température. Cette exploration comprendra une discussion sur les technologies de capteurs couramment utilisées, mettant en évidence leurs distinctions selon divers critères. Nous déterminerons ensuite la technologie de capteur la plus adaptée aux exigences de notre système.

#### 4.1.2 Surveillance des vibrations et de la température :

Dans les environnements industriels, la surveillance des vibrations et de la température est d'une importance primordiale. Les vibrations peuvent indiquer des problèmes tels qu'un désalignement, un déséquilibre ou l'usure des composants de la machine. Les fluctuations de température peuvent signifier une surchauffe ou un fonctionnement irrégulier, pouvant entraîner des pannes potentielles. En surveillant efficacement ces paramètres, nous pouvons éviter des temps d'arrêt coûteux et garantir la longévité des équipements industriels.

#### 4.1.3 Exigences matérielles

- Req1.1.1.1 : Le composant S1.1.1 doit avoir une bande passante de 1KHz pour la basse fréquence. Ceci pour la raison que le capteur pourrait couvrir la plupart des défauts de machine à basse fréquence, tels que : déséquilibre, désalignement, pied lâche...
- Req1.1.1.2 : Le composant S1.1.1 doit avoir une bande passante de 30 KHz pour la haute fréquence. Une bande passant haute fréquence suffisamment élevée est désirée pour détecter les défauts à haute fréquence et même ultrasoniques, comme : les défauts de roulements, les défauts d'engrenage, les défauts de lubrification...
- Req1.1.1.3 : Le composant S1.1.1 doit lire sur 3 axes différents, XY et Z.
- Req1.1.1.4 : Le composant S1.1.1 doit comporter un capteur de température.

#### 4.1.4 Types de capteurs :

Pour détecter avec précision les vibrations et la température, nous avons besoin des capteurs performantes à ces exigences. Il existe plusieurs types de capteurs couramment utilisés à cette fin, chacun présentant ses propres avantages et limites :

##### 4.1.4.1 Accéléromètres

Ces capteurs sont couramment utilisés pour la capter les oscillations vibratoires. Ils mesurent les forces d'accélération et peuvent détecter même des vibrations subtiles. Les accéléromètres sont disponibles sous diverses formes, notamment les types piézoélectriques et MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems).

##### 4.1.4.2 Piézoélectrique

Les accéléromètres piézoélectriques sont des dispositifs remarquables largement utilisés dans le domaine de l'acquisition et de l'analyse des vibrations. Ces capteurs jouent un rôle central dans la capture et la mesure des données vibratoires dans diverses applications, de la surveillance des machines industrielles à l'ingénierie aérospatiale. Leur technologie unique, basée sur l'effet piézoélectrique, en fait des outils précieux pour détecter et quantifier les vibrations avec précision et fiabilité.

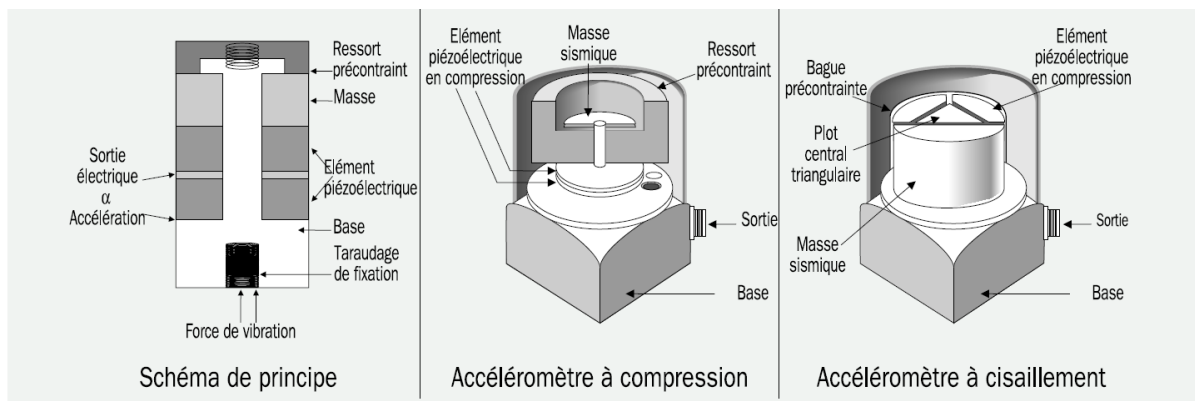


Figure 22 Composants internes d'un accéléromètre piézoélectrique.

Au cœur d'un accéléromètre piézoélectrique se trouve l'effet piézoélectrique, un phénomène présenté par certains matériaux, le plus souvent des cristaux ou des céramiques, lorsqu'ils sont soumis à une contrainte

mécanique ou à une pression. Lorsque ces matériaux subissent une déformation mécanique due aux vibrations, ils génèrent des charges électriques proportionnelles à la force appliquée. Cette génération de charges électriques est instantanée et correspond directement à l'ampleur et à la direction des forces mécaniques agissant sur le capteur.

Les accéléromètres piézoélectriques sont constitués d'un élément cristallin piézoélectrique, généralement sous la forme d'une petite masse, fixé à une structure mécanique. Lorsqu'elle est soumise à des vibrations, cette masse subit une accélération, provoquant la déformation du cristal piézoélectrique, qui à son tour génère une charge électrique. Cette charge électrique est ensuite convertie en signal de tension via des circuits électroniques intégrés. Le signal de tension résultant est proportionnel à l'accélération subie par le capteur et convient à l'analyse et à l'enregistrement des données.

Bien que les accéléromètres hautes performances puissent être coûteux, ils offrent souvent un excellent rapport qualité-prix pour leur précision et leur fiabilité, ce qui en fait un choix privilégié dans de nombreuses applications. De plus, les progrès dans le domaine de la fabrication ont conduit à une gamme plus large d'options de coûts, rendant les accéléromètres piézoélectriques accessibles pour un large éventail d'utilisations.

En résumé, les accéléromètres piézoélectriques, pilotés par l'effet piézoélectrique, sont des outils indispensables pour capturer et quantifier les vibrations dans diverses applications. Leur précision, leur fiabilité et leur rentabilité en font un choix privilégié pour les ingénieurs et les chercheurs dans les domaines où une acquisition précise des vibrations est essentielle.

#### 4.1.4.3 MEMS

Les accéléromètres MEMS (Micro-Electro-Mechanical Systems) représentent une technologie révolutionnaire dans le domaine de l'acquisition de vibrations et de la détection de mouvement. Ces appareils miniatures ont révolutionné la façon dont les vibrations sont détectées et mesurées, trouvant une utilisation intensive dans des applications allant de l'électronique grand public aux machines industrielles. Les accéléromètres MEMS exploitent les techniques de microfabrication pour fournir des solutions hautement sensibles et rentables pour la détection de mouvement.

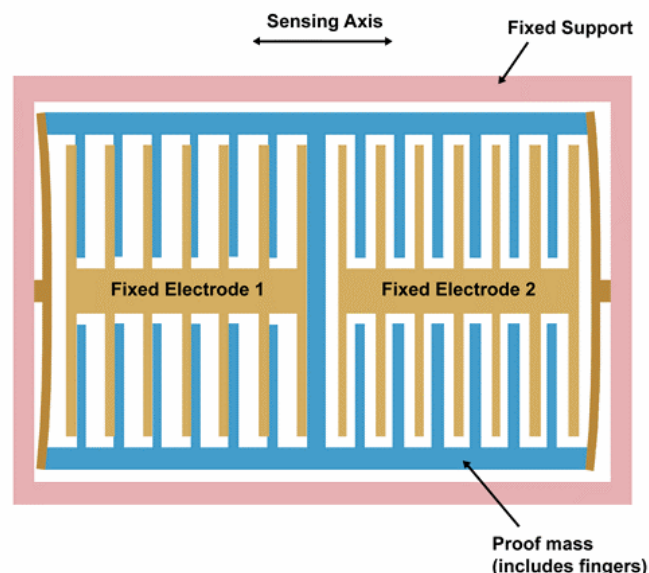


Figure 23 Composants internes d'un accéléromètre MEMS.

Les accéléromètres MEMS reposent sur les principes de la microfabrication, en utilisant de minuscules structures mécaniques intégrées sur un substrat de silicium. Ces structures sont généralement constituées

d'une masse suspendue, appelée masse d'épreuve, et d'électrodes fixes. Lorsqu'elle est soumise à des accélérations ou à des vibrations, la masse d'épreuve se déplace par rapport aux électrodes fixes, provoquant des changements de capacité entre elles. Ces variations de capacité sont converties en signaux électriques via l'électronique intégrée du capteur MEMS.

L'un des principaux avantages des accéléromètres MEMS est leur rentabilité. Les techniques de production de masse permettent de produire ces capteurs à un coût unitaire relativement faible, ce qui les rend économiquement attractifs pour une large gamme d'applications. La rentabilité des accéléromètres MEMS a conduit à leur intégration dans l'électronique grand public quotidienne et a rendu plus accessible une technologie de détection de mouvement de haute qualité.

En résumé, les accéléromètres MEMS, construits sur des techniques de microfabrication, sont devenus des outils indispensables pour la détection de mouvements et l'acquisition de vibrations. Leur taille compacte, leur sensibilité élevée et leur prix abordable ont conduit à leur adoption dans divers domaines, des appareils grand public aux applications critiques dans la surveillance automobile et structurelle. Les accéléromètres MEMS ont redéfini le paysage de la technologie de détection de mouvement, offrant précision et rentabilité à diverses industries.

#### 4.1.4.4 Capteurs de température

Pour la surveillance de la température, nous proposons des options telles que des thermocouples.

Ces capteurs ont des plages de température, des précisions et des temps de réponse différents.

Une bonne nouvelle est qu'il existe de nombreux accéléromètres sur le marché doté de capteurs de température précis intégrés, ce qui rend les choses bien meilleures, car nous pourrions avoir une solution unique pour nos capteurs de vibrations et de température.

#### 4.1.5 Technologies de capteurs :

Au sein de chaque type de capteur, il existe différentes technologies et variantes. Par exemple, les thermocouples peuvent être fabriqués à partir de différents matériaux, chacun étant adapté à des plages de température et à des conditions environnementales spécifiques. Les accéléromètres peuvent être disponibles dans des configurations mono-axes ou multi-axes, avec différentes plages de sensibilité et de fréquence.

Il existe clairement un large choix de capteurs sur le marché, et choisir le bon peut parfois être intimidant. C'est pourquoi nous avons défini nos critères de comparaison : afin de déterminer la meilleure technologie de capteur pour notre système, nous devons prendre en compte plusieurs critères tels que la précision, la portée, la sensibilité, le coût et la durabilité.

Après une recherche approfondie, nous pouvons voir les capteurs de vibrations suivants dont nous avons résumé leurs principaux aspects dans le tableau ci-dessous :

Tableau 1 Comparaison des différents accéléromètres.

| Paramètre                   | ADXL356          | ADXL1005   | KX134-1211                       | MPU-6050             | AC133-1D        |
|-----------------------------|------------------|------------|----------------------------------|----------------------|-----------------|
| <b>Plage d'accélération</b> | ±10g, ±20g, ±40g | ±5         | ±2g, ±4g, ±8g, ±16g, ±32g, ±64g, | ±2g, ±4g, ±8g, ±16g  | ±25g            |
| <b>Technologie</b>          | MEMS             | MEMS       | MEMS                             | MEMS                 | Piézoélectrique |
| <b>Sensibilité</b>          | 20-80 mV/g       | 20 mV/g    | 512-4096 comptes/g               | 2048-16384 comptes/g | 500 mV/g        |
| <b>Nombre d'axes</b>        | 3                | 1          | 3                                | 3                    | 1               |
| <b>Interface de sortie</b>  | Analogique       | Analogique | Numérique                        | Numérique            | Analogique      |

|                                  |                                                                                               |                                                                     |                                                                                                         |                                                |                                                            |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Bande passante (-3 dB)</b>    | 2,4 kHz                                                                                       | 42 kHz                                                              | 5KHz                                                                                                    | 1 kHz                                          | 10 kHz                                                     |
| <b>Source de courant</b>         | 3,3 V ou 5 V                                                                                  | 3,3 V ou 5 V                                                        | 1,71 à 3,6 V                                                                                            | 2,375 V à 3,46 V                               | 18-30 V                                                    |
| <b>Caractéristiques notables</b> | Sortie analogique haute résolution, faible bruit, autotest numérique, Capteur de température. | Basse consommation de courant, Grande bande passante (ultrasonique) | Sortie numérique, faible bruit, faible consommation d'énergie, paramètres configurables, cout abordable | peu coûteux, Gyroscope, Capteur de température | Haute sensibilité, 0,1 Hz pour les mesures basse fréquence |
| <b>Coût</b>                      | 55,61 euros                                                                                   | 84,28 euros                                                         | 13,52 euros                                                                                             | 8,1 euros                                      | 555,0 euros                                                |

On peut remarquer que la fourchette de prix est vaste entre le MEMS et le capteur piézoélectrique, ce qui est courant pour des capteurs aussi précis. C'est pourquoi les MEMS ont révolutionné l'industrie et nous ont permis par exemple de développer et de fabriquer des systèmes et solutions de maintenance prédictive à faible coût.

Après avoir examiné les spécifications de chaque capteur, nous avons sélectionné l'ADXL 356 et l'ADXL 1005 comme nos deux principaux capteurs et cela pour les raisons suivantes :



Figure 25 Accéléromètre ADXL 356C de type MEMS

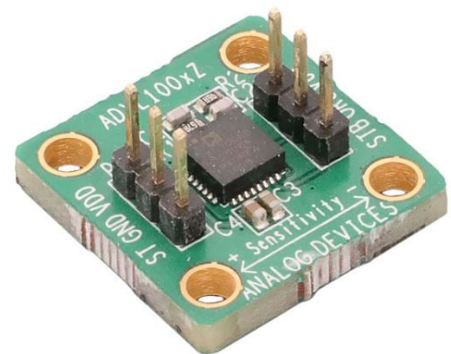


Figure 24 Accéléromètre ADXL 1005Z de type MEMS

- La bande passante de l'ADXL 356 est de 2,4 KHz, ce qui permet de couvrir la plupart des défauts basse fréquence, comme : balourd, désalignement, pied lâche...
- La bande passante de l'ADXL 1005 est de 42 KHz, ce qui est parfait pour détecter les défauts haute fréquence et même ultrasoniques, comme : Défauts de roulements, défauts d'engrenage, défauts de lubrification.
- L'ADXL 356 peut lire sur 3 axes différents, XY et Z.
- L'ADXL 356 dispose d'un capteur de température intégré.
- Les ADXL 356 et ADXL 1005 produisent tous deux des

signaux analogiques. Cela nous permettrait d'avoir plus de flexibilité dans la sélection d'un circuit analogique.

De plus, nos raisons de ne pas utiliser un capteur numérique sont les suivantes :

- La présence d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) intégré poserait des limitations :
  - La valeur de fréquence maximale couverte par le capteur serait limitée.
  - La fréquence d'échantillonnage varierait considérablement en cas d'utilisation de la méthode d'échantillonnage séquentielle par moyenne.
  - L'impossibilité de modifier le *firmware* du CAN intégré, car nous n'aurions accès qu'aux paramètres définis par le fabricant.

- La résolution minimale requise ne serait pas atteinte avec le CAN intégré.

- Limitations des filtres :

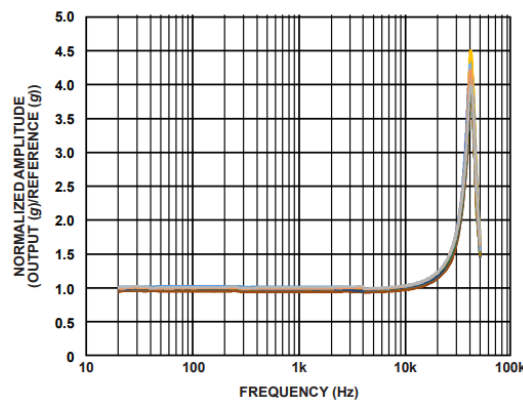
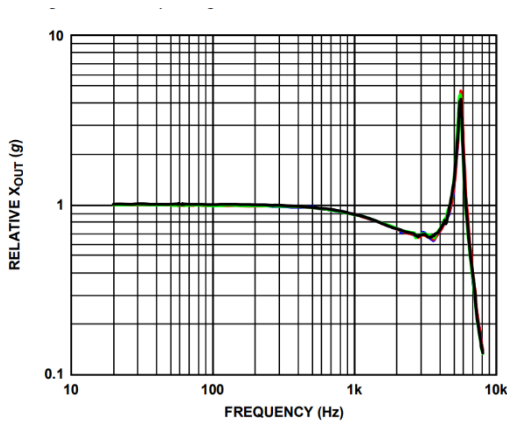
- Les filtres intégrés sont des filtres de Bessel de 2e ordre qui ne répondent pas aux exigences de filtrage de la norme S1.1.2.

- Capteur à haute fréquence :

- Les spécifications de l'accéléromètre numérique sont techniquement équivalentes, voire plus que suffisantes pour l'accéléromètre analogique à basse fréquence que nous avons choisi.

- L'accéléromètre numérique ne répond pas aux exigences de haute fréquence (fréquence ultrasonique  $F_{max} > 20$  kHz). Par conséquent, si nous souhaitions choisir un capteur numérique pour les basses fréquences et un capteur analogique pour les hautes fréquences, cela ajouterait des tâches de conception de firmware plus complexes. Étant donné que nous développons du code pour le système d'exploitation en temps réel (RTOS) dans le firmware pour le CAN, nous pourrions utiliser le composant logiciel développé pour acquérir des données à la fois à partir des accéléromètres à basse et à haute fréquence.

#### 4.1.6 Spécifications techniques



Les deux graphes suivants représentent la valeur de l'amplitude au sortie des deux accéléromètres ADXL en fonction de la fréquence. Il est nécessaire

que cette plage se situe à l'intérieur de la plage linéaire indiquée de leur réponse. Le tableau au-dessous indique la plage de fréquences dans laquelle les deux capteurs MEMS fonctionneront.

Tableau 2 Capteurs MEMS utilisés pour ce projet

| Capteur  | Fréquence min | Fréquence maximale | Description                                 |
|----------|---------------|--------------------|---------------------------------------------|
| ADXL356  | dix           | 1000               | Utilisé pour les défauts de basse fréquence |
| ADXL1005 | 100           | 10000              | Utilisé pour les défauts de haute fréquence |

#### 4.1.7 Brochage des composants

Ainsi, maintenant en choisissant les capteurs suivants, nous savons désormais que nous disposons du brochage suivant de notre composant S1.1.1 :

Tableau 3 Brochage du composant S1.1.1

| Nom de la broche | Taper      | Direction | Composant | Description                                                                    |
|------------------|------------|-----------|-----------|--------------------------------------------------------------------------------|
| X_Raw            | Analogique | Sortir    | ADXL356   | Sortie axe X du capteur basse fréquence                                        |
| Y_Brut           | Analogique | Sortir    | ADXL356   | Sortie sur l'axe Y du capteur basse fréquence                                  |
| Z_Brut           | Analogique | Sortir    | ADXL356   | Sortie de l'axe Z du capteur basse fréquence                                   |
| Temp_Raw         | Analogique | Sortir    | ADXL356   | Sortie du capteur de température                                               |
| RANGE_LF         | Numérique  | Saisir    | ADXL356   | Broche de sélection de plage entre les modes 40g et 20g                        |
| ST1_LF           | Numérique  | Saisir    | ADXL356   | Test d'activation de la broche 1 pour le capteur basse fréquence               |
| ST2_LF           | Numérique  | Saisir    | ADXL356   | Test d'activation de la broche 2 pour le capteur basse fréquence               |
| VSUPPLY_LF       | Pouvoir    | Saisir    | ADXL356   | Broche qui alimente le capteur basse fréquence                                 |
| VSSIO            | Pouvoir    | Saisir    | ADXL356   | Broche qui relie la masse de l'alimentation au capteur basse fréquence         |
| STBY_LF          | Numérique  | Saisir    | ADXL356   | Broche de sélection du mode basse consommation pour le capteur basse fréquence |
| HF_Brut          | Analogique | Sortir    | ADXL1005  | Sortie de l'axe Y du capteur haute fréquence                                   |
| VDD_HF           | Pouvoir    | Saisir    | ADXL1005  | Broche qui alimente le capteur haute fréquence                                 |
| VSS_HF           | Pouvoir    | Saisir    | ADXL1005  | Broche qui relie la masse de l'alimentation au capteur haute fréquence         |
| STBY_HF          | Numérique  | Saisir    | ADXL1005  | Broche de sélection du mode basse consommation pour le capteur haute fréquence |
| ST_HF            | Numérique  | Saisir    | ADXL1005  | Test d'activation de la broche 1 pour le capteur haute fréquence               |
| OR_HF            | Numérique  | Sortir    | ADXL1005  | Broche indicatrice hors de portée pour capteur haute fréquence                 |

#### 4.1.8 Architecture des composants

Après une vérification complète, voici le diagramme d'architecture des composants que nous obtenons :



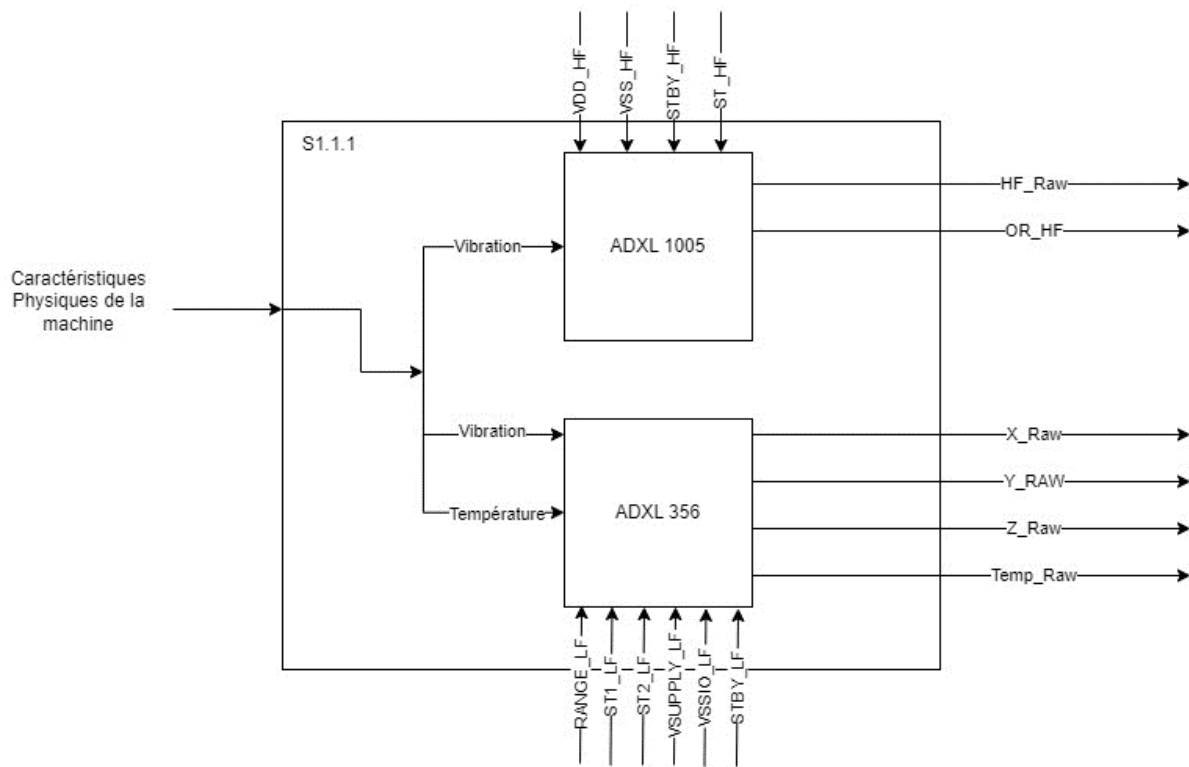


Figure 28 Architecture du composant S1.1.1

## 4.2 S1.1.2 Traitement du signal analogique

### 4.2.1 Exigences matérielles des composants

À partir de là, nous avons une bonne compréhension de la configuration matérielle requise pour le composant suivant.

- Req1.1.2.1 : Le composant S1.1.2 – « Traitement du signal analogique » doit avoir 4 entrées analogiques.
- Req1.1.2.2 : Le composant S1.1.2 doit être au moins un filtre de 4eme ordre.
- Req1.1.2.3 : Le composant S1.1.2 doit avoir une fréquence de coupure réglable pour chaque capteur.
- Req1.1.2.4 : Le composant S1.1.2 doit émettre un signal analogique filtré vers le composant suivant afin qu'il puisse être introduit dans l'ADC pour être numérisé.
- Req1.1.2.5 : Le composant S1.1.2 doit avoir une fréquence maximale supérieur à celle du composant S1.1.1.

### 4.2.2 Traitement du signal analogique :

Comme nous utilisons deux accéléromètres MEMS analogiques, il est logique de les associer à un circuit de traitement du signal analogique. Il s'agit ici de filtrer les signaux analogiques.

Par filtrage, on parle bien sûr d'un filtre anti-repliement. Afin de choisir un filtre anti-repliement, nous devons déterminer les caractéristiques de notre signal, comme la fréquence maximale et l'atténuation nécessaire.



Nous avons le choix d'utiliser un simple filtre passe-bas passif, ou même un filtre actif qui serait beaucoup plus efficace pour filtrer les signaux dont les fréquences sont supérieures à la fréquence de coupure du filtre. Voici les différentes solutions que nous avons envisagées tout au long de cette étude :

Les filtres les plus courants sont ceux de Butterworth, de Chebyshev et de Bessel. De nombreux autres types sont disponibles, mais la majorité des applications peuvent être résolues avec l'un de ces trois types.

Le filtre peut être tourné de manière beaucoup plus efficace. Par exemple, nous pouvons concevoir un filtre passe-bas de Chebyshev de 5ème ordre, avec un affaiblissement de 1dB, qui est construit à partir de trois ampli-ops et d'un réseau de composants passives RC.

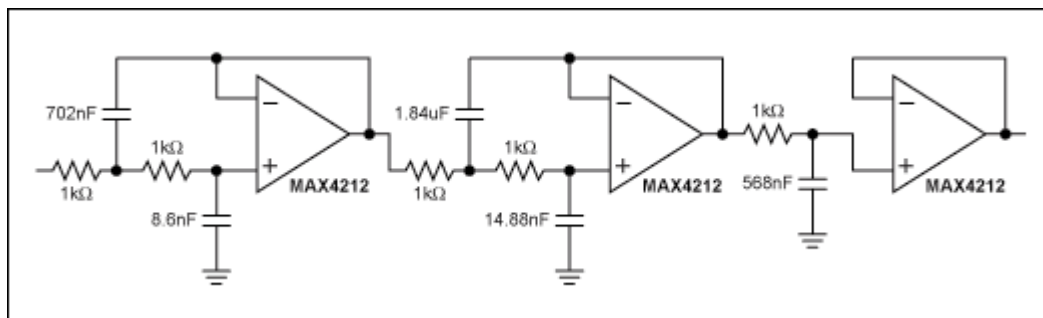


Figure 29 Exemple d'un circuit de filtre Passe Bas de 5eme ordre

Mais la conception de tels filtres analogiques poserait beaucoup de complications. Ainsi, en revenant à notre projet, nous pouvons voir qu'il s'agit d'une petite composante de notre projet mais d'une composante très importante. Nous avons donc exploré quelques circuits intégrés qui offrent des filtres passe-bas réglables très efficaces en termes de conception et de consommation d'énergie, le tout dans la commodité d'un circuit intégré SMD.

Nous avons exploré la série MAX7418-MAX7425 de filtres passe-bas d'ordre 5, à condensateurs commutés (SCF). Ces dispositifs ne consomment que 3mA de courant d'alimentation et permettent des fréquences de coin de 1Hz à 45kHz, ce qui les rend idéaux pour les applications de filtrage post-DAC et d'anticrénelage à faible consommation. Ils disposent d'un mode d'arrêt qui réduit le courant d'alimentation à 0,2μA.

Deux options d'horloge sont disponibles : auto-clocking (par l'utilisation d'un condensateur externe), ou clocking externe pour un contrôle plus serré de la fréquence d'angle.

Tableau 4 Comparaison des differents LPFs

| Modèle de Filtre | Rejet de la Bande d'Arrêt (dB) | Ratio de Transition | Type de Filtre         | Caractéristiques                       |
|------------------|--------------------------------|---------------------|------------------------|----------------------------------------|
| MAX7418/MAX7422  | 53                             | 1,6                 | Roll-off Prononcé      | Rejet élevé de la bande d'arrêt        |
| MAX7421/MAX7425  | 37                             | 1,25                | Roll-off Plus Prononcé | Rejet de la bande d'arrêt encore bon   |
| MAX7419/MAX7423  | N/A (Bessel)                   | N/A                 | Bessel                 | Faible dépassement, rapide à s'établir |
| MAX7420/MAX7424  | 53                             | 1.6                 | Butterworth            | Réponse de bande passante maximale     |

Pour notre application, nous avons utilisé le qui est un filtre passe-bas du 5ème ordre, à commuté et à fréquence de coupure réglable en l'horloge, avec une plage de 1 KHz à 75 KHz.

Pour les applications impliquant l'acquisition de vibratoires, le maintien de la précision et de la données acquises est crucial. Les caractéristiques Butterworth peuvent aider à atteindre cet objectif minimisant la distorsion et le bruit dans la gamme fréquences concernée.

Le MAX7420 offre 53 dB de rejet de bande atténuation nette avec un rapport de transition de filtres Butterworth du 5ème ordre fournissent une bande passante extrêmement plate. Leur réponse fixe simplifie la tâche de conception consistant à sélectionner une fréquence d'horloge.

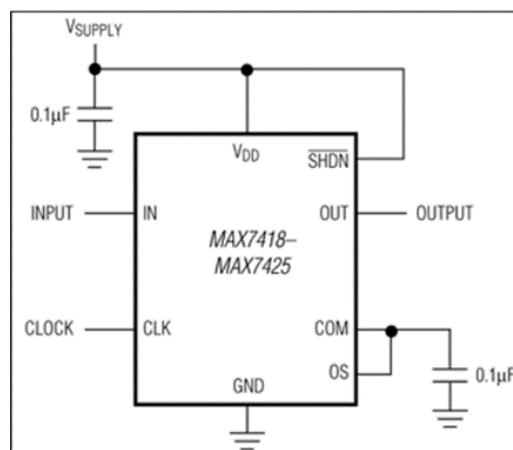


Figure 30 LPF MAX7420

MAX7420, condensateur fonction de

données fidélité des d'un filtre de en de

d'arrêt et une 1,6. Les réponse de

### 4.2.3 Architecture des composants

Ainsi, nous pourrions utiliser 4 des filtres passe-bas MAX7420 afin de répondre aux exigences du système pour ce composant. L'architecture des composants S1.1.2 doit ressembler à ceci :

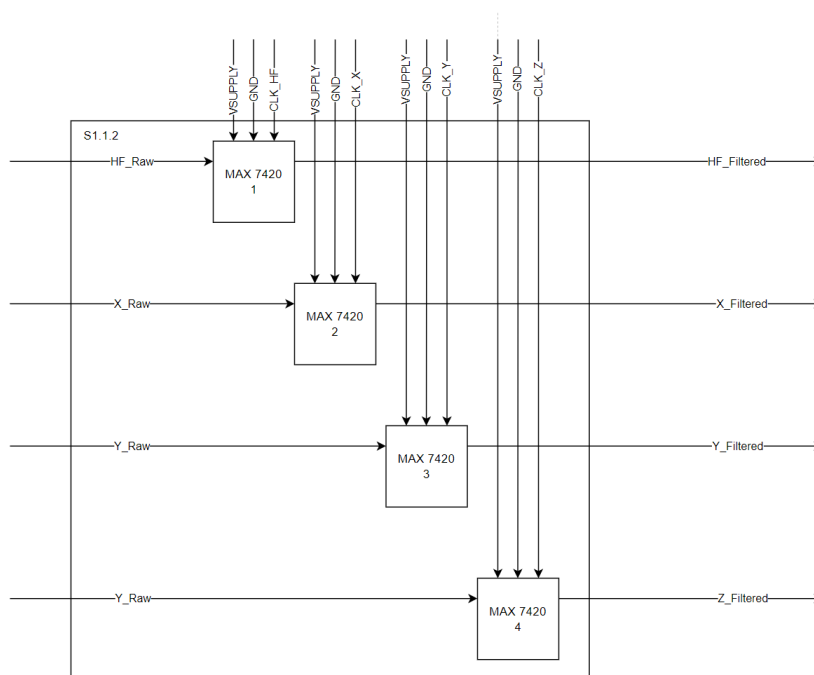


Figure 31 Architecture du composant S1.1.2

## 4.2.4 Branchement des composants

Tableau 5 Brochage du composant S1.1.2

| Nom de la broche | Taper      | Direction | Composant      | Description                                                                       |
|------------------|------------|-----------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| HF_Brut          | Analogique | Saisir    | Maximum 7420 1 | Entrée de l'axe HF du capteur basse fréquence                                     |
| X_Raw            | Analogique | Saisir    | Maximum 7420 2 | Entrée de l'axe X du capteur basse fréquence                                      |
| Y_Brut           | Analogique | Saisir    | Maximum 7420 3 | Entrée de l'axe Y du capteur basse fréquence                                      |
| Z_Brut           | Analogique | Saisir    | Maximum 7420 4 | Entrée sur l'axe Z du capteur basse fréquence                                     |
| HF_Filtré        | Analogique | Sortir    | Maximum 7420 1 | Sortie de l'axe HF du filtre passe-bas                                            |
| X_Filtré         | Analogique | Sortir    | Maximum 7420 2 | Sortie sur l'axe X du filtre passe-bas                                            |
| Y_Filtré         | Analogique | Sortir    | Maximum 7420 3 | Sortie sur l'axe Y du filtre passe-bas                                            |
| Z_Filtré         | Analogique | Sortir    | Maximum 7420 4 | Sortie sur l'axe Z du filtre passe-bas                                            |
| CLK_HF           | Numérique  | Saisir    | Maximum 7420 1 | Signal d'entrée d'horloge pour le contrôle de la fréquence de coupure de Max LPF1 |
| CLK_X            | Numérique  | Saisir    | Maximum 7420 2 | Signal d'entrée d'horloge pour le contrôle de la fréquence de coupure du Max LPF2 |
| CLK_Y            | Numérique  | Saisir    | Maximum 7420 3 | Signal d'entrée d'horloge pour le contrôle de la fréquence de coupure du Max LPF3 |
| CLK_Z            | Numérique  | Saisir    | Maximum 7420 4 | Signal d'entrée d'horloge pour le contrôle de la fréquence de coupure du Max LPF4 |
| VSS              | Pouvoir    | Saisir    | commun         | Ligne positive d'alimentation d'entrée commune pour les 4 LPF                     |
| GND              | Pouvoir    | Saisir    | commun         | Terrain d'entente                                                                 |

## 4.2.5 System on Chip (SoC)

En lisant les exigences du système, on peut imaginer une solution possible d'un circuit intégré ADC et d'une minuterie d'horloge PWM à 4 canaux et d'un circuit intégré EEPROM, associés à un microcontrôleur. Mais étant donné que le système est d'origine embarquée, il serait plutôt plus efficace d'utiliser une solution System on Chip (SoC). Il existe un large choix de SoC disponibles sur le marché. Notre projet se

concentrant principalement sur le côté IOT du domaine embarqué.

Au cours de ce projet, les deux principaux grands noms du secteur des SoC pour l'IOT étaient les suivants :

PSOC 6 - CYBLE-416045-02 de Cypress Infineon, et l'ESP32, esp32-s3-wroom-1u d'Espressif Systems.

Cela présente plusieurs avantages :

- Comprend un périphérique ADC



Figure 33 SoC PSOC 6

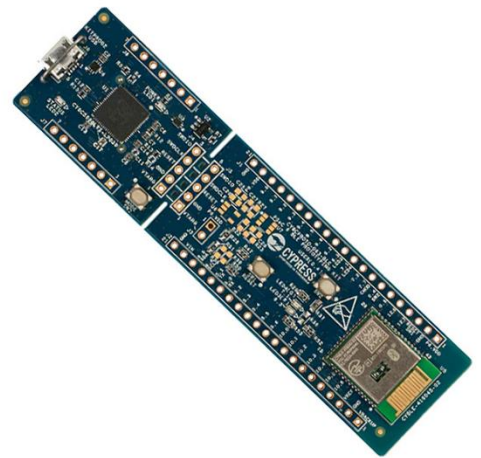


Figure 32 SoC ESP32-S3

- Inclure des minuteries d'horloge PWM
- Comprend un périphérique BLE 5.0.
- Comprend un périphérique WiFi.
- Antennes PCB intégrées.
- A une puce EEPROM intégrée.
- Possède un périphérique RTC intégré.
- Peut être connecté à d'autres périphériques via les protocoles SPI et i2C.
- Caractéristiques UART.
- Comprend JTAG pour la programmation USB avec chargeur de démarrage sécurisé pour les versions de production.
- Alimentation intégrée.
- Programmable en C avec l'IDE.
- Interface commune entre différents périphériques.
- Programmable de nature et pris en charge par la fabrication Hardware Abstract Layer (HAL).
- Prise en charge de faible consommation pour tous les périphériques.
- Faible empreinte PCB.
- Abordable que d'autres solutions de composants séparés.
- Comprend des cartes de développement pour un développement logiciel facile et indépendant du matériel.

C'est la raison pour laquelle nous avons choisi le PSOC 6 comme SoC de calcul en périphérie qui sera couplé aux accéléromètres MEMS pour les raisons suivantes :

- Les cœurs ARM Cortex M4 et Cortex M0+ à faible consommation d'énergie, qui le rendraient parfait pour une faible consommation d'énergie.
- PSOC 6 est également une plateforme bien connue pour ses API robustes et sa documentation, en particulier pour les applications IOT.
- PSOC 6 comportait un composant certifié BLE 5.0 très bien documenté, avec une antenne intégrée de 7dBm.



*Figure 34 Planche de développement PSOC 6 BLE*

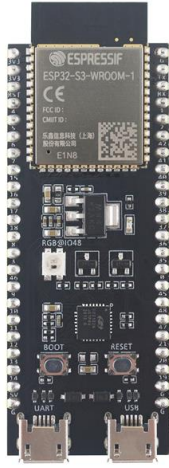


Figure 35 Planche de développement ESP32-S3

L'ESP32-S3 a été choisi comme pivot de notre système. Pour les raisons suivantes :

- Il est équipé de Wifi et de BLE 5.0, ce qui lui permet d'interagir avec différents périphériques BLE et de se connecter et/ou d'agir en tant que point d'accès.
- Supporte le RTOS pour les applications en temps réel, ce qui est nécessaire pour notre projet.
- Prix abordable et documentation open source

### 4.3 S1.1.3 Numérisation du signal

Maintenant qu'on a un signal filtré que nous allons contrôler avec différents signaux d'horloge PWM et numériser les 5 signaux analogiques dont nous disposons pour les signaux X, Y, Z, HF et de température. Nous pouvons écrire la configuration système requise pour ce composant.

#### 4.3.1 Exigences des composants

Les exigences pour S1.1.3 sont :

- Req1.1.3.1 : Le composant S1.1.3 – « Numérisation des signaux » doit disposer de 5 canaux d'entrée pour les signaux filtrés analogiques X, Y, HF et de température.
- Req1.1.3.2 : Le composant S1.1.3 doit avoir un convertisseur analogique-numérique (CAN) d'une fréquence d'échantillonnage d'au moins 2.5 fois de la fréquence maximale du capteur haut fréquence et d'une résolution suffisante pour échantillonner les signaux de sortie de S1.1.2.
- Exigence 1.1.3.3 : Le composant S1.1.3 doit disposer de 4 signaux d'horloge PWM réglables, qui doivent contrôler les fréquences de coupure des filtres passe-bas du composant S1.1.2.
- Exigence 1.1.3.4 : Le composant S1.1.3 doit être programmable et configurable afin de pouvoir être intégré dans l'ensemble du système.

On a utilisé l'ADC intégré du SoC PSOC6, qui présente une fréquence d'échantillonnage maximale de 1 MSPS et une résolution allant jusqu'à 12 bits.

Voici les différentes configurations que nous avons définies sur le composant ADC à l'aide du menu de configuration des composants du PSOC IDE.

Ci-dessous, nous pouvons trouver un tableau qui contient les principaux paramètres de configuration définis pour les fréquences d'échantillonnage et les facteurs de moyenne et de Nyquist de l'ADC pour différents canaux.

Tableau 6 Les données acquises et leurs paramètres

| Données     | Configuration | Fs max(SPS) | Fs (Hz) | Fmax (Hz) | Avg (éch.) | Nyquist |
|-------------|---------------|-------------|---------|-----------|------------|---------|
| X           | 1             | 38580       | 4000    | 1000      | 8          | 4       |
| Y           | 1             | 38580       | 4000    | 1000      | 8          | 4       |
| Z           | 1             | 38580       | 4000    | 1000      | 8          | 4       |
| HF          | 2             | 57870       | 50000   | 10000     | 16         | 5       |
| Battery     | 5             | 1808        | 400     | 100       | 256        | 4       |
| Température | 5             | 1808        | 400     | 100       | 256        | 4       |

Ci-dessous, on peut trouver un tableau qui contient les principaux paramètres de configuration définis pour le nombre d'échantillons, la plage et la résolution de l'ADC pour différents canaux.

Tableau 7 Les paramètres de l'ADC

| Données     | NbS (éch.) | Lignes spectrales | Valeur             |             | Valeur max         |                    | Résolution en mV | Résolution en bit |
|-------------|------------|-------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------------|------------------|-------------------|
|             |            |                   | Valeur min en bits | min en volt | Valeur max en bits | en facteur de Vref |                  |                   |
| X           | 32768      | 8192              | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |
| Y           | 32768      | 8192              | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |
| Z           | 32768      | 8192              | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |
| HF          | 32768      | 6553.6            | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |
| Battery     | 256        | N/A               | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |
| Température | 256        | N/A               | 0x000              | 0           | 0xFFFF             | 2*Vref             | 1.61132813       | 12-bit            |

### 4.3.2 Architecture des composants

Après avoir soigneusement examiné les exigences des composants pour S1.1.3, nous avons l'architecture système suivante :

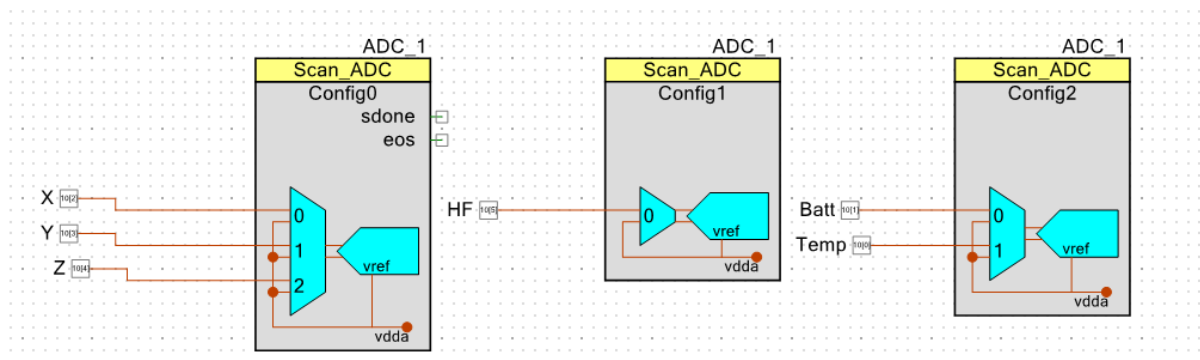


Figure 36 Architecture du composant ADC

### 4.3.3 Branchage des composants

Tableau 8 Brochage de l'ADC

| Nom de la broche | Taper      | Direction | Composant | Description                       |
|------------------|------------|-----------|-----------|-----------------------------------|
| HF               | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de l'axe HF       |
| X                | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de l'axe X        |
| Y                | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de l'axe Y        |
| Z                | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de l'axe Z        |
| Batt             | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de la batterie    |
| Temp             | Analogique | Entrée    | ADC       | Signal d'entrée de la température |

### 4.4 S1.1.4 Stockage de données

Nous disposons désormais de données numérisées sur les signaux de vibration et de température récupérés et acquis depuis la machine. Nous devons stocker ces données localement sur notre système embarqué afin de les transférer et de les utiliser dans les futurs composants du système.

#### 4.4.1 Exigences des composants

La configuration système requise pour le composant suivant ressemble à ceci :

- Req1.1.4.1 : Le composant S1.1.4 doit avoir un mémoire d'au moins de 256 KB.
- Req1.1.4.2 : Le composant S1.1.4 doit enregistrer les paramètres suivants : Fs, NbS, Résolution, Numéro de série de l'appareil de type uint32.
- Req1.1.4.3 : Le composant S1.1.4 doit être de type flash.
- Req1.1.4.4 : Le composant S1.1.4 doit conserver les données enregistrées en cas de panne de courant.

#### 4.4.2 Architecture des composants

Le moyen le plus courant de stocker des données dans des systèmes embarqués consiste à utiliser des unités de mémoire morte programmables effaçables électroniquement, également appelées EEPROM.

Au lieu d'utiliser un circuit intégré EEPROM dédié, nous utilisons le composant EEPROM émulé interne PSOC 6. Le composant EEPROM émulé émule un périphérique EEPROM dans le flash du périphérique PSoC. Sur le PSoC 6, le composant Em\_EEPROM est une entité de configuration graphique construite sur de la librairie middleware Cy\_Em\_EEPROM.

Certaines des fonctions clés de ce composant :

- Stockage non volatile de type EEPROM
- Fonctions API de lecture et d'écriture faciles à utiliser
- Option de Wear Leveling

- Stockage de copie EEPROM redondant

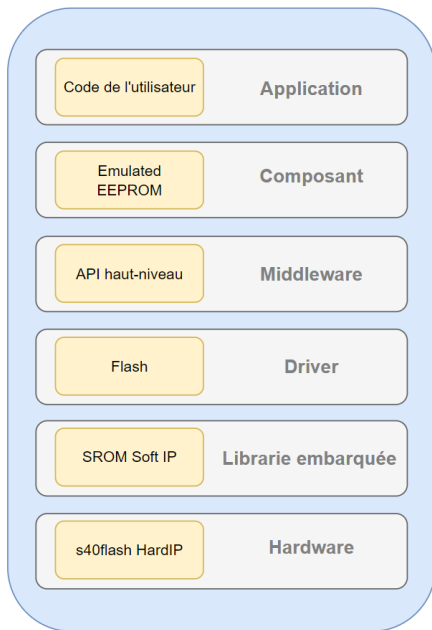


Figure 38 Représentation du composant l'EEPROM du PSOC 6

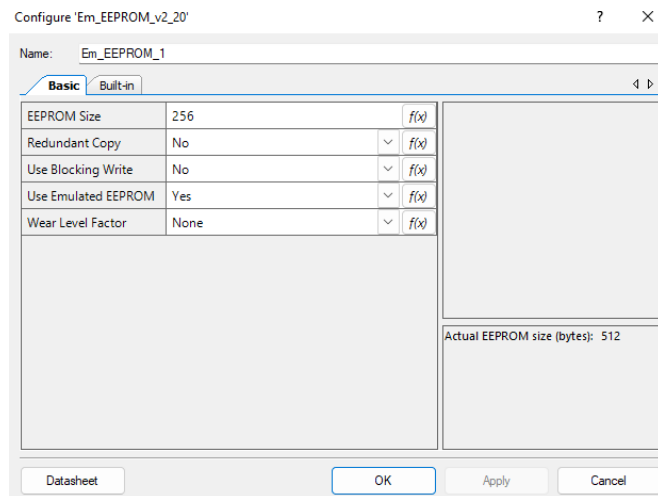


Figure 37 Menu de configuration de l'EEPROM sur PSOC 6

## 4.5 S1.2 - Transmission de données :

Maintenant que nos données de vibrations et de température sont enregistrées sur notre système embarqué, nous avons besoin de plusieurs protocoles de communication pour transférer ces données vers le cloud dans les futurs composants du système.

### 4.5.1 S1.2.1 Protocole de transmission local

Maintenant que nous sommes sûrs des SoC que nous avons choisi, les requises pour le composant 1.2.1 sont les suivants :

#### 4.5.1.1 Exigences des composants

- Req1.2.1.1 : Le composant S1.2.1 – « Protocole de transmission local » sera responsable du transfert des données stockées vers un autre appareil central sans fil.
- Req1.2.1.2 : Le composant S1.2.1 doit se connecter à un système de fichiers cloud.
- Req1.2.1.3 : Le composant S1.2.1 doit télécharger les données sur le système de fichiers cloud.
- Req1.2.1.3 : Le composant S1.2.1 doit se connecter à un réseau Wifi.

#### 4.5.1.2 Répartition des sous-composantes

En rédigeant les exigences de S1.2.1, nous nous rendons rapidement compte que la plupart des exigences sont de haut niveau. C'est pourquoi nous devons diviser davantage le composant S1.2.1 en sous-composants plus petits, définir leurs exigences et définir leurs architectures système respectives. Après avoir décomposé le composant S1.2.1, il ressemblera à ceci :



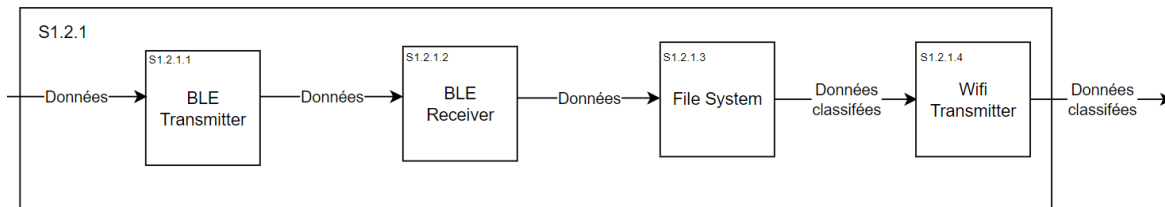


Figure 39 Sous composants du composant S1.2.1

#### 4.5.1.3 Comparaison des technologies de communication sans fil

Dans le monde technologiquement avancé d'aujourd'hui, la communication sans fil joue un rôle essentiel dans la connexion des individus et des appareils. Parmi les différentes technologies sans fil, le Bluetooth Low Energy (BLE) gagne en popularité en raison de sa faible consommation d'énergie et de son efficacité élevée. Les balises Bluetooth Low Energy (BLE) ont connu un véritable engouement ces dernières années. Ces petits dispositifs, qui utilisent une technologie de communication sans fil à faible consommation d'énergie pour transmettre des données, se sont immiscés dans de nombreux domaines, des magasins de détail aux aéroports, aux musées et aux hôpitaux. Mais qu'est-ce que le BLE exactement, et qu'est-ce qui le rend si puissant ? Dans cet article, nous plongerons en profondeur dans le monde des balises Bluetooth à faible consommation d'énergie et comparerons les balises Bluetooth LE à d'autres technologies radio, telles que les balises Wi-Fi, les balises Zigbee, les balises RFID, les balises LoRa, les balises NFC et les balises LTE.

Tableau 9 Tableau Comparatif des différents technologies RF

| Technologie | Précision de la localisation | RANGE        | LATENCY | Consommation de courant | Cout     | FREQUENCIES                   | DATA RATE        |
|-------------|------------------------------|--------------|---------|-------------------------|----------|-------------------------------|------------------|
| BLE         | Moyen à fort                 | 10-100m      | 6ms     | Faible                  | \$       | 2.4GHz                        | jusqu'à 2 Mbps   |
| WiFi        | Fort                         | 30-100m      | 100ms+  | élevé                   | \$\$     | 2.4GHz/5GHz                   | jusqu'à 1.3 Gbps |
| Zigbee      | Moyen                        | 10-100m      | 100ms+  | Faible                  | \$\$     | 2.4GHz/868MHz/915MHz          | jusqu'à 250 kbps |
| RFID        | Faible                       | Up to 100m   | ms      | Faible                  | \$\$     | 125kHz/13.56MHz/433MHz/900MHz | jusqu'à 640 kbps |
| LoRa        | Moyen à élevé                | Up to 15km   | seconds | Très faible             | \$\$\$   | 433MHz/868MHz/915MHz          | jusqu'à 50 kbps  |
| NFC         | Faible à moyen               | <20 cm       | ms      | Très faible             | \$\$     | 13.56MHz                      | jusqu'à 424 kbps |
| LTE         | faible à fort                | jusqu'à 30km | ms      | Très élevé              | \$\$\$\$ | divers                        | jusqu'à 1 Gbps   |

La technologie des balises BLE présente plusieurs avantages par rapport à d'autres technologies RF (radiofréquence), telles que les balises Wi-Fi, Zigbee, RFID, LoRa, NFC et LTE. Le tableau suivant compare ces technologies RF en fonction de divers paramètres. Comme vous pouvez le constater, le BLE présente plusieurs avantages par rapport aux autres technologies RF. Tout d'abord, les balises Bluetooth LE utilisent la bande de fréquence de 2,4 GHz, qui est une bande de fréquence non autorisée et largement

utilisée pour la communication sans fil. Deuxièmement, elles ont une portée plus longue que les balises NFC et les balises RFID, et elles consomment moins d'énergie que les balises Wi-Fi et les balises LTE. Troisièmement, elles ont également un débit de données plus élevé que les balises Zigbee et les balises NFC, ce qui les rend idéales pour les applications nécessitant un transfert de données plus rapide. Quatrièmement, le coût de déploiement des balises Bluetooth LE est inférieur à celui des balises Wi-Fi et LoRa, ce qui en fait une solution économique pour de nombreuses applications.

En ce qui concerne les balises basées sur d'autres technologies RF, on peut voir que les balises Wi-Fi ont une grande précision de localisation et une portée, mais elles sont énergivores et coûteuses. Les balises Zigbee ont une faible latence et une faible consommation d'énergie, mais une portée et un débit de données limités. Les balises RFID ont une faible précision de localisation, mais elles sont bon marché et ont une longue portée. Les balises LoRa ont une longue portée et une faible consommation d'énergie, mais un faible débit de données. Les balises NFC ont une précision et une portée de localisation faibles à moyennes, mais elles sont très bon marché et ont une faible consommation d'énergie. Les balises LTE ont une grande précision de localisation et une portée, mais elles sont coûteuses et gourmandes en énergie.

Par conséquent, le choix de la balise RF à utiliser dépend des exigences spécifiques de l'application. Par exemple, les balises BLE peuvent être adaptées aux services de localisation en intérieur nécessitant une faible consommation d'énergie, tandis que les balises RFID peuvent être adaptées au suivi des stocks nécessitant une lecture à longue portée.

#### 4.5.2 Qu'est-ce que le Bluetooth Low Energy (BLE) ?

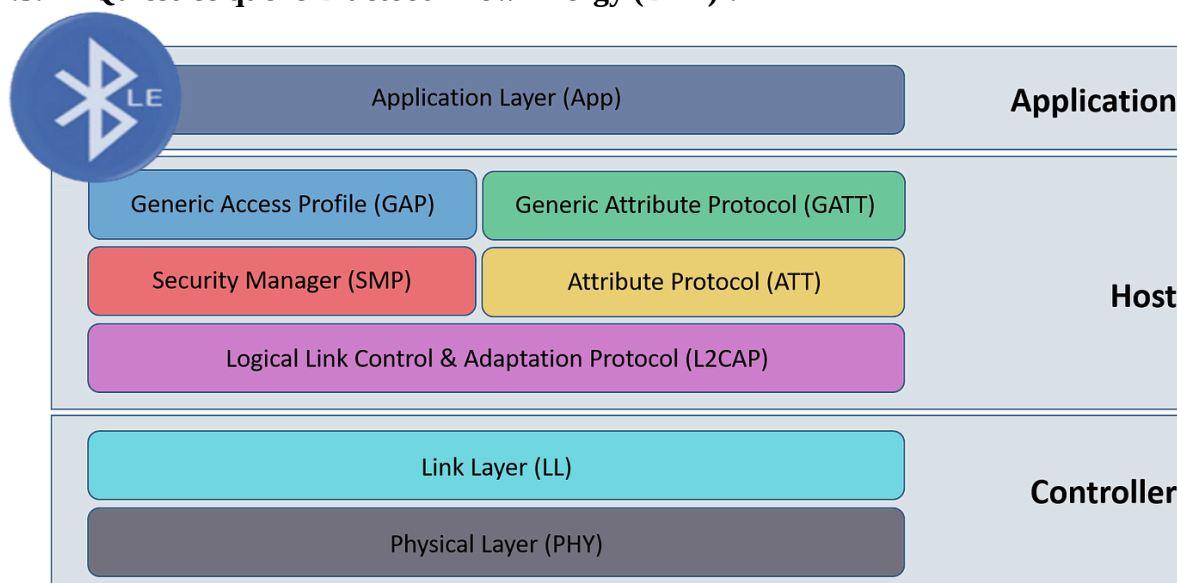


Figure 40 Représentation du Stack BLE

Le BLE, également connu sous le nom de Bluetooth Smart, est un protocole de communication sans fil introduit par Bluetooth SIG en 2010. Il a été conçu pour fournir une alternative à faible consommation d'énergie par rapport au Bluetooth traditionnel, en mettant l'accent sur les appareils alimentés par batterie nécessitant une longue durée de vie de la batterie. Le BLE fonctionne dans la bande Scientifique, Médicale et Industrielle de 2,4 GHz et a une portée pouvant aller jusqu'à 100 mètres.

Comparé au Bluetooth classique, le BLE est plus simple et plus économe en énergie, ce qui en fait la solution idéale pour les appareils nécessitant une longue autonomie de batterie. De plus, il est moins coûteux, ce qui a contribué à sa large adoption dans diverses applications.

#### Avantages techniques des balises Bluetooth à faible consommation d'énergie

Les balises Bluetooth à faible consommation d'énergie présentent plusieurs avantages techniques et fonctionnalités qui les rendent idéales pour une large gamme d'applications. Celles-ci comprennent :

**Faible consommation d'énergie :** Le BLE utilise très peu d'énergie, ce qui en fait la solution idéale pour les appareils alimentés par batterie qui doivent fonctionner pendant de longues périodes.

**Conception simple :** Les appareils BLE sont simples à concevoir et à fabriquer, ce qui les rend moins coûteux que d'autres technologies de communication sans fil.

**Compatibilité :** Le BLE est compatible avec la plupart des smartphones et tablettes, ce qui facilite son intégration dans les systèmes existants.

**Sécurité :** Le BLE utilise un chiffrement AES-128, offrant un niveau élevé de sécurité et empêchant l'accès non autorisé.

**Fiabilité :** Le BLE est très fiable et peut fonctionner dans des environnements difficiles sans interférence.

**Basé sur la proximité :** Les balises BLE sont basées sur la proximité, ce qui signifie qu'elles peuvent détecter les appareils à proximité et déclencher des actions en fonction de leur emplacement.

#### 4.5.3 Principe de fonctionnement des balises Bluetooth à faible consommation d'énergie

Les balises Bluetooth à faible consommation d'énergie sont de petits dispositifs à faible consommation d'énergie qui diffusent un signal à intervalles réguliers. Lorsqu'un appareil à proximité, tel qu'un smartphone ou une tablette, reçoit le signal, il peut déterminer sa proximité avec la balise. Les balises Bluetooth à faible consommation d'énergie utilisent la technologie Bluetooth Low Energy (BLE), conçue pour être économe en énergie et capable de fonctionner pendant des mois, voire des années, avec une seule batterie. Les balises Bluetooth à faible consommation d'énergie sont souvent utilisées avec une application mobile ou un autre logiciel capable d'interpréter le signal de la balise et de déclencher une action, telle que l'affichage d'une notification ou l'envoi d'un message.

Tableau 10 Caractéristiques du BLE

|                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Temps minimal pour envoyer des données</b> | 6ms                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Débit maximal</b>                          | 2 Mbps (BLE 5)                                                                                                                                                                                                                                                             |
| <b>Distance couverte</b>                      | Dépend du mode de portée sélectionné, des fonctionnalités utilisées et des conditions environnementales. La portée normale est de 10 à 30 mètres. Cependant, dans des conditions idéales, les produits Bluetooth version 5 LE peuvent se connecter sur environ 100 mètres. |
| <b>Sécurité</b>                               | Dans le mode CCM 128-bit AES                                                                                                                                                                                                                                               |
| <b>Consommation de courant maximal</b>        | >15mA                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Latency</b>                                | 6ms                                                                                                                                                                                                                                                                        |

En résumé, les balises *Bluetooth Low Energy* constituent une technologie RF puissante offrant de nombreux avantages par rapport à d'autres technologies RF.

C'est pour cela que le BLE est idéal pour une application IoT de maintenance prédictive basée sur l'analyse des vibrations des moteurs à induction pour plusieurs raisons :

1. Économie d'Énergie : BLE est économe en énergie, prolongeant la durée de vie des batteries.
2. Coût Abordable : Les modules BLE sont économiques.
3. Sécurité : BLE intègre des fonctionnalités de sécurité solides.
4. Extensibilité : Il est facile d'ajouter des dispositifs BLE supplémentaires.
5. Indépendance de Plateforme : BLE fonctionne avec diverses plateformes.
6. Portée Moyenne : La couverture BLE est suffisante pour la surveillance des moteurs à induction.

En somme, BLE offre une solution économe en énergie, économique, sécurisée, extensible et polyvalente, idéale pour votre application IoT de maintenance prédictive.

#### 4.5.4 Sous-composant S1.2.1.1 – Émetteur BLE

L'émetteur BLE est intégré au SoC PSOC 6 qui est utilisé pour acquérir nos données. Nous utilisons ce sous-composant comme émetteur BLE afin d'envoyer les données et de pouvoir étendre le système autour d'un appareil central principal. Cela signifie qu'à terme, lorsque nous aurons plusieurs capteurs sur une machine, le client devrait pouvoir recevoir et surveiller les données de tous ces capteurs sans délai considérable. Bluetooth Low Energy nous permet d'y parvenir.

Le PSOC 6 est configuré comme périphérique dans le réseau BLE, et comme nous utilisons la version BLE 5.0, notre configuration de données ressemble à ceci :

##### Generic Attribute Protocol (GATT) Settings

Les Paramètres GATT sont utilisés pour configurer les paramètres spécifiques au profil BLE. Ici, on définit essentiellement les différents services, caractéristiques et descripteurs. On peut résumer les paramètres GATT créés de notre paquet BLE dans le tableau suivant :

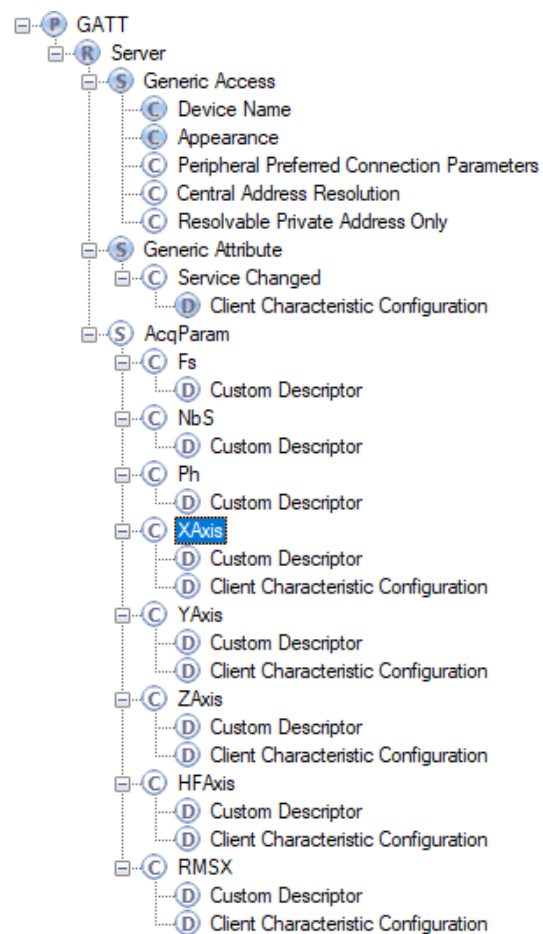


Figure 41 Client GATT du composant émetteur BLE

Tableau 11 Paramètres et configurations du client GATT

| Caractéristique | Description                                    | Propriété             | Type   | Service  |
|-----------------|------------------------------------------------|-----------------------|--------|----------|
| Nbs             | Nombre d'échantillons                          | écriture              | uint8  | AcqParam |
| Fs              | Fréquence d'échantillonnage                    | écriture              | uint8  | AcqParam |
| Ph              | Valeur de phase                                | écriture              | uint8  | AcqParam |
| XAxis           | Valeur de la vibration au sens horizontale     | écriture/Notification | uint32 | AcqParam |
| Yaxis           | Valeur de la vibration au sens verticale       | écriture/Notification | uint32 | AcqParam |
| ZAxis           | Valeur de la vibration au sens axiale          | écriture/Notification | uint32 | AcqParam |
| HFAxis          | Valeur de la vibration haute fréquence         | écriture/Notification | uint32 | AcqParam |
| RMSX            | Valeur de la vibration RMS au sens horizontale | écriture/Notification | uint32 | AcqParam |

Nous devons également noter que nous utilisons l'antenne intégrée PSOC 6 offert dans le SoC. Cette antenne peut offrir une sortie de puissance allant jusqu'à 7 dBm, ce qui se traduit par une distance de transmission allant jusqu'à 100 m dans les espaces ouverts.

#### 4.5.5 Sous-composant S1.2.1.2 – Récepteur BLE

Afin de recevoir les données de l'appareil en périphérie, nous avons besoin d'un appareil agissant comme une passerelle IoT. Dans ce cas, nous utilisons le SoC ESP32S3. Ce SoC d'Espressif est équipé de la connectivité BLE et WiFi avec une antenne intégrée, associée à un puissant microcontrôleur double cœur doté d'une architecture RISC.

Pour utiliser la composante réceptrice Bluetooth de cet appareil, nous devons initier le périphérique BLE en tant que client GATT BLE. Un client Bluetooth Low Energy (BLE) recherche les serveurs à proximité et se connecte à un service prédéfini. Le client recherche ensuite les caractéristiques disponibles et s'abonne à une caractéristique connue pour recevoir des notifications ou des indications.

Dans notre application, le serveur BLE est le périphérique périphérique PSOC6 BLE. Étant donné que nous avons initialisé le serveur périphérique avec le service et les caractéristiques appropriés, ainsi que leurs Identifiants Universels Uniques (UUID) prédéfinis, l'ESP32 peut se connecter au service du serveur et s'abonner à toutes ses caractéristiques séquentiellement afin de recevoir les données transmises.

Tableau 12 Paramètres et configuration des données transmises par BLE

| Caractéristique | UUID (16-bit) | Type   | Nombre d'échantillons | Total size of data (bit) | Transfer duration (s) |
|-----------------|---------------|--------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nbs             | 1235          | uint8  | 1                     | 8                        | 0.0000625             |
| Fs              | 1236          | uint8  | 1                     | 8                        | 0.0000625             |
| Ph              | 1237          | uint8  | 1                     | 8                        | 0.0000625             |
| XAxis           | 1239          | uint32 | 32768                 | 1048576                  | 8.192                 |
| Yaxis           | 1241          | uint32 | 32768                 | 1048576                  | 8.192                 |
| ZAxis           | 1242          | uint32 | 32768                 | 1048576                  | 8.192                 |
| HFAxis          | 1243          | uint32 | 32768                 | 1048576                  | 8.192                 |
| RMSX            | 1244          | uint32 | 10                    | 320                      | 0.0025                |

Dans le tableau ci-dessous, nous avons classé toutes les caractéristiques par leurs UUID, leur type, la taille totale des données transférées en bits et le nombre d'échantillons, ainsi que la durée du transfert en secondes.

Nous constatons que si toutes les données doivent être transférées du PSOC à l'ESP, cela prendrait un temps total de 32,8 secondes, ce qui nous donne un débit binaire de 2 Mbps ou 128 Ko/s.

#### 4.5.6 Sous-composante S1.2.1.3 – Système de fichier

Maintenant que nous avons reçu les données, il est temps de les organiser de manière compréhensible, à la fois au format de fichier et en termes de lisibilité. Une fois les données reçues, elles doivent être stockées dans une mémoire non volatile. Dans le schéma de flux suivant, nous décrivons le flux de données. À droite, nous pouvons voir la structure du fichier texte que nous avons utilisé.

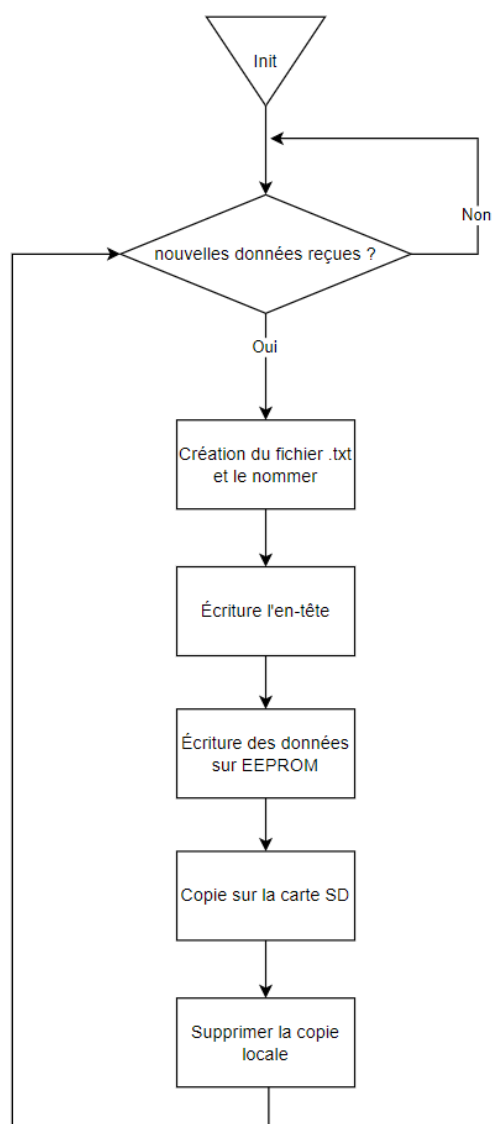


Figure 43 Organigramme indiquant le flux de données

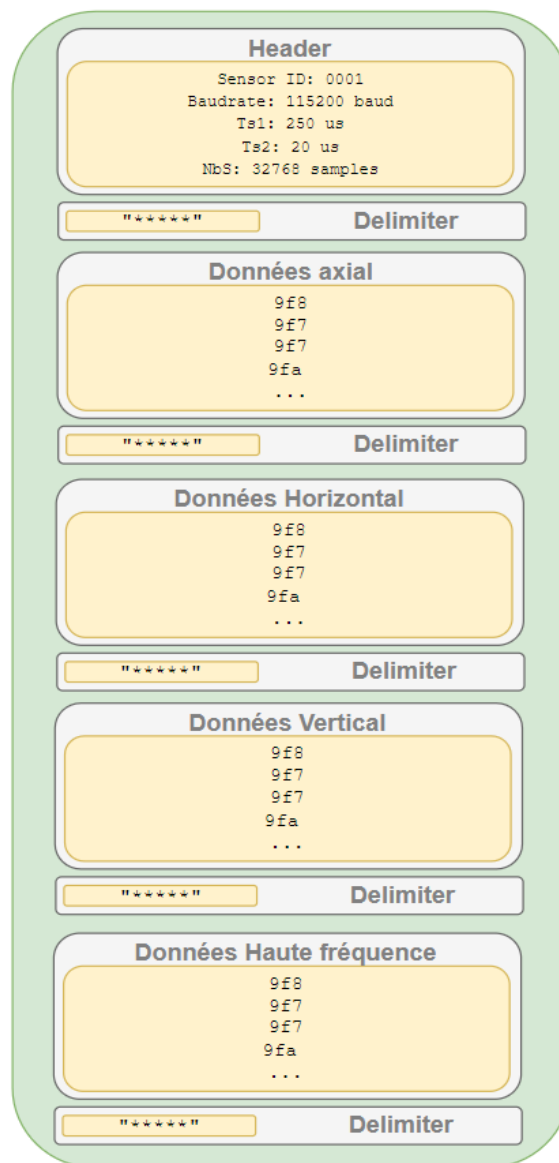


Figure 42 Représentation du fichier TXT

Ce même fichier sera téléchargé sur le serveur FTP via Wifi dans les prochains sous-composants.

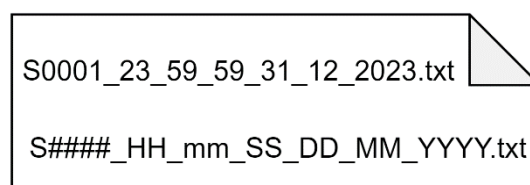
Afin de créer et de stocker localement le fichier, nous utilisons la bibliothèque SPIFFS de l'ESP32. Cette bibliothèque nous permet de créer un fichier texte (.txt) d'une taille totale de 500 Kb et de le stocker temporairement dans la mémoire EEPROM, puis de faire une copie de sauvegarde sur une carte SD de 16 Gb connectée à l'ESP via SPI. La raison pour laquelle nous stockons le fichier deux fois est liée à notre analyse de sécurité fonctionnelle du système. Les différents points de défaillance du système peuvent être les suivants :

- Perte de courant pendant la réception.
- Perte de courant pendant le stockage sur la carte SD.
- Perte de courant pendant le téléchargement sur le serveur FTP.
- Perte de réseau.
- Bug de code / boucle infinie.

La solution à ces problèmes est de stocker les données reçues dans une mémoire non volatile. Ainsi, en cas de perte de courant, nous ne perdons pas les données, et après le redémarrage du système, nous pouvons reprendre notre session au lieu de perdre les données. De plus, en cas de perte de réseau, la copie sur notre carte SD nous permet de ne pas bloquer la séquence du système, ce qui signifie que d'autres données peuvent être reçues jusqu'à ce que l'appareil soit reconnecté au serveur FTP. Cette redondance assure une plus grande fiabilité et permet au système de continuer à fonctionner même en cas de perturbations ou de pannes.

Pour les bugs de code et les boucles infinies, nous utiliserons le délai du timer de surveillance (watchdog timer) de l'ESP32, que nous aborderons dans la revue du code dans les chapitres suivants. Le watchdog timer est un mécanisme de sécurité qui permet de redémarrer automatiquement le microcontrôleur en cas de blocage ou de non-réponse du programme, ce qui contribue à la stabilité et à la fiabilité du système.

Il convient de noter qu'afin de garantir que tous les fichiers sont nommés de manière unique sans enregistrer de compteur dans la mémoire non volatile, nous avons utilisé le périphérique Real Time Clock (RTC) dans l'ESP32. Cela nous permet de nommer le fichier en utilisant l'ID du capteur ainsi que la date et l'heure d'acquisition des données. Cette approche garantit que chaque fichier a un nom unique en fonction du capteur et de l'instant précis de la capture des données.



The diagram shows a rectangular box with a folded top-right corner. Inside the box, the first line is the specific file name 'S0001\_23\_59\_59\_31\_12\_2023.txt'. The second line is the general template 'S####\_HH\_mm\_SS\_DD\_MM\_YYYY.txt', where the four hash symbols represent the sensor ID.

S0001\_23\_59\_59\_31\_12\_2023.txt

S####\_HH\_mm\_SS\_DD\_MM\_YYYY.txt

*Figure 44 Nom du fichier TXT*

#### 4.5.7 Sous-composant S1.2.1.4 – Connexion Wifi

L'ESP32-S3, dans ce sous-composant particulier, présente une approche simple et intégrée. Il tire parti des capacités Wifi internes de l'ESP32, qui comprend de manière pratique une antenne intégrée. Il est à noter que cette antenne intégrée sert à la fois aux fonctionnalités WiFi et Bluetooth, car les deux fonctionnent dans la bande de fréquence de 2,4 GHz.

Pour comprendre la procédure de connexion WiFi sur l'ESP32-S3, le schéma de flux suivant fournit une explication claire et structurée :

1. Initialisation du composant WiFi en se connectant à un point d'accès WiFi à proximité, qui est lui-même connecté à Internet. Cela se fait en utilisant les identifiants WiFi enregistrés dans la mémoire flash de l'ESP32.
2. Une fois connecté, l'ESP32 dispose maintenant d'une adresse IP.
3. Connexion au serveur FTP avec les identifiants appropriés.
4. Accès au répertoire souhaité sur le serveur FTP.
5. Téléchargement du fichier .txt vers le serveur FTP.

Cela résume le processus de connexion Wifi de l'ESP32-S3 et la manière dont il se connecte au serveur FTP pour télécharger le fichier .txt.

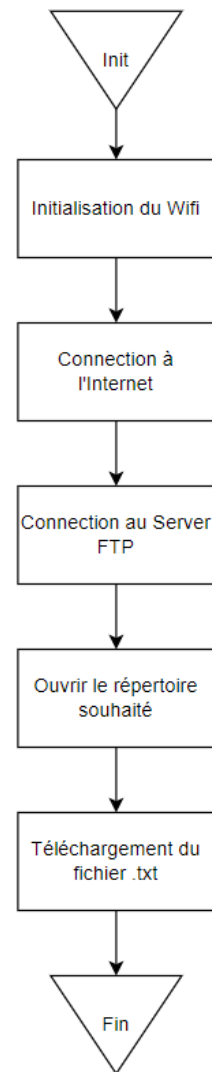


Figure 45 Procédure de connexion au serveur FTP

#### 4.5.8 S1.2.2 Système de fichiers cloud

Maintenant que nous disposons d'une passerelle IOT, nous avons besoin d'une zone de stockage cloud, où les fichiers de données .txt seront stockés. Le serveur peut s'exécuter localement sur l'hôte d'un client ou, dans notre cas, sur l'hôte ftp.iossco.com.

Le serveur FTP dispose d'un système de fichiers dans lequel nous pouvons créer différents répertoires pour différents capteurs et hubs en fonction de leurs numéros de série. L'architecture du système de répertoires de fichiers est présentée dans le schéma suivant :



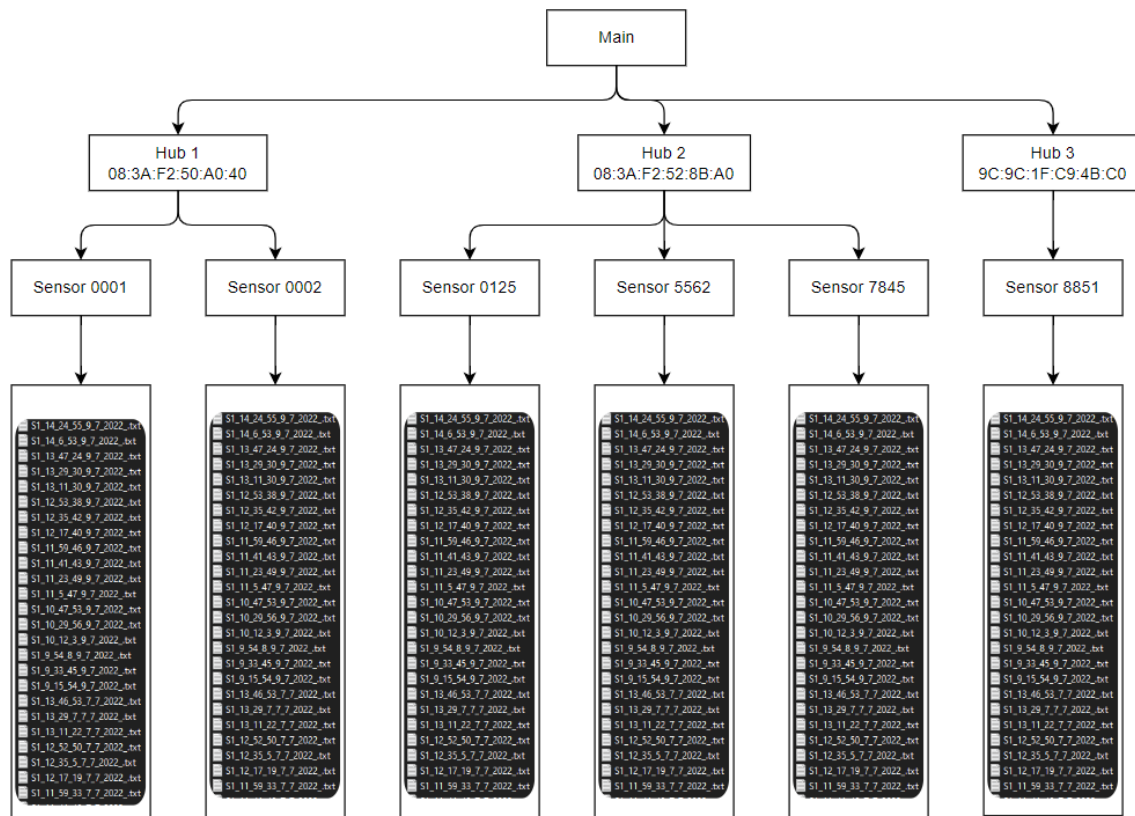


Figure 46 Représentation des répertoires du serveur FTP

Ainsi, chaque hub a son répertoire qui porte le nom de l'UUID Wifi de son appareil ESP32 respectif.

Et tous les capteurs connectés à ce hub ont des dossiers dans ce répertoire Hub. Ainsi, les données récupérées de chaque capteur sont téléchargées dans son répertoire respectif. Cette méthode est particulièrement utile pour organiser les fichiers plutôt que de simplement tout télécharger dans un seul répertoire principal. Mais la méthode que nous avons adoptée nous permet d'identifier le propriétaire/client de chaque capteur individuel.

Notons également que pour l'instant les répertoires FTP sont créés à l'aide d'un script Matlab, lors du menu de configuration client. Nous découvrirons cette procédure dans les sous-composants suivants.

Désormais, afin de contrôler les capteurs réels à distance, nous avons inclus un fichier de commandes cmd.txt dans lequel nous incluons plusieurs paramètres prédéfinis accessibles et modifiables par l'interface graphique, le backend et les hubs. Voici les différents paramètres du fichier cmd.txt :

Tableau 13 Parametres de command du fichier cmd.txt

| Paramètre | Description                                                  | Valeurs                 |
|-----------|--------------------------------------------------------------|-------------------------|
| A         | Commencer l'acquisition                                      | 1 = enable, 0 = disable |
| C         | Nombre de séquences d'acquisition effectuées si A est activé | 1 to 10 cycles          |
| D         | Nombre d'échantillons en 2^n                                 | 10 to 12 bits           |
| E         | Fréquence d'échantillonnage Axe basse fréquence en m KHz     | 1 to 4 KHz              |
| F         | Fréquence d'échantillonnage Axe haute fréquence en m KHz     | 5 to 50 KHz             |
| G         | Paramètre supplémentaire – non utilisé                       | N/A                     |
| H         | Sensor 1 ID                                                  | "0001" to "FFFF"        |
| I         | Sensor 2 ID                                                  | "0001" to "FFFF"        |
| J         | Sensor 3 ID                                                  | "0001" to "FFFF"        |
| K         | Sensor 4 ID                                                  | "0001" to "FFFF"        |
| L         | Sensor 5 ID                                                  | "0001" to "FFFF"        |

Then we have the SET.txt file that is configure for each client when the system is configured this file contains all the essential settings needed for the ESP32 to connect to wifi, and the FTP server.

Tableau 14 Parametres de configuration du fichier SET.txt

| Paramètre         | Valeur                                      | Description                    |
|-------------------|---------------------------------------------|--------------------------------|
| DEVICE_ID         | A4DA32677829                                | ID du IOT Gateway/ HUB         |
| FTP_SERVER        | <a href="ftp.ioSSCO.com">ftp.ioSSCO.com</a> | Host FTP                       |
| FTP_USER          | ioSSCO                                      | Nom de l'utilisateur FTP       |
| FTP_PASS          | iOss.H.2020%%                               | Mot de passe FTP               |
| WIFI_NAME         | IOSSWIFI                                    | Nom de l'utilisateur Wifi      |
| WIFI_PASS         | bay1984ba-11                                | Mot de passe Wifi              |
| DATA_FOLDER       | /public_ftp/sensordata/                     | Location du dossier du capteur |
| PING_FOLDER       | /public_ftp/sensordata/2432493/PING         | Location du fichier CMD        |
| PING_FILENAME     | cmd.txt                                     | Nom du fichier CMD             |
| SETTINGS_FOLDER   | /public_ftp/sensordata/2432493/SETTINGS     | Location du fichier SET        |
| SETTINGS_FILENAME | SET.TXT                                     | Nom du fichier SET             |
| LOOP_DELAY        | 200000                                      | Timeout en ms                  |

#### 4.6 S1.2.3 Base de Données

Afin de catégoriser les données du serveur FTP, une application backend codée en MATLAB récupère les fichiers téléchargés sur le serveur FTP. Elle les traite puis les stocke de manière catégorique dans différentes tables de la base de données SQL qui s'exécute sur l'hôte iossco.com.

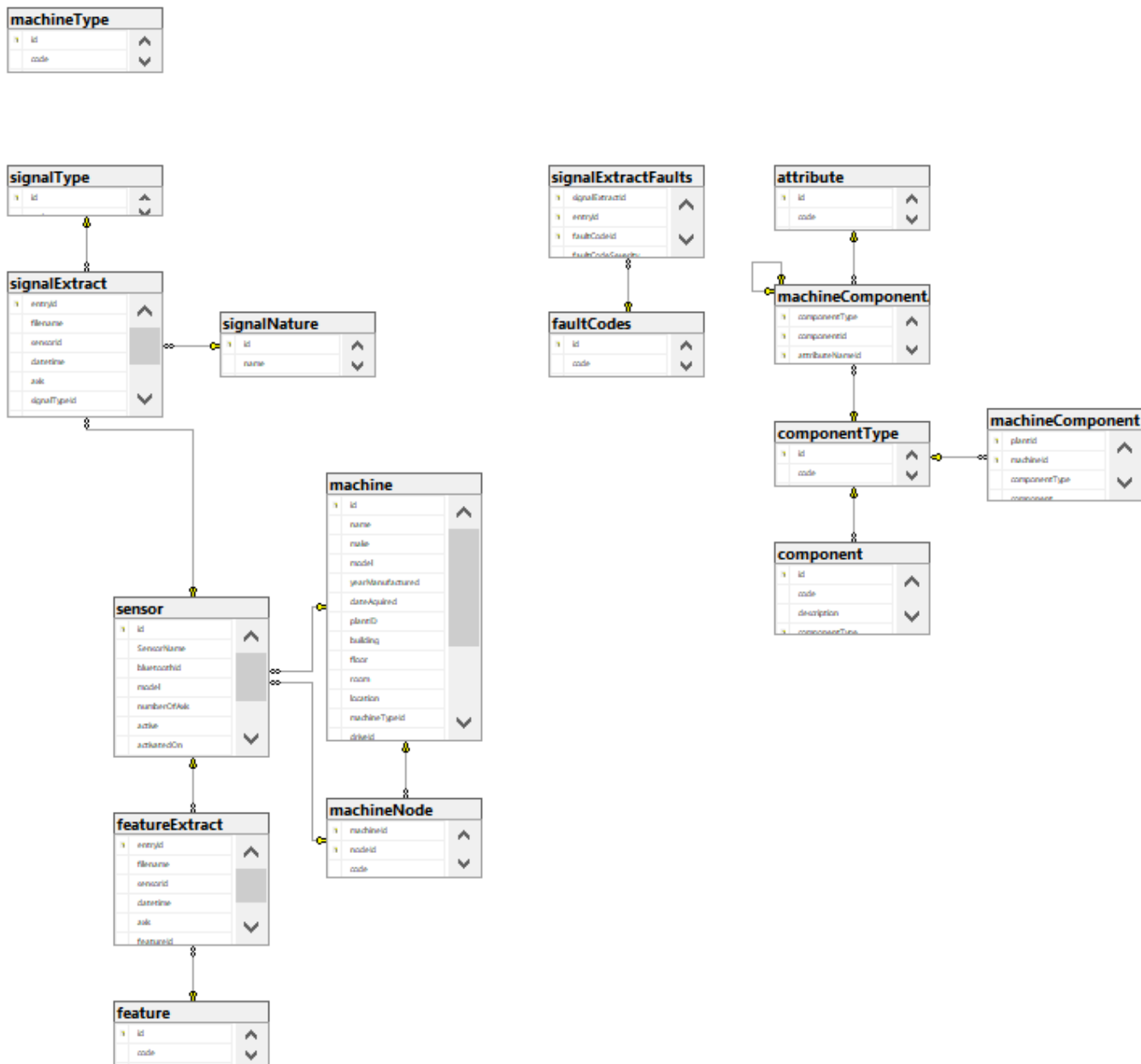


Figure 47 Base de données SQL

Les différentes tables qui seront mises à jour seront expliquées en détail dans la présentation logicielle des applications GUI (Interface Utilisateur Graphique) et Backend (Logiciel Backend) dans les chapitres suivants.

En ce qui concerne l'architecture globale du projet, il s'agit d'une architecture de base de données conçue à l'aide de MySQL et du SQL Server Management Studio (SSMS). Cette architecture de base de données joue

un rôle essentiel dans la gestion et l'organisation des données collectées à partir du serveur FTP, permettant une analyse ultérieure et un accès aux données de manière efficace.

Le développement de cette base de données SQL n'est pas inclus dans la portée de ce mémoire, c'est pourquoi nous n'entrerons pas dans les détails ici. Cependant, voici des explications succinctes sur les tables les plus notables de la base de données :

- Tables d'identification des machines clientes :
  - Sensor : Cette table stocke des informations sur les capteurs utilisés.
  - Machine : Elle contient des informations sur les machines.
  - Machine Node : Cette table est utilisée pour identifier les nœuds des machines.
  - Machine Type : Elle répertorie les types de machines.
  - Machine Component : Stocke des informations sur les composants des machines.
  - Attribute : Cette table contient des attributs liés aux machines.
  - Component type : Elle répertorie les types de composants de machines.
  - Machine component : Utilisée pour associer des composants spécifiques à des machines particulières.
  - Component : Contient des informations détaillées sur les composants.
- Stockage des données :
  - Signal extract: Cette table est utilisée pour stocker les extraits de signaux.
  - Signal type: Elle répertorie les types de signaux.
  - Signal nature: Contient des informations sur la nature des signaux.
- Caractéristiques calculées :
  - Caractéristique Extract: Stocke les extraits de caractéristiques calculées.
  - Caractéristique : Répertorie les caractéristiques calculées.
  - Signal Extract Faults: Utilisée pour stocker les extraits de signaux en cas de défauts.
  - Fault codes : Cette table contient des codes de défaut.

Ces tables permettent de structurer et d'organiser les données collectées à partir des capteurs et des machines, ainsi que les caractéristiques calculées à partir de ces données. Chaque table sert à stocker des informations spécifiques qui sont essentielles pour l'analyse et la gestion des données du système.

## **4.7 S1.3 - Traitement et analyse :**

### **4.7.1 S1.3.1 Logiciel de prétraitement backend**

Après que les données ont été transférées sur le serveur FTP, un logiciel backend doit fonctionner en continu pour télécharger les données depuis le serveur FTP, les trier et les traiter. Voici un schéma illustrant l'ensemble de la fonctionnalité haut de gamme de ce composant.

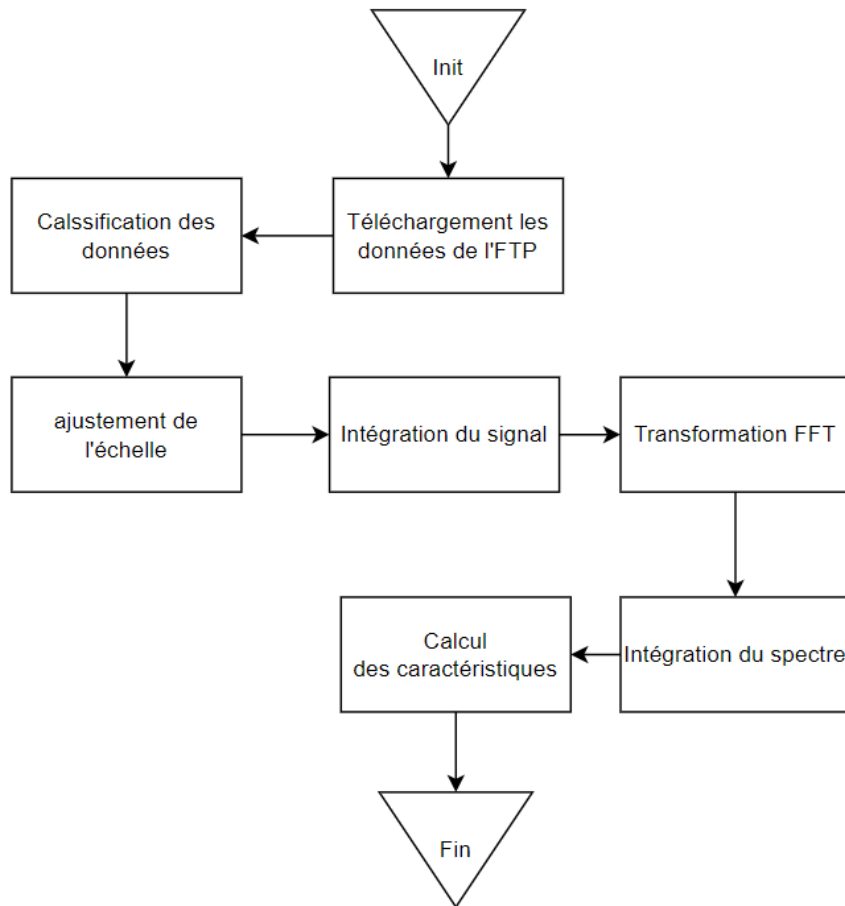


Figure 48 Organigramme du logiciel Backend

Le logiciel backend est développé en utilisant MATLAB. Le programme commence par télécharger le fichier de données brutes (.txt) en en créant une copie locale. Ensuite, les différents signaux sont triés dans quatre tableaux distincts. Les valeurs sont ensuite mises à l'échelle en utilisant des facteurs d'échelle prédéfinis pour chaque axe. Une fois cette opération effectuée, nous calculons les formes d'onde temporelles de la vitesse en intégrant les formes d'onde de l'accélération.

$$v[n] = v[n - 1] + a[n] * dt$$

Où :

- $v[n]$  est la vitesse à l'échantillon  $n$
- $v[n - 1]$  est la vitesse à l'échantillon précédent  $n - 1$
- $a[n]$  est l'accélération à l'échantillon  $n$
- $dt$  est la différence de temps entre les échantillons consécutifs, qui est l'inverse de la fréquence d'échantillonnage (c'est-à-dire,  $dt = 1 / fs$ , où  $fs$  est la fréquence d'échantillonnage).

Maintenant que nous disposons à la fois des formes d'onde d'accélération et de vitesse, nous pouvons transformer les signaux dans le domaine fréquentiel en utilisant la Transformée de Fourier Rapide (Fast Fourier Transform, FFT).

$$x[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi kn/N}$$

Une fois que les spectres d'accélération et de vitesse sont disponibles, les différents filtres nécessaires peuvent être appliqués, et ensuite, les différentes caractéristiques sont calculées pour la surveillance de l'état de la machine. Les valeurs de fréquence de coupure des différents filtres des caractéristiques sont définies à partir de la fiche technique de la machine et des composants de la machine. Ces valeurs sont configurées par le responsable de l'usine lors de la mise en place de leurs capteurs. Cette procédure est effectuée à l'aide d'une interface utilisateur graphique conçue pour cet usage, qui sera examinée en détail dans les composants à venir. Voici un résumé des différentes caractéristiques pour différents types de machines qui seront calculées :

Tableau 15 Caracteristiques calculé par le Backend

| FFT/Time | ID           | Direction | Description                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------|--------------|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FFT      | Overall      | H,V,A     | Spectrum overall (RMS, Velocity mm/sec)                                                                                                                                                                                                                 |
| FFT      | Sync         | H,V,A     | Overall of synchronous frequencies                                                                                                                                                                                                                      |
| FFT      | NonSync      | H,V,A     | Overall of nonsynchronous frequencies                                                                                                                                                                                                                   |
| FFT      | SubSync      | H,V,A     | Overall of sub synchronous                                                                                                                                                                                                                              |
| Time     | Crest Factor | H,V,A     | Crest Factor                                                                                                                                                                                                                                            |
| Time     | STD Dev.     | H,V,A     | Standard Deviation                                                                                                                                                                                                                                      |
| Time     | Skew         | H,V,A     | Skew                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Time     | Kurtosis     | H,V,A     | Kurtosis                                                                                                                                                                                                                                                |
| Time     | +peak        | H,V,A     | +peak                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Time     | -peak        | H,V,A     | -peak                                                                                                                                                                                                                                                   |
| Time     | RMS          | H,V,A     | RMS                                                                                                                                                                                                                                                     |
| FFT      | 1X           | H,V,A     | Fréquence fondamentale généralement lié à la vitesse de fonctionnement de la machine (si la vitesse de rotation de la machine est de 1485 tr/min alors 1X sera à 1485 CPM), toutes les autres fréquences seront liées à cela et l'ordre sera normalisé. |
| FFT      | 2X           | H,V,A     | Seconde harmonique                                                                                                                                                                                                                                      |
| FFT      | 3X           | H,V,A     | Troisième harmonique                                                                                                                                                                                                                                    |
| FFT      | 4X           | H         | Quatrième harmonique                                                                                                                                                                                                                                    |
| FFT      | 5X           | H         | Cinquième harmonique                                                                                                                                                                                                                                    |
| FFT      | 6X           | H         | Sixième harmonique                                                                                                                                                                                                                                      |
| FFT      | 7X           | H         | Septième harmonique                                                                                                                                                                                                                                     |
| FFT      | 8X           | H         | Huitième harmonique                                                                                                                                                                                                                                     |
| FFT      | 9X           | H         | Neuvième harmonique                                                                                                                                                                                                                                     |
| FFT      | 10X          | H         | Dixième harmonique                                                                                                                                                                                                                                      |

Il convient de noter que toutes les caractéristiques ne sont pas calculées pour toutes les machines. Par exemple, une boîte de vitesses ne peut pas avoir physiquement un défaut d'équilibrage, c'est pourquoi ce défaut est exclu lors du calcul.

Tableau 16 Défauts possible des différents machines

| Problem description                              | Fan | Pump | Motor | Comp. | GB. |
|--------------------------------------------------|-----|------|-------|-------|-----|
| Bearing defect                                   | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | xxx |
| Bearing lubrication                              | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | xxx |
| Imbalance                                        | xxx | x    | x     | o     | o   |
| Misalignment                                     | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | xx  |
| Misalignment severe                              | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | xx  |
| Looseness (Structural)                           | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | x   |
| Looseness (Rotating)                             | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | x   |
| Soft foot                                        | o   | o    | xxx   | o     | o   |
| Turbulence                                       | xxx | xxx  | o     | x     | o   |
| Cavitation                                       | o   | xxx  | o     | x     | o   |
| Eccentricity                                     | x   | x    | x     | x     | o   |
| Bent shaft                                       | xxx | x    | x     | x     | o   |
| Resonance                                        | xxx | xxx  | xxx   | xxx   | xx  |
| Belt wear - only belt driven machines            | xxx | o    | xxx   | xx    | o   |
| Blade/vane pass                                  | xxx | xxx  | o     | xx    | o   |
| Gear tooth wear                                  | o   | o    | o     | o     | xxx |
| Gear eccentricity & Backlash                     | o   | o    | o     | o     | xxx |
| Gear misalignment                                | o   | o    | o     | o     | xxx |
| Gear cracked or broken tooth                     | o   | o    | o     | o     | xxx |
| Broken/cracked rotor bars                        | o   | o    | xxx   | o     | o   |
| Eccentric rotor                                  | o   | o    | xxx   | o     | o   |
| Eccentric stator, soft foot, shorted laminations | o   | o    | xxx   | o     | o   |

Dans le tableau ci-dessus, la description de l'importance de chaque défaut par type de machine est fournie. Étant donné que certains des filtres utilisés pour détecter les défauts sont similaires entre les défauts, le défaut détecté qui est le plus probable est choisi comme le défaut probable le plus élevé.

#### 4.8 S1.3.2 Logiciel d'enregistrement de données

Les bases de données jouent un rôle crucial dans la gestion et l'organisation des informations au sein de diverses applications et systèmes. Elles servent de référentiel structuré pour stocker, récupérer et gérer de vastes quantités de données. L'utilisation des bases de données est fondamentale pour le bon fonctionnement efficace des systèmes modernes axés sur les données, et leur importance ne peut être surestimée.

L'une des raisons principales pour lesquelles nous utilisons des bases de données est de maintenir un stockage structuré et organisé pour les résultats de traitements de données complexes et de calculs. Dans un flux de travail typique, une fois que toutes les caractéristiques et signaux ont été soigneusement traités et calculés, l'étape suivante consiste à persister ces précieuses données pour un accès futur, une analyse et une

référence. Ce besoin de stockage est satisfait par les bases de données, qui veillent à ce que les informations restent facilement accessibles et structurées de manière efficace.

Dans le contexte décrit, la base de données utilisée est une base de données SQL (Structured Query Language), qui est un système de gestion de bases de données relationnelles puissant et largement adopté. Les bases de données SQL offrent une manière structurée et normalisée de stocker et de gérer des données, ce qui en fait le choix privilégié pour de nombreuses applications.

Pour interagir avec cette base de données SQL, nous utilisons l'application de base de données MATLAB, qui nous permet de créer et d'exécuter des requêtes SQL. Ces requêtes servent de moyen pour accéder, récupérer et mettre à jour les données stockées dans les différentes tables de la base de données. En utilisant les capacités de MATLAB pour l'interaction avec la base de données, nous pouvons gérer et manipuler efficacement les données, ce qui est particulièrement important lors de la manipulation de jeux de données volumineux et complexes.

The screenshot shows the MATLAB Database Explorer window. At the top, the 'JOIN' tab is active, showing a configuration for an INNER JOIN between 'inventorytable' and 'producttable' on the 'productnumber' column. Below this, the 'Database Browser' on the left lists various system tables, with 'inventorytable' selected. The 'SQL Query' editor in the center contains the following query:

```
SELECT inventorytable.productnumber,
       inventorytable.quantity,
       inventorytable.price,
       inventorytable.inventorydate
FROM ( inventorytable
INNER JOIN producttable
ON inventorytable.productnumber = producttable.productnumber)
```

Below the query editor, the 'Data Preview (First 10 Rows)' table is displayed:

| productnumber | quantity | price   | inventorydate       |
|---------------|----------|---------|---------------------|
| 9             | 2339     | 13      | 2011-02-09 12:50:59 |
| 8             | 8350     | 5       | 2011-06-18 11:45:35 |
| 7             | 6034     | 16      | 2014-08-06 08:38:00 |
| 2             | 1200     | 9       | 2014-07-08 22:50:45 |
| 4             | 2580     | 21      | 2013-06-08 14:24:33 |
| 1             | 1700     | 14.5000 | 2014-09-23 09:38:34 |
| 5             | 9000     | 3       | 2012-09-14 15:00:25 |
| 6             | 4540     | 8       | 2013-12-25 19:45:00 |
| 3             | 356      | 17      | 2014-05-14 07:14:28 |
| 10            | 723      | 24      | 2012-03-14 13:13:09 |

On the right, the 'Join Diagram' shows two green squares representing 'inventorytable' and 'producttable' connected by a blue line labeled 'INNER JOIN'.

Figure 49 App Database du logiciel MATLAB R2021

En résumé, les bases de données sont utilisées pour fournir un stockage structuré et une gestion efficace des données traitées, garantissant que les informations sont facilement accessibles et organisées pour divers besoins d'analyse, de génération de rapports et d'applications. Les bases de données SQL, telles que celle utilisée ici, offrent une manière normalisée et puissante de gérer les données, et des outils comme



l'application de base de données MATLAB facilitent l'interaction avec ces bases de données, permettant une manipulation et une récupération de données fluides.

## 4.9 S1.4 - Interface utilisateur :

### 4.9.1 S1.4.1 Système de fichiers local

Nous voici à présent dans le dernier sous-système, l'interface utilisateur graphique. Cette interface utilisateur graphique remplit deux objectifs principaux :

#### 1. Configuration des Machines :

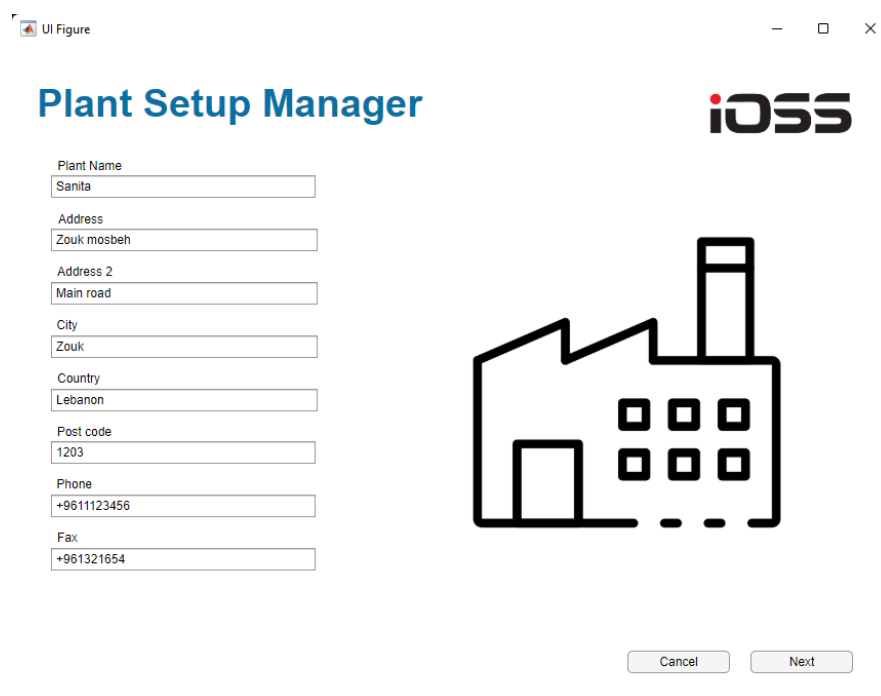
Lorsque le client achète de nouveaux capteurs et concentrateurs, il doit les configurer sur les machines désirées. Cette étape implique l'enregistrement d'informations techniques et commerciales. Cela englobe divers éléments, tels que l'emplacement des capteurs, les composants des machines et divers paramètres liés à leur fonctionnement. En somme, c'est une étape où des données complètes sur l'équipement et son déploiement sont consignées.

#### 2. Outil d'Analyse de Données :

Une fois que le système est opérationnel et que les machines sont configurées, l'interface utilisateur graphique fait également office d'outil puissant d'analyse de données. Cet outil offre aux ingénieurs un contrôle total sur les données de la machine. Plusieurs outils d'analyse sophistiqués ont été intégrés dans l'interface, dans le but d'aider les ingénieurs à effectuer des analyses spectrales et à obtenir des informations approfondies sur les performances de la machine. Ces outils sont essentiels pour comprendre et optimiser la fonctionnalité de la machine, ainsi que pour diagnostiquer d'éventuels problèmes. La fonctionnalité d'analyse des données au sein de l'interface propose un large éventail de capacités, permettant aux ingénieurs d'extraire des informations significatives des données collectées, facilitant la prise de décisions et garantissant le fonctionnement efficace de l'équipement.

### 4.9.2 S1.4.2 Interface graphique d'analyse

Nous sommes à présent dans le dernier sous-système, l'interface utilisateur graphique. Cette interface a deux objectifs principaux :



#### 4.9.2.1 Configuration des machines :

Lorsqu'un client achète de nouveaux capteurs et concentrateurs, il est nécessaire de les configurer sur les machines souhaitées. Par conséquent, à cette étape, diverses informations techniques et commerciales doivent être enregistrées. Cela englobe des détails tels que l'emplacement des capteurs, les composants des machines et les paramètres associés.

Dans le menu de Gestion de Configuration des Usines, l'utilisateur a la possibilité de créer une nouvelle usine ou installation et d'entrer des informations générales essentielles à son sujet. Ces informations comprennent des détails tels que le nom de l'usine, l'adresse, la localisation géographique et les numéros de téléphone de contact associés à l'usine.

UI Figure

— □ ×

## Machine Setup Manager

The screenshot displays the 'Machine Setup Manager' application window. At the top, there is a horizontal tab bar with the following tabs: 'Info', 'Setup', 'Drivetrain', 'Fans', 'Pumps', 'Compressors', 'Gearboxes', and 'Others'. The 'Info' tab is currently selected. Below the tab bar, the main content area is titled 'Machine information'. It contains several input fields and dropdown menus arranged in two columns. The left column includes fields for 'Machine Name', 'Make', 'Model', 'Year Manufactured', 'Buildin' (with a note 'Figure 50 Page de configuration de l'usine'), and 'Floor'. The right column includes a 'Date Acquired' dropdown (with a date format 'mm/dd/yyyy'), a 'Plant ID' dropdown (showing '123'), a 'Room' field, and a 'Location' field. To the right of these fields is a large circular icon containing a stylized human figure. In the bottom right corner of the main content area is the 'iOSS' logo. At the very bottom of the window, there are two buttons: 'Cancel' and 'Apply'.

Figure 51 Page de configuration des informations du machine

Une fois que l'usine est configurée, l'utilisateur peut créer des machines à l'aide du Gestionnaire de Configuration des Machines. Ce menu est divisé en plusieurs onglets.

Dans le premier onglet, l'utilisateur entre des informations de base sur la machine, telles que le nom de la machine, le modèle, la date d'acquisition, etc. De plus, il sélectionne dans quelle usine il souhaite enregistrer cette machine. Cela se fait en choisissant l'ID de l'usine souhaitée à partir d'une liste d'usines précédemment créées qui sont extraites de la base de données.

## Machine Setup Manager

**Machine Setup**

Drivetrain  
Motor AC induction No VFD Add

Pumps  
Pump-Coupling-overhung Add

Compressor  
Compressor screw Add

Fans  
Fan-Coupling-overhung Add

Gear Box  
Gearbox 2 (Input INT Output) Add

Other  
Cylinder Add

iOSS

Cancel Apply

Figure 52 Page de configuration des différents composants mécaniques du machine

Étant donné que toutes les machines sont uniques, avec une combinaison unique de composants et de pièces de machine, l'utilisateur a besoin d'une interface pour configurer sa machine personnalisée. Une machine se compose généralement d'une chaîne cinématique associée à une pompe, un compresseur, un ventilateur, un engrenage ou d'autres composants. Certaines machines peuvent même comporter plusieurs de ces composants dans la même instance.

Dans l'onglet suivant, par exemple, l'utilisateur peut sélectionner la chaîne cinématique ajoutée et entrer les différents paramètres techniques et caractéristiques de ce composant particulier. Ces paramètres incluent les tours par minute (RPM), les fréquences naturelles des paliers, le nombre de fentes, la puissance, et d'autres caractéristiques pertinentes.

## Machine Setup Manager

**Drivetrain**

Option 1

RPM  B1#

HP  BPF11

Frame  BPF02

Poles  B2#

Slots  BPF12

Pulley Diameter  BPF02

**iOSS**

Save Cancel Apply

Figure 53 Page des paramètres du moteur

Un autre exemple se trouve dans l'onglet des Boîtes de Vitesses, où l'utilisateur peut ajouter les valeurs de tours par minute (RPM) d'entrée et de sortie, les différentes fréquences de maillage des engrenages, les nombres de dents, ainsi que les paramètres des paliers. Toutes ces informations sont enregistrées dans la base de données lorsque l'utilisateur clique sur le bouton "Enregistrer". Ce bouton déclenche une fonction de rappel

(callback) qui exécute une requête spécifique, lui permettant ainsi d'accéder à la base de données SQL et d'y écrire les données.

## Machine Setup Manager

**Gearboxes**

Option 1

Input RPM  B1#  GM1

Output RPM  BPF11  GMF1

SN  BPF01  GM1#

Ratio  B2#  GM2

Lubricant  BPF12  GMF2

Torque  BPF02  GM2#

**iOSS**

Save Cancel Apply

Figure 54 Page des paramètres du boîte à engrainage

## Sensor Setup Manager



Sensor Name

Serial Number

Bluetooth ID

Model  
AiSense V1 ▼

Number of Axis  
1 ▼

Machine ID  
None ▼

Machine part  
Drive ▼

Node #  
None ▼

Do you want to activate this sensor?  
Yes I want to use it right away. ▼



Cancel

Apply

Figure 55 Page de configuration du capteur

Enfin, la configuration du capteur acheté par le client. Ici, chaque capteur est associé à un numéro de série et à un identifiant unique Bluetooth UUID. Plus important encore, l'utilisateur peut enregistrer et placer le capteur dans un emplacement spécifique en sélectionnant l'ID de la machine, la pièce de la machine et le numéro du nœud à partir de menus déroulants affichant des listes des machines et des composants précédemment enregistrés dans la base de données.

#### 4.9.2.2 Outil d'Analyse de Données :

Une fois que le système est opérationnel et que les machines sont configurées, l'interface utilisateur graphique fait également office d'outil puissant d'analyse de données. Cet outil offre aux ingénieurs un contrôle total sur les données de la machine. Plusieurs outils d'analyse sophistiqués ont été intégrés dans l'interface, dans le but d'aider les ingénieurs à effectuer des analyses spectrales et à obtenir des informations approfondies sur les performances de la machine. Ces outils sont essentiels pour comprendre et optimiser la fonctionnalité de la machine, ainsi que pour diagnostiquer d'éventuels problèmes. La fonctionnalité d'analyse des données au sein de l'interface propose un large éventail de capacités, permettant aux ingénieurs d'extraire des informations significatives des données collectées, facilitant la prise de décisions et garantissant le fonctionnement efficace de l'équipement.

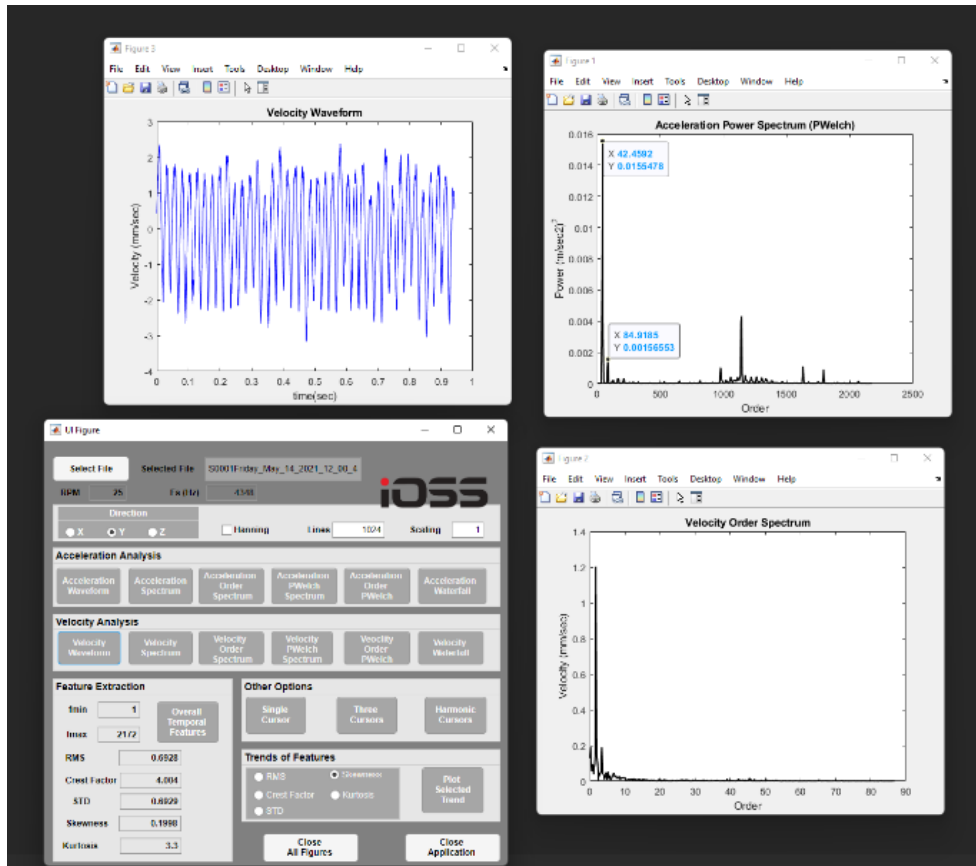


Figure 56 Interface d'analyse vibratoire du GUI

Dans l'image suivante, nous pouvons voir une représentation parfaite de l'environnement de développement dans lequel l'ingénieur peut travailler. Dans la figure, l'ingénieur a sélectionné un fichier spécifique à partir de la base de données et a ouvert trois fenêtres. Il y a un graphique de la forme d'onde de la vitesse, le spectre de puissance de l'accélération, et le spectre de l'ordre de la vitesse.

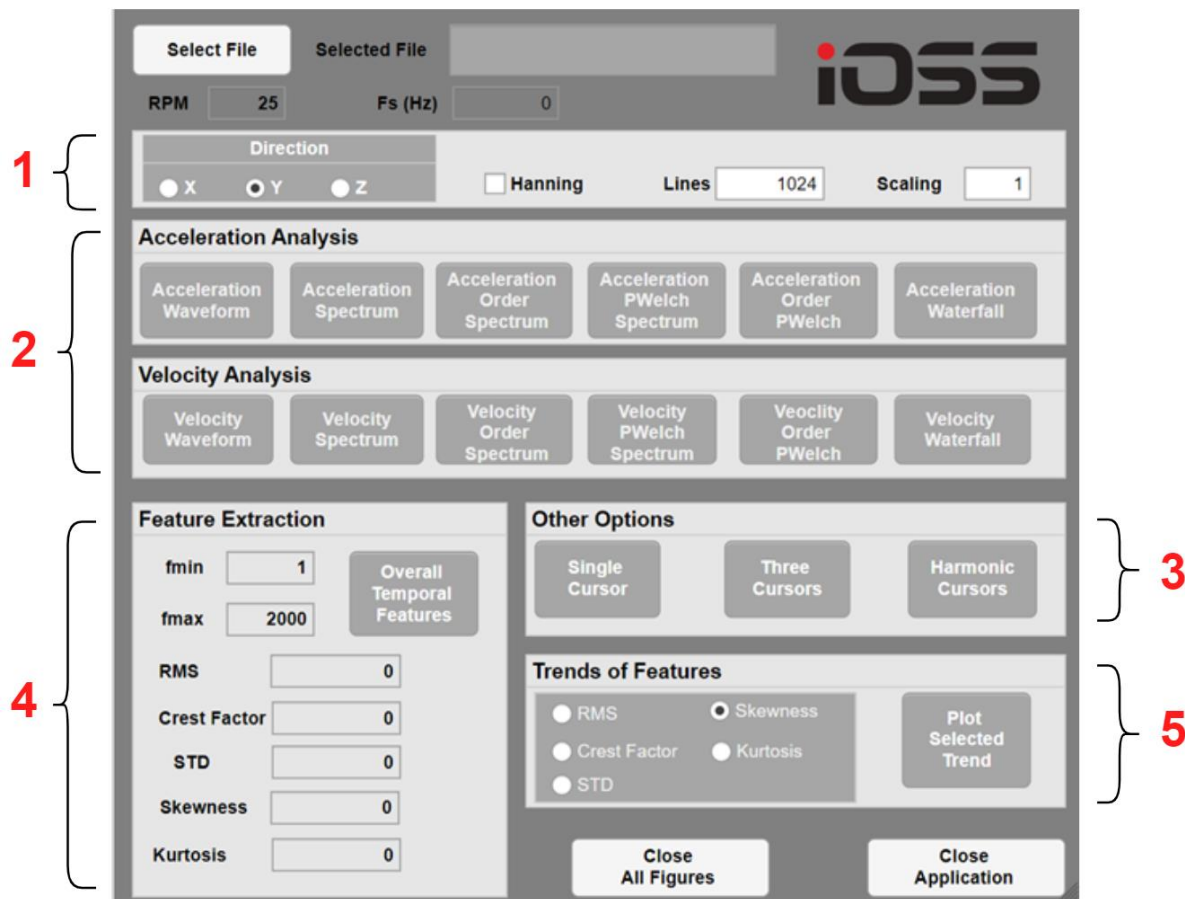


Figure 57 Les différents outils d'analyse

1. Propriétés de la donnée traitée
  - a. Sélectionner la Direction de lecture, tel que :
    - i. X pour la direction axiale
    - ii. Y pour la direction verticale
    - iii. Z pour la direction horizontale
  - b. Bouton pour appliquer un filtre Hanning.
  - c. Spécifier le nombre de lignes spectrale.
  - d. Spécifier le facteur de scaling.
2. Analyse du signal d'accélération :
  - a. Signal accélération le domaine temporel

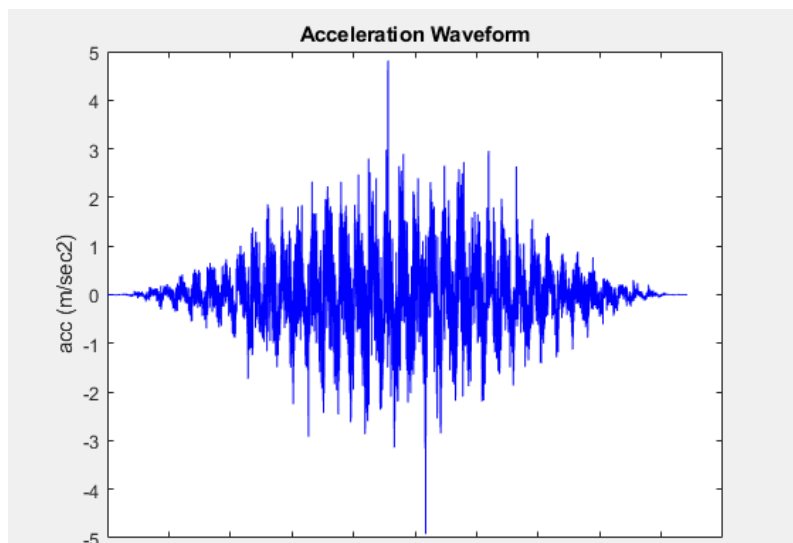
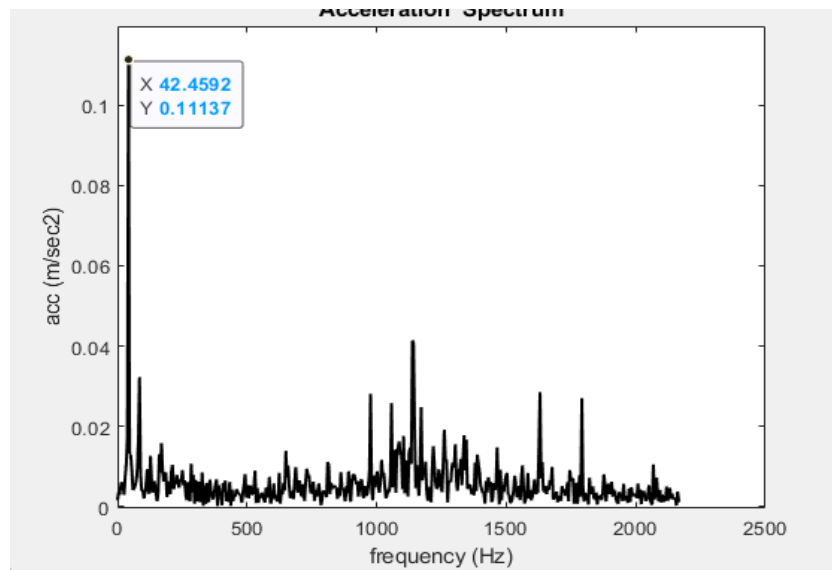


Figure 58 Analyse d'un signal d'accélération vibratoire

dans

- b. Spectre d'accélération du FFT du signal au domaine fréquentiel.

Figure 59 Analyse d'un spectre d'accélération vibratoire



- c. Spectre de la FFT du signal au domaine ordinal.
- d. Spectre avec un filtre Pwelche appliquée, au domaine fréquentiel.

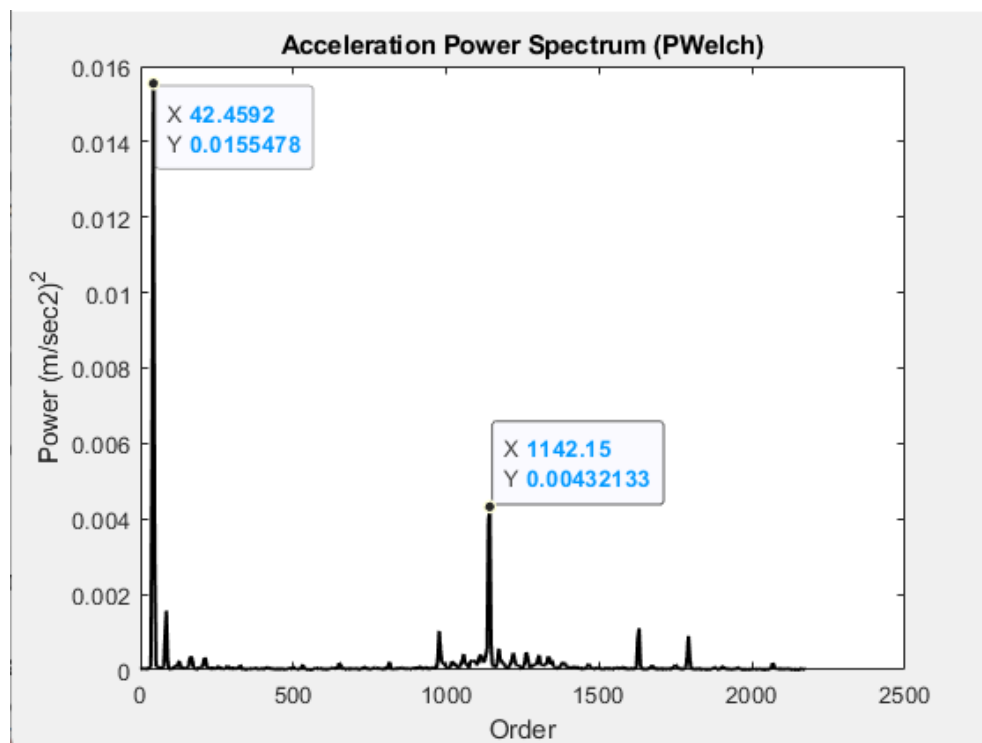


Figure 60 Spectre d'accélération avec le filtre digital pwelche

- e. Spectre avec un filtre Pwelche appliquée, au domaine ordinal.
- f. Spectres d'accélérations *Waterfall*.



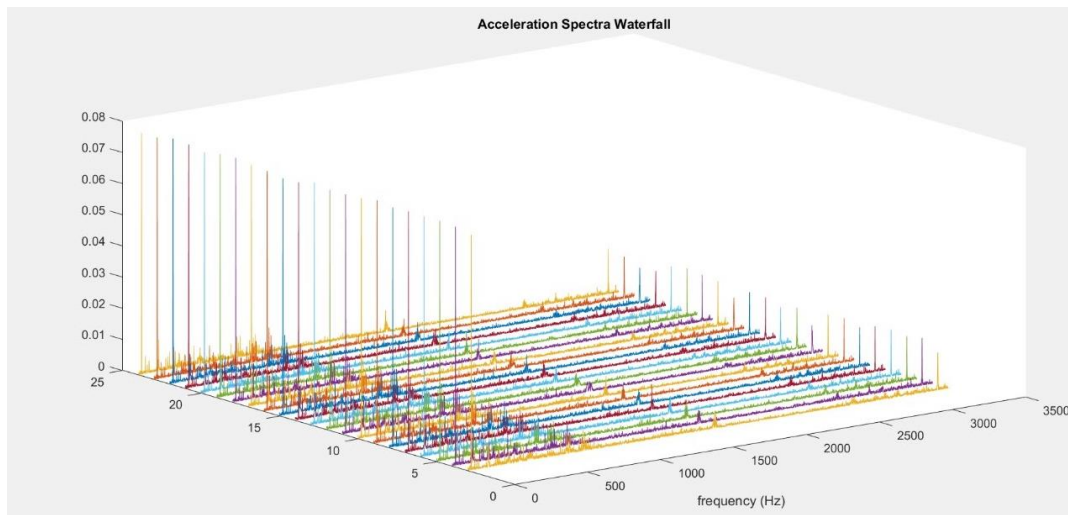


Figure 61 Graphe Waterfall

Analyse du signal de vitesse.

- g. Signal accélération dans le domaine temporel
  - h. Spectre d'accélération du FFT du signal au domaine fréquentiel.
  - i. Spectre de la FFT du signal au domaine ordinal.
  - j. Spectre avec un filtre Pwelche appliquée, au domaine fréquentiel.
  - k. Spectre avec un filtre Pwelche appliquée, au domaine ordinal.
  - l. Spectres de vitesses *Waterfall*.
3. Autre options :
- a. Curseur.
  - b. Triple curseur.
  - c. Curseur Harmonique.

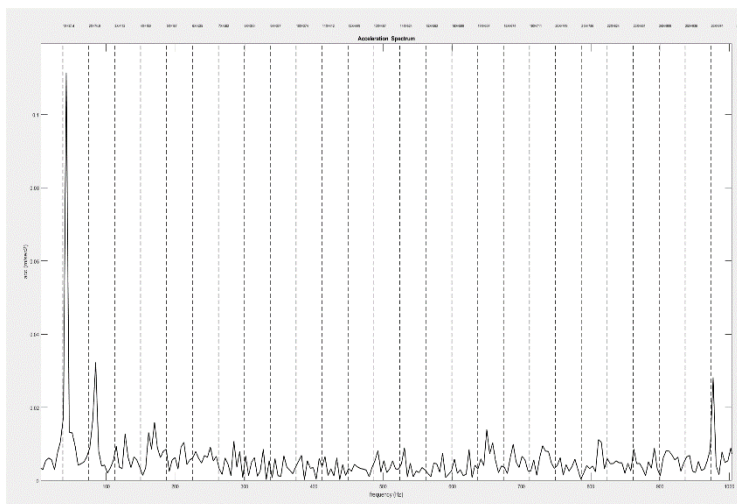


Figure 63 outil du curseur harmonique

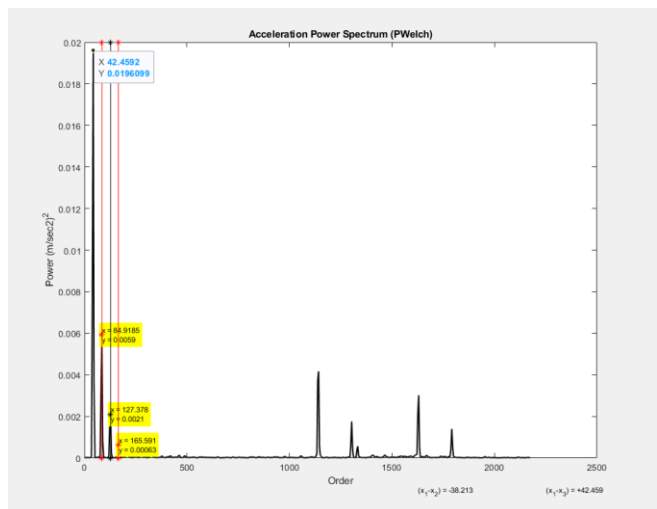
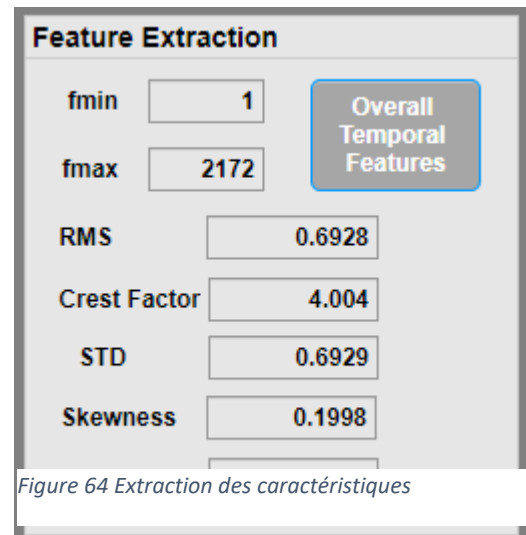


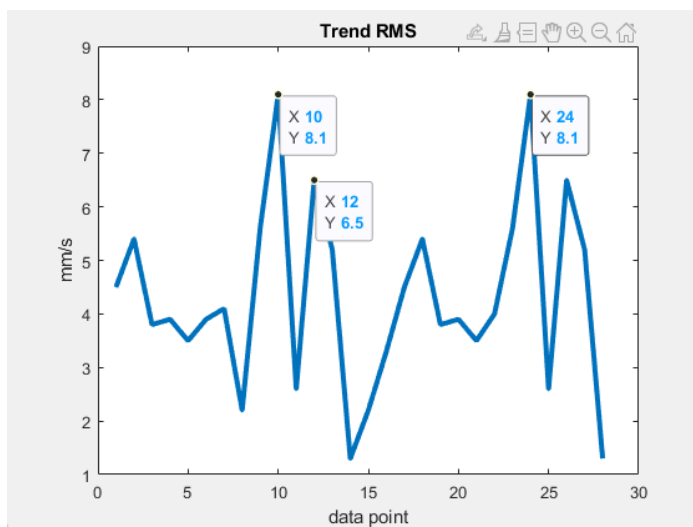
Figure 62 Outil des curseurs

4. Calcul des *caractéristiques* temporelles :
  - a. Fmin et fmax sont ajustable par l'utilisateur, ceci détermine l'intervalle sur lequel le calcul aura lieu.
  - b. RMS – Moyenne Quadratique.
  - c. Facteur de crête.
  - d. Ecart type.
  - e. Coefficient d'asymétrie.
  - f. Coefficient d'aplatissement.



5. Tendance historique de la caractéristique.

Dans ce figure l'utilisateur peut sélectionner la caractéristique qu'il veut tracer. Tous les point de la caractéristique sélectionné sont tracé dans un graph de tendance.



En conclusion, ce chapitre s'est concentré sur une exploration approfondie de la décomposition technique de chaque composant, tant au niveau architectural qu'au niveau du développement. À travers cette analyse, nous avons mis en lumière toutes les décisions d'ingénierie et les approches scientifiques qui ont été prises tout au long du processus de développement, que ce soit dans le domaine logiciel, matériel ou mécanique.

Cette plongée profonde dans les aspects techniques nous a permis de dévoiler la complexité des choix et des décisions qui sous-tendent la réalisation de chaque composant. Comprendre ces détails techniques est essentiel pour appréhender pleinement le fonctionnement et les performances du système dans son ensemble.

En fin de compte, ce chapitre jette les bases nécessaires pour une compréhension approfondie du développement du projet, en mettant en évidence la rigueur scientifique et l'expertise technique qui ont contribué à sa création. Il offre un aperçu précieux des défis rencontrés et des solutions mises en œuvre, préparant ainsi le terrain pour une exploration plus approfondie des résultats et des avantages de ce travail d'ingénierie et de développement.

## Chapitre 5. Conception Hardware

Dans ce chapitre, nous examinerons les différentes méthodes utilisées pour concevoir et développer le hardware. Cela comprend la conception des circuits imprimés, le prototypage des circuits imprimés, la commande auprès des fabricants.

Un bref résumé sera également donné sur la conception mécanique, et les différents prototypes fait en 3D printing et le fraisage CNC.

### 5.1 Conception du circuit imprimé du capteur

On a réalisé la conception des PCB à l'aide du logiciel de CAO Proteus 8. Voici la dernière version du circuit du capteur :

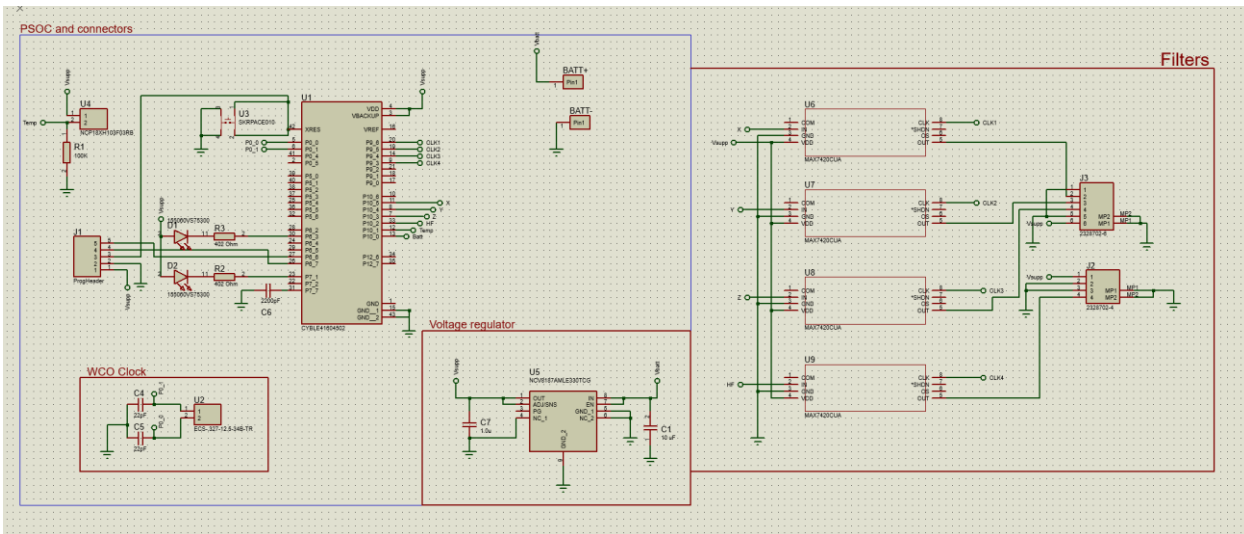


Figure 66 Circuit du capteur

En plus, durant la conception du PCB on a suivi les recommandations du fabricant, à partir des documents de conceptions Hardware offert par Cypress.

De plus, On a la liste de composants (BOM) suivante, avec le coût total d'une seule PCB sans les accéléromètres.

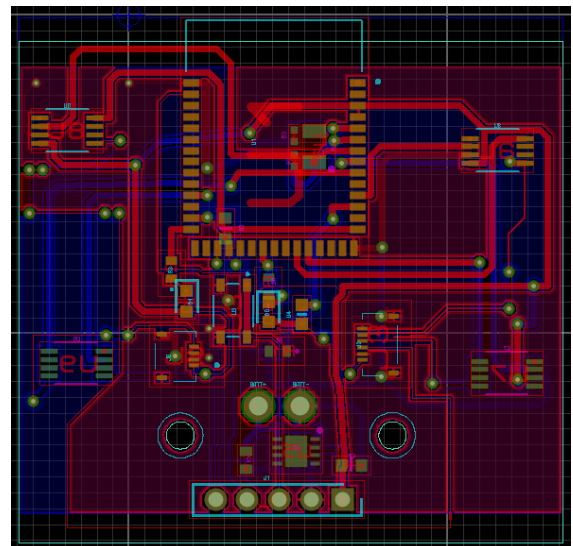


Figure 67 PCB du capteur

Tableau 17 Liste de composants du capteur

|                     |          |             |                      |                                      |           | Totals              |           |                |
|---------------------|----------|-------------|----------------------|--------------------------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------|
| Category            | Quantity | References  | Value                | Stock Code                           | Unit Cost | Category            | Quantity  | Unit Cost      |
| Capacitors          | 1        | C1          | 10 uF                | <a href="#">80-C0603C106M8PACTU</a>  | \$0.26    | Modules             | 0         | \$0.00         |
| Capacitors          | 2        | C4-C5       | 22pF                 | <a href="#">80-C0402C220J5GAUTO</a>  | \$0.04    | Capacitors          | 5         | \$0.55         |
| Capacitors          | 1        | C6          | 2200pF               | <a href="#">80-C0603C222K5HAUTO</a>  | \$0.15    | Resistors           | 3         | \$0.97         |
| Capacitors          | 1        | C7          | 1.0u                 | <a href="#">80-C0603C105K8PLR</a>    | \$0.06    | Integrated Circuits | 9         | \$55.29        |
| Resistors           | 1        | R1          | 100K                 | <a href="#">71-TNPW0603100KBEEA</a>  | \$0.38    | Transistors         | 0         | \$0.00         |
| Resistors           | 2        | R2-R3       | 402 Ohm              | <a href="#">667-ERA-3AEB4020V</a>    | \$0.30    | Diodes              | 2         | \$0.64         |
| Integrated Circuits | 1        | U1          | CYBLE41604502        | <a href="#">727-CYBLE-416045-02</a>  | \$12.31   | Miscellaneous       | 5         | \$1.19         |
| Integrated Circuits | 1        | U2          | ECS-.327-12.5-34B-TR | <a href="#">520-327-12.5-34B</a>     | \$0.66    | <b>Total</b>        | <b>24</b> | <b>\$58.65</b> |
| Integrated Circuits | 1        | U3          | SKRSPACE010          | <a href="#">688-SKRSPACE010</a>      | \$0.29    |                     |           |                |
| Integrated Circuits | 1        | U4          | NCP18XH103F03RB      | <a href="#">81-NCP18XH103F03RB</a>   | \$0.21    |                     |           |                |
| Integrated Circuits | 1        | U5          | NCV8187AMLE330TCG    | <a href="#">863-CV8187AMLE330TCG</a> | \$0.69    |                     |           |                |
| Integrated Circuits | 4        | U6-U9       | MAX7420CUA           | <a href="#">MAX7420EUA+</a>          | \$10.28   |                     |           |                |
| Diodes              | 2        | D1-D2       | 155060VS75300        | <a href="#">710-155060VS75300</a>    | \$0.32    |                     |           |                |
| Miscellaneous       | 2        | BATT+,BATT- |                      |                                      |           |                     |           |                |
| Miscellaneous       | 1        | J1          | ProgHeader           | <a href="#">855-M20-7820546</a>      | \$0.84    |                     |           |                |
| Miscellaneous       | 1        | J2          | 2328702-4            | <a href="#">571-2328702-4</a>        | \$0.17    |                     |           |                |
| Miscellaneous       | 1        | J3          | 2328702-6            | <a href="#">571-2328702-6</a>        | \$0.18    |                     |           |                |

## 5.2 Conception de cartes accéléromètres

Les accéléromètres ont été conçus en utilisant les recommandations de conception données par la documentation des appareils analogiques. Ainsi, en suivant ces recommandations, et en connectant en plus les deux cartes au PCB du capteur principal via deux connecteurs de câble plat.

Nous obtenons les schémas suivants, pour l'accéléromètre haute fréquence, ainsi que son liste de composants :

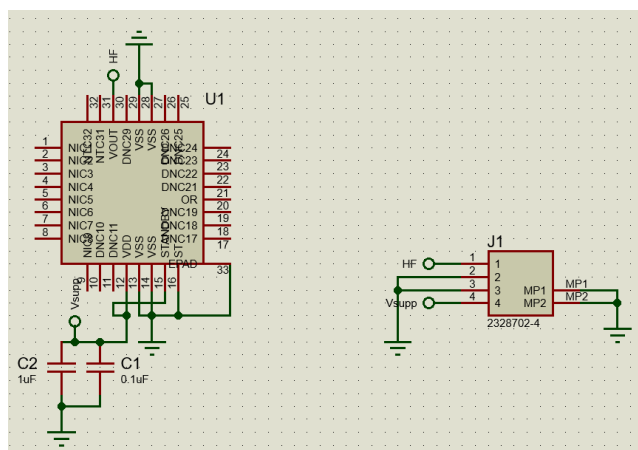


Figure 69 Circuit du ADXL 1005

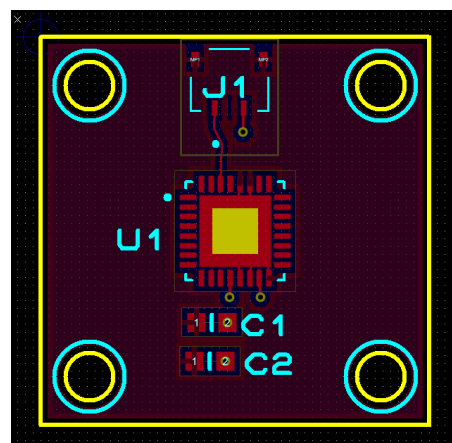


Figure 68 PCB du ADXL 1005

Tableau 18 Liste de composant de l'ADXL 1005

| Category            | Quantity | References | Value     | Stock Code                                                | Unit Cost | Category            | Quantity | Unit Cost    |
|---------------------|----------|------------|-----------|-----------------------------------------------------------|-----------|---------------------|----------|--------------|
| Capacitors          | 1        | C1         | 0.1uF     | <a href="#">810-C0603X5R1E104KBB</a>                      | \$0.05    | Modules             | 0        | \$0.00       |
| Capacitors          | 1        | C2         | 1uF       | <a href="#">810-C1608X7R1E105KAE</a>                      | \$0.12    | Capacitors          | 2        | \$0.17       |
| Integrated Circuits | 1        | U1         |           | <a href="https://www.mouser.de">https://www.mouser.de</a> | 63.20     | Resistors           | 0        | \$0.00       |
| Miscellaneous       | 1        | J1         | 2328702-4 | <a href="#">571-2328702-4</a>                             | \$0.17    | Integrated Circuits | 1        | 63.20        |
|                     |          |            |           |                                                           |           | Transistors         | 0        | \$0.00       |
|                     |          |            |           |                                                           |           | Diodes              | 0        | \$0.00       |
|                     |          |            |           |                                                           |           | Miscellaneous       | 1        | \$0.17       |
|                     |          |            |           |                                                           |           | <b>Total</b>        | <b>4</b> | <b>63.54</b> |

Et voici le schéma, le PCB et le liste de composants de l'accéléromètre basse fréquence :

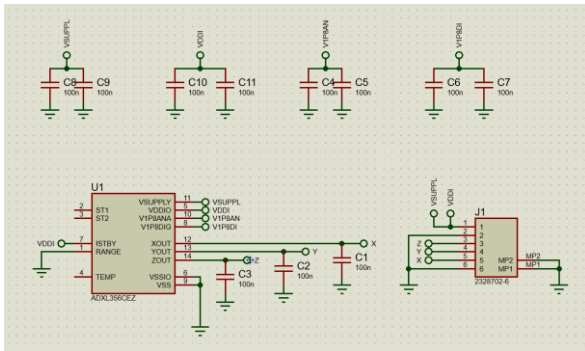


Figure 71 Circuit du ADXL 356

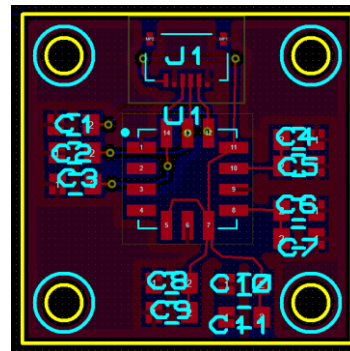


Figure 70 PCB du ADXL 356

Tableau 19 Liste de composants du ADXL 356

|                     |          |            |            |                                      |           | Totals              |           |                |
|---------------------|----------|------------|------------|--------------------------------------|-----------|---------------------|-----------|----------------|
| Category            | Quantity | References | Value      | Stock Code                           | Unit Cost | Category            | Quantity  | Unit Cost      |
| Capacitors          | 11       | C1-C11     | 100n       | <a href="#">80-C603C104K5RAC3121</a> | \$0.09    | Modules             | 0         | \$0.00         |
| Integrated Circuits | 1        | U1         | ADXL356CEZ | <a href="#">584-ADXL356CEZ</a>       | \$53.07   | Capacitors          | 11        | \$1.01         |
| Miscellaneous       | 1        | J1         | 2328702-6  | <a href="#">571-2328702-6</a>        | \$0.18    | Resistors           | 0         | \$0.00         |
|                     |          |            |            |                                      |           | Integrated Circuits | 1         | \$53.07        |
|                     |          |            |            |                                      |           | Transistors         | 0         | \$0.00         |
|                     |          |            |            |                                      |           | Diodes              | 0         | \$0.00         |
|                     |          |            |            |                                      |           | Miscellaneous       | 1         | \$0.18         |
|                     |          |            |            |                                      |           | <b>Total</b>        | <b>13</b> | <b>\$54.26</b> |

### 5.3 Évolution de la conception

Bien sûr, que la conception du PCB n'était pas réalisée dès le premier essai, il y a eu beaucoup de prototypage impliqué, cela allait de l'assemblage de circuits sur le *breadboard*, ou bien sur des planches à test et même la conception et la fabrication des circuits imprimés en utilisant de différentes méthodes de fabrication.

Puisque, le développement de n'importe quel système embarqués demande une haute fréquence de prototypage, utiliser des méthodes alternatives à simplement commander des circuits imprimés des fabricants qui sont la plupart du temps localisés en Este Asie, est une approche qui fait gagner beaucoup de temps en développement.

Dans les paragraphes suivants, nous allons introduire les trois méthodes de fabrication de PCB qu'on a utilisées durant le développement de ce projet.

### 5.3.1 Planches à test

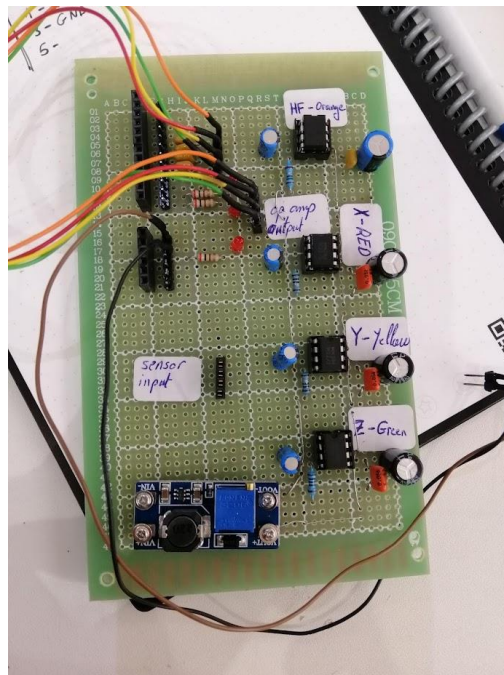


Figure 72 Planche à test

Commençons par la méthode la plus rapide et primitive, cette méthode est achevée en plaçant les composants électroniques sur une planche vide, puis les souder dans le but de former un circuit fermé.

Il s'agit de la méthode la plus rapide pour prototyper des circuits, tandis qu'elle présente diverses limitations :

- Bruit élevé généré par des quantités non calculées de soudure et des connexions non fiable, qui pose des problèmes dans le cas de la lecture des signaux analogiques.
- Incompatibilité avec les composants SMD.
- Longue durée d'assemblage.

### 5.3.2 Méthode Gravure

La méthode de gravure de fabrication des PCB est l'une des méthodes les plus anciennes de fabrication de PCB. Cette méthode permet la fabrication rapide de PCB jusqu'à 2 couches compatible avec des composants SMD, et qui sont sujets aux erreurs humaines, puisque le PCB est conçu avec un logiciel de CAO. Des méthodes avancées du même processus sont encore utilisées par les grands fabricants pour la fabrication des PCB utilisés dans divers applications complexes en électronique.

Ce processus commence par la conception d'un PCB à l'aide d'un logiciel CAO.



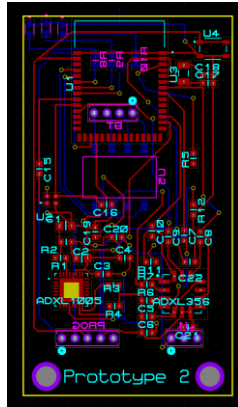


Figure 73 Conception du PCB

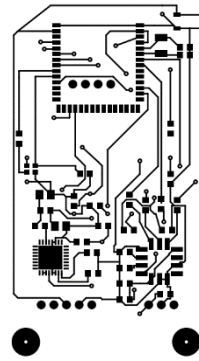


Figure 74 Couche supérieure du PCB

Ensuite, on imprime la version PDF de la couche supérieure du circuit sur un morceau de papier transparent

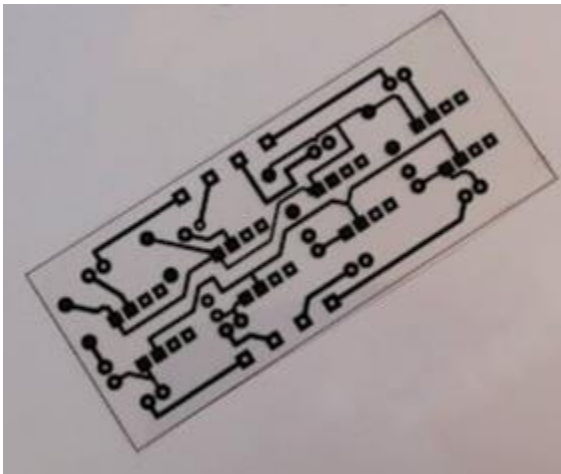


Figure 75 Circuit imprimé sur papier transparent

puis on la dispose sur le côté cuivre d'une carte PCB en cuivre vide.

La carte PCB étant couverte d'une couche époxy photoréactive, ce qui signifie que si exposée à la lumière



Figure 77 Exposition du PCB à la lumière UV

UV, l'époxy se décomposera dans une environnement possédant une haut valeur pH.

Ainsi, le PCB est exposé à la lumière UV pour 6 minutes, ce qui est le temps nécessaire pour que l'époxy réagit à la lumière.



Figure 78 Solution Basique NaOH

D'où, nous retirons le papier transparent et trempons le PCB dans une solution diluée de NaOH. La solution est préparée en diluant 3 grammes d'extrait de NaOH avec 500 ml d'eau distillée.

La solution NaOH est fortement basique, avec un  $\text{pH} = 13$ . Cette solution réagira avec la couche époxy du PCB et expose la couche de cuivre.

Passons maintenant à l'étape suivante, en préparant une solution acide de chlorure de fer.

Cela est fait en dissolvant 100 grammes de chlorure de fer dans 500 ml d'eau distillée.

Nous pouvons maintenant tremper le PCB dans la solution acide et continuer en l'agitant pour secouer les petites pièces de cuivres oxydés microscopiques.

Après environ 10 minutes, on peut la dissolution complète du cuivre en attendant que les traces du circuit restent conductrices.

Enfin, on lave le PCB avec de l'eau distillée et de l'alcool isopropylique.

On peut maintenant souder les différents composants la carte à l'aide de soudure ou de pâte à souder.

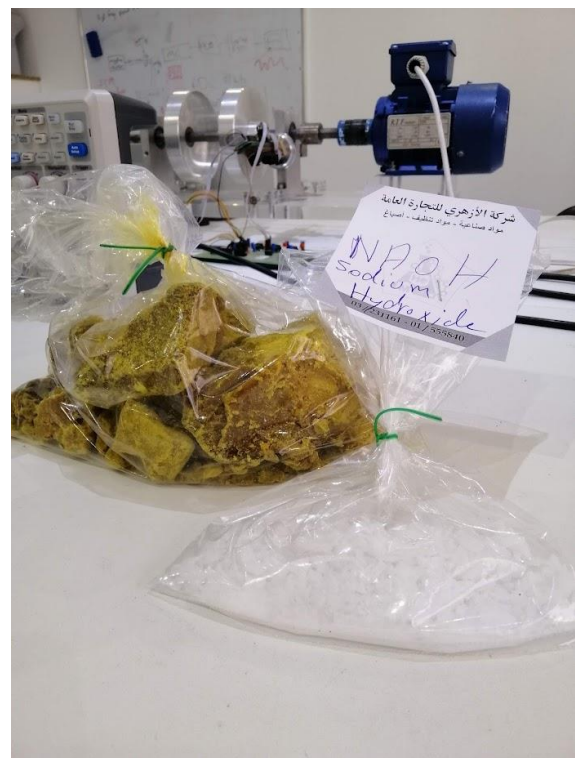


Figure 79 Extraits Solides du NaOH et  $\text{ClFe}$

fer

sur



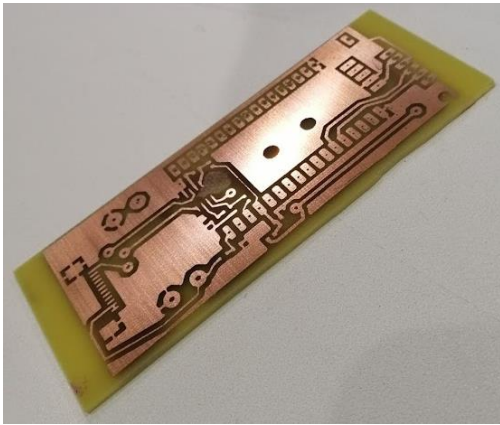


Figure 80 Exemple du PCB fabriqué avec la méthode acide-base

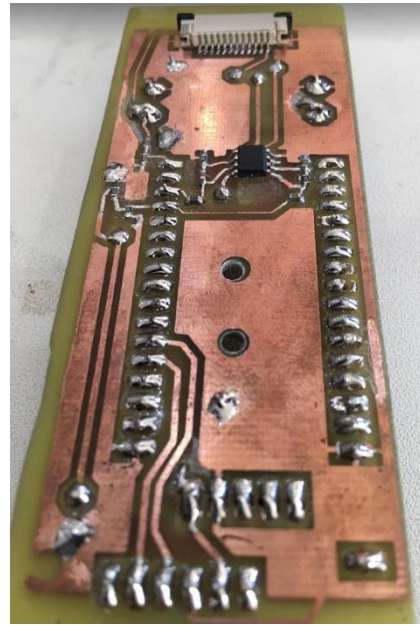


Figure 81 PCB assemblé

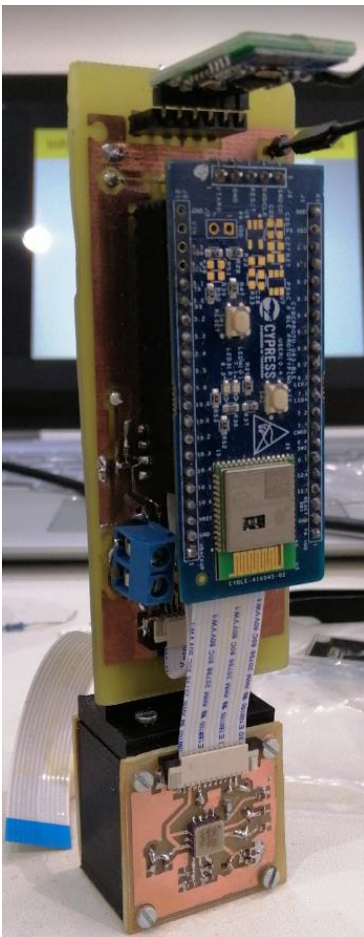


Figure 82 Prototype v2 du capteur

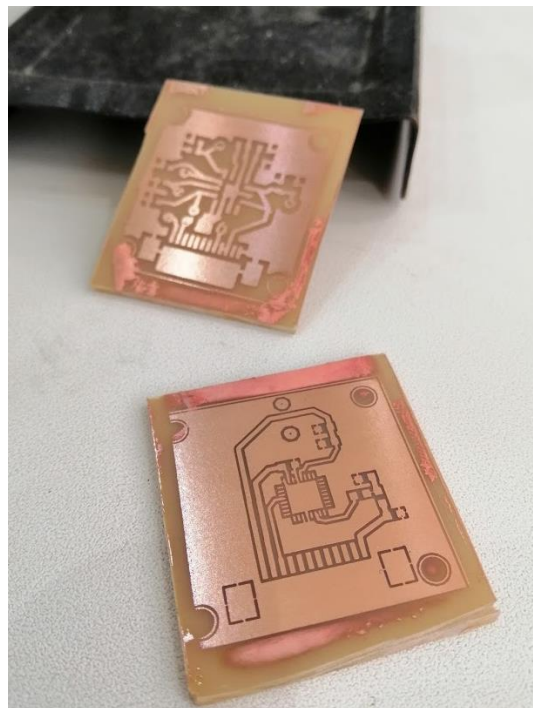


Figure 83 PCBs des accéléromètres MEMS

### 5.3.3 Méthode CNC

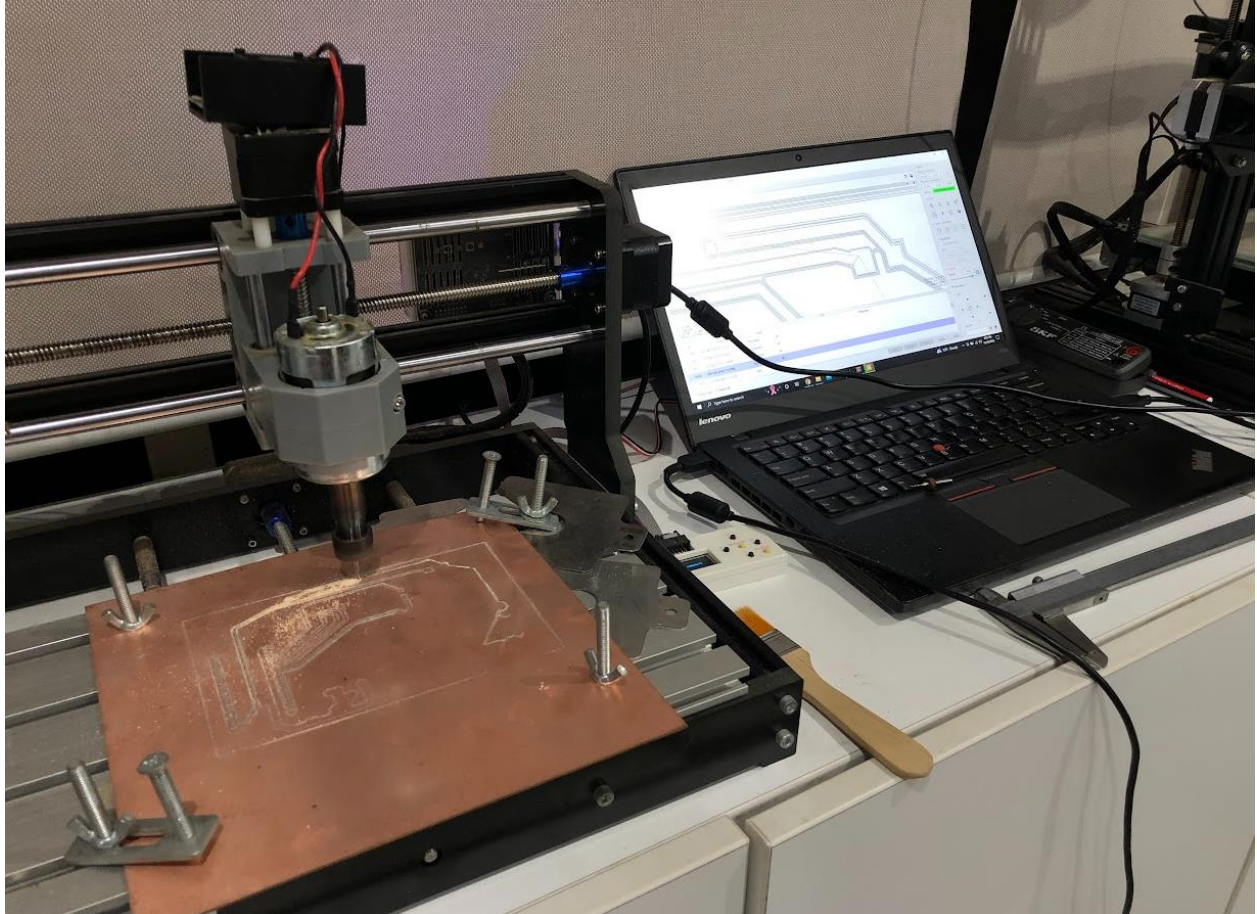
Malgré l'efficacité de la méthode de gravure, cette méthode présente également certains désavantages :

- Exposition à des solutions dangereuses et difficiles à recycler.

- Résultat différent dans le cas où un matériau ou une solution a été légèrement modifié ou changé, par exemple : angle de lumière UV, type de papier transparent, épaisseur de la couche cuivre du PCB, temps d'exposition à différentes solutions.

C'est là que la technologie la plus récente en matière de construction de PCB a été introduite, à savoir l'impression de PCB à l'aide d'une CNC.

Cette méthode est la plus efficace en termes de temps, puisque l'utilisateur peut configurer les paramètres et la gravure sera exécutée automatiquement sans aucune supervision.



*Figure 84 CNC de PCB*

Dans notre laboratoire, nous utilisons la CNC 3018 qui a une dimension de  $L*I*H = 250*200*150$  mm, ce qui est satisfaisant pour le développement des PCB pour notre application. La CNC est une fraiseuse compatible avec des couteaux de fraisage, de perçage et de gravure.

Avant tout, le PCB vide est fixé sur le lit et puis après qu'on règle les différents paramètres de control, la CNC exécute un fichier de commandes G-code.

Le logiciel FlatCAM est utilisé pour convertir les fichiers Gerber du PCB en G-code exécutable par la CNC. FlatCAM est également utilisé pour spécifier les différents paramètres d'outils et les séquences de changement d'outil pendant la gravure.



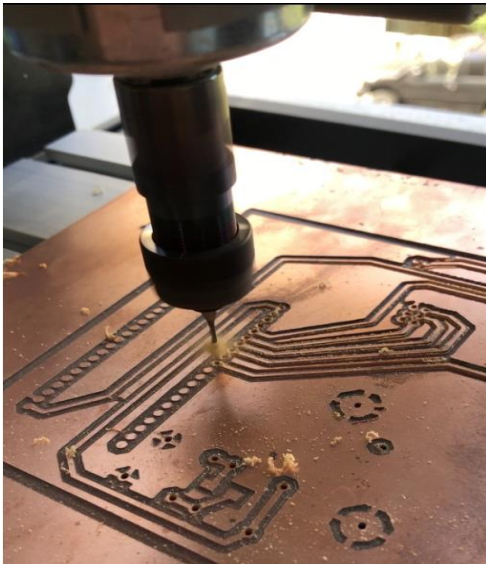


Figure 87 Gravure des traces du PCB

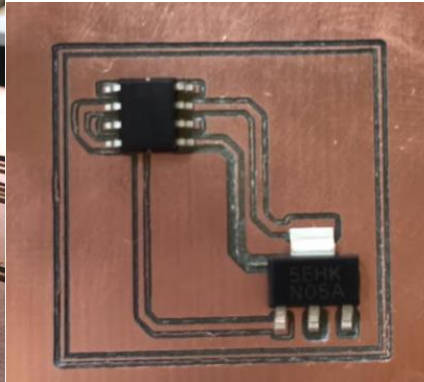


Figure 85 Exemple d'un circuit

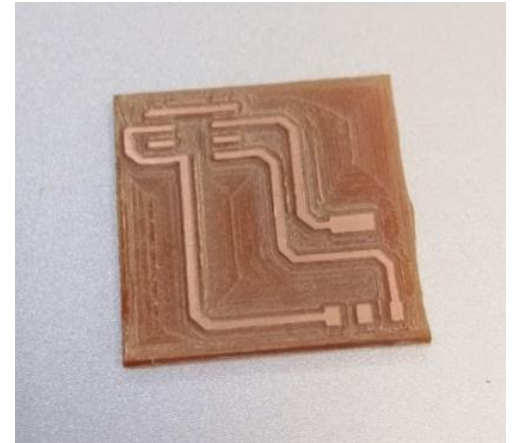


Figure 86 Exemple finale

Puis, le logiciel Candle est utilisé pour la communication avec la CNC.

En résumé, le G-code représente la séquence de coordonnées et de mouvements que la CNC doit exécuter, et

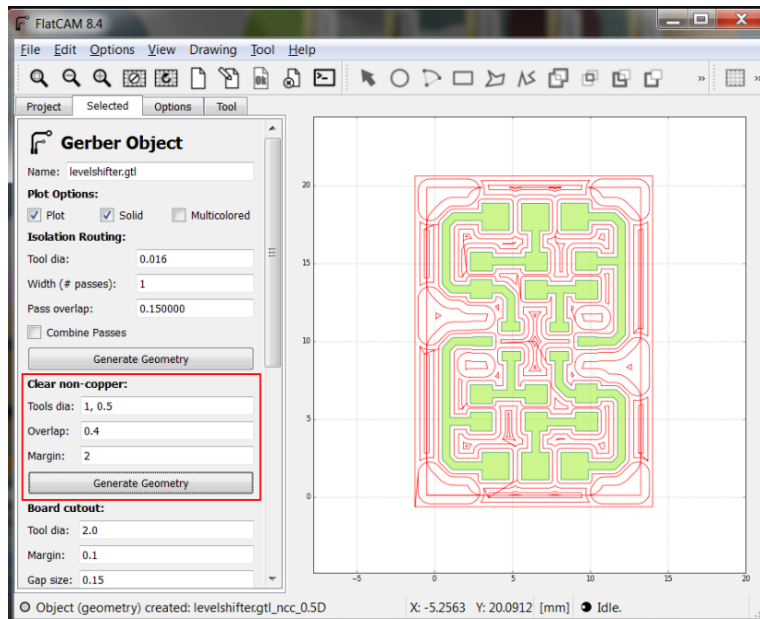


Figure 89 Logiciel FlatCAM pour préparer le Gcode

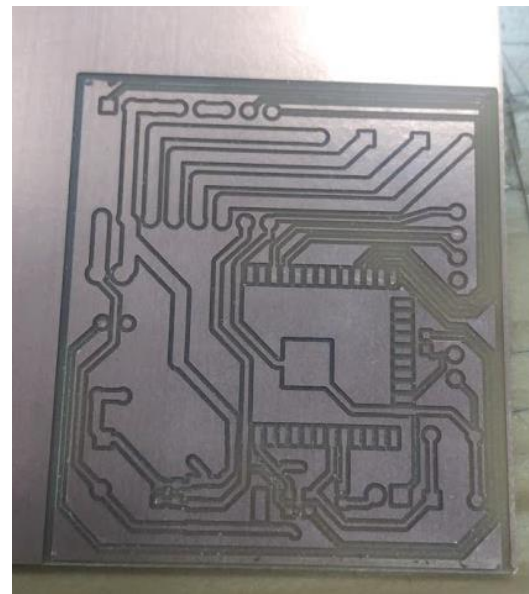


Figure 88 Exemple d'un PCB fabriqué avec un CNC

le logiciel Candle traduit ces instructions et pour contrôler la CNC.

Le résultat final est un PCB plus cohérent et raffiné pouvant comporter jusqu'à 2 couches. Des vias peuvent être installés manuellement sur les PCB et une couche époxy peut être appliquée sur le PCB pour l'isolation du circuit imprimé. Bien que la méthode CNC semble être la méthode parfaite pour la fabrication des PCBs, elle présente également certains inconvénients :

- Basse résolution dans le cas des traces SMD, car les traces et les plots sont plus petits que le diamètre de certaines lames et couteaux.
- Génération de poussière et de débris lors du fonctionnement.
- Haute bruit de fonctionnement.

### 5.3.4 Commander des PCB d'un fabricant

Désormais, lorsqu'une version d'un PCB est finalisée, nous pouvons procéder et commander la fabrication des PCB d'un fabricant.

Cela est fait en téléchargeant le fichier Gerber du PCB sur le site Web du fabricant et en spécifiant des paramètres tels que le nombre de couches, le type d'isolation, le type de conducteur, le nombre de composants SMD et leurs boîtiers, etc.

Nous pouvons également envoyer nos propres composants au fabricant afin qu'il puisse les assembler à l'aide des machines de Pick and place, bien sûr à condition qu'on fournisse le fichier pick and place .pkp .

The screenshot displays the PCBWay website's interface for ordering PCBs. The 'PCB Specification Selection' section on the left includes options for board type (Single pieces, Panel by Customer, Panel by PCBWay), size (100x100 mm), quantity (10 pcs), layers (2 Layers selected), material (Normal FR-4 Board), FR4-TG (TG 130-140), thickness (1.6 mm), min track/spacing (6/6mil), min hole size (0.3mm), solder mask (Green), and silkscreen (White). The 'Pricing And Build Time' section on the right shows a price comparison matrix with a 2-3 day build time for 10 units at \$5 each, and an express 24-hour option for \$37. It also lists shipping costs (DHL to Australia, \$23) and a total price of \$28. An 'Add to Cart' button is visible at the bottom right.

Figure 90 Site web du fabricant de PCB

Voici quelques exemples des différentes cartes que On a commandées chez le fabricant PCBWay :



Figure 92 version 3 du capteur

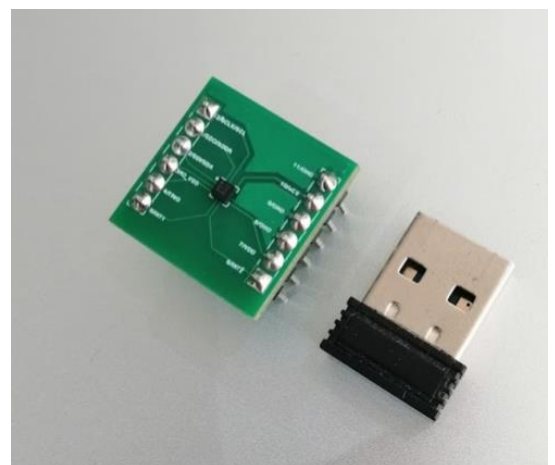


Figure 91 Prototype du MEMS Digital

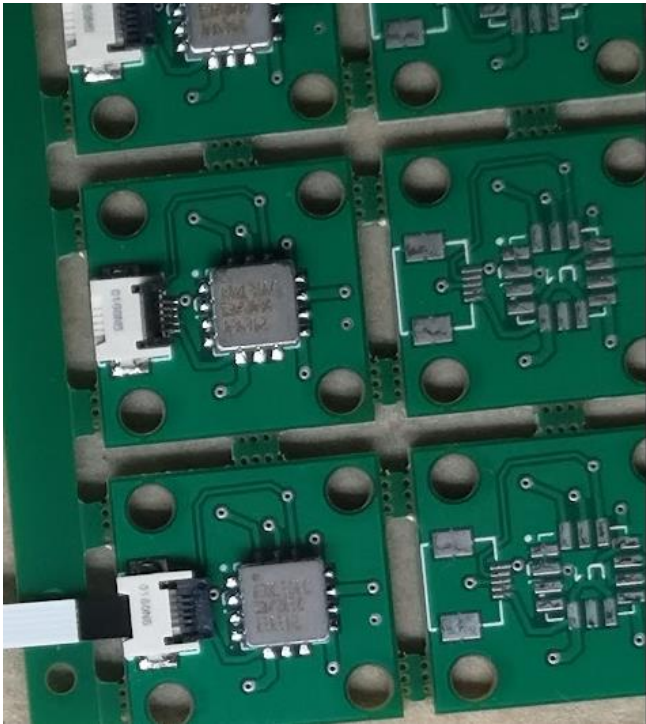


Figure 93 Version 3 des PCB ADXL 356



Figure 94 Version production des PCBs

## 5.4 Prototypage mécanique

Tout comme le processus de développement électronique, le développement mécanique utilise différentes méthodes pour réaliser la conception et le développement de prototypes.

Dans le paragraphe suivant, nous présenterons brièvement des procédures de prototypage mécanique utilisé durant le développement de ce projet, puis on présentera la conception finale du boîtier et du châssis du capteur.



#### 5.4.1 3D Printing

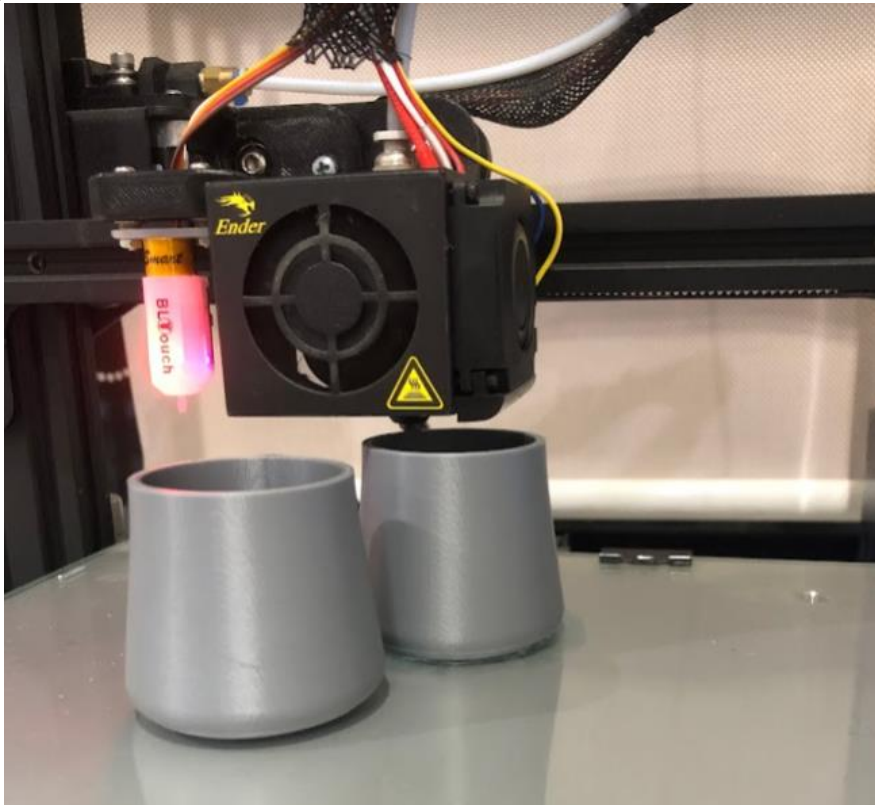


Figure 95 3D print des boîtiers des capteurs en filament PLA

Dans notre configuration de laboratoire, nous utilisons l'imprimante 3D Ender 3 qui possède une résolution de 0,1 à 0,4 mm par couche. On a installé un capteur de proximité à calibrage automatique BLTouch, associé à un firmware personnalisé qui exécute un calibrage du lit en glisses avant de commencer d'imprimer.

Voici quelques des designs et prototypes qu'on a conçus au cours de ce projet :



Figure 96 Prototype de la conception mécanique



Figure 98 Autres Prototypes



Figure 97 Prototype de tous les composants du capteur

#### 5.4.2 Fabrication manuel par machine de tour

Une fois la conception finalisée à l'aide de CAO par l'équipe mécanique, la conception peut être prototypée sur un tour. Le matériel utilisé est l'Aluminium ou bien le cuivre.



Figure 99 Chassie et Boitiers du version 3 du capteur. Fabriquées sur une machine à tour



Figure 100 Chassie du version de production du capteur

## 5.5 Configurations des tests en laboratoire

Afin de tester et de valider les différents capteurs et prototypes construits On a mis en place plusieurs configurations de tests. Ces tests sont très utiles dans notre projet particulier, car il y a beaucoup de temps durant le développement où le diagnostic du système embarqué a besoin de la simulation d'une entrée de type mécanique/vibratoire.

### 5.5.1 Shaker et G.B.F

La première configuration est le shaker avec un G.B.F. Cette configuration permettra la possibilité de générer et de simuler n'importe quel type de signal ou d'onde. Le signal généré peut être une simple onde sinusoïdale, carrée ou triangulaire, ou même un fichier .wav d'enregistrement réel qui a été acquis à l'aide

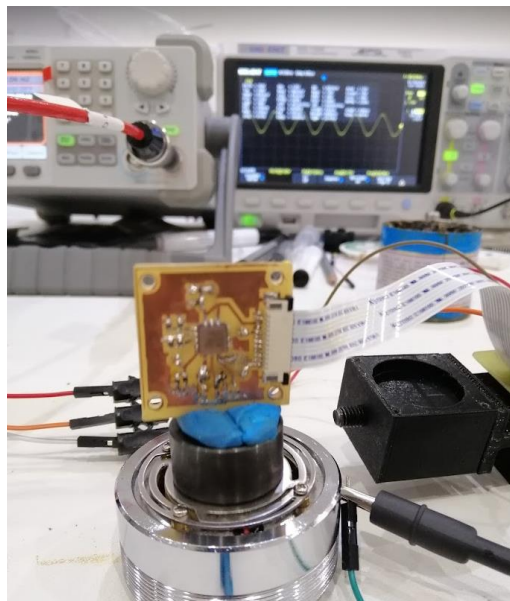


Figure 101 Accelerometre ADXL 356 en test sur le Shaker



d'un autre instrument d'acquisition de vibrations. De cette façon, la simulation de n'importe quel cas d'usage est possible, dans des conditions in-vitro.

L'accéléromètre peut être fixé sur le shaker à l'aide d'un adhésif réutilisable Loctite, ou même vissé par un adapter de vis de taille de 0.25 pouces (taille standard de vis pour les accéléromètres industriels).

Dans le cas où on veut amplifier la puissance vibratoire, le shaker pourrait être serré sur un morceau de verre, destinier à amplifier la puissance totale de la vibration. Le capteur testé est ensuite serré sur le verre à l'aide d'un autre trou.

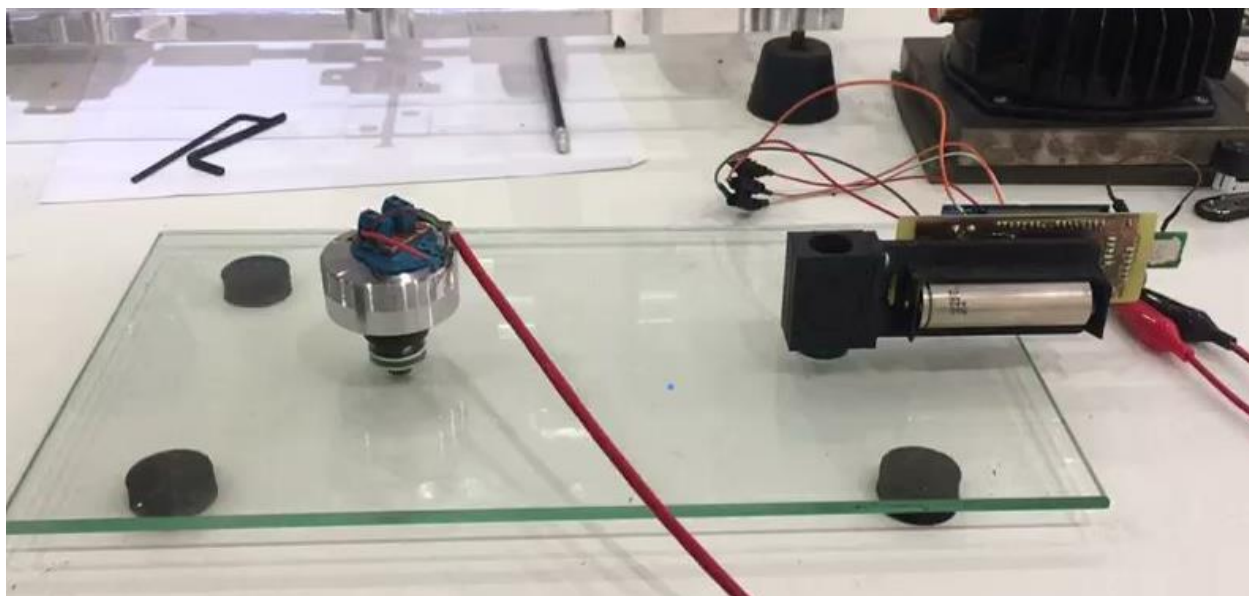


Figure 102 Shaker attaché à un piece de glass

De plus, si on souhaite de tester en utilisant un signal à basses fréquences ( $<5$  Hz), un shaker de 100 W associé à un amplificateur qui prend un signal d'entrée du G.B.F. est utilisé.



Figure 103 Shaker de 100 W pour les tests à basse fréquence

En plus, pour tester les cartes de développement d'accéléromètres d'Analog Devices, On a imprimé en 3D l'adapter suivant qui permet de porter les cartes de développement ADXL.

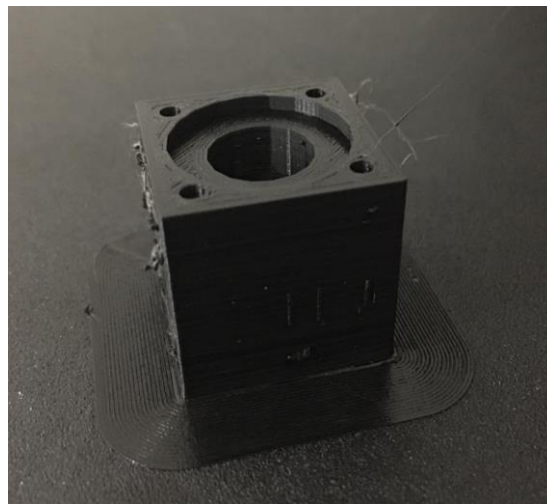
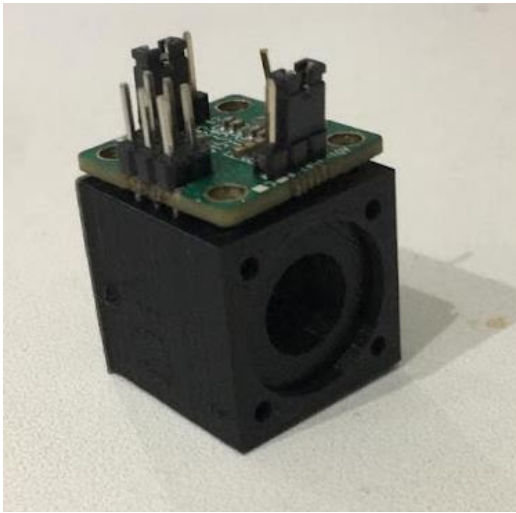


Figure 104 ADXL CUBE

## 5.5.2 Configuration de la machine de laboratoire

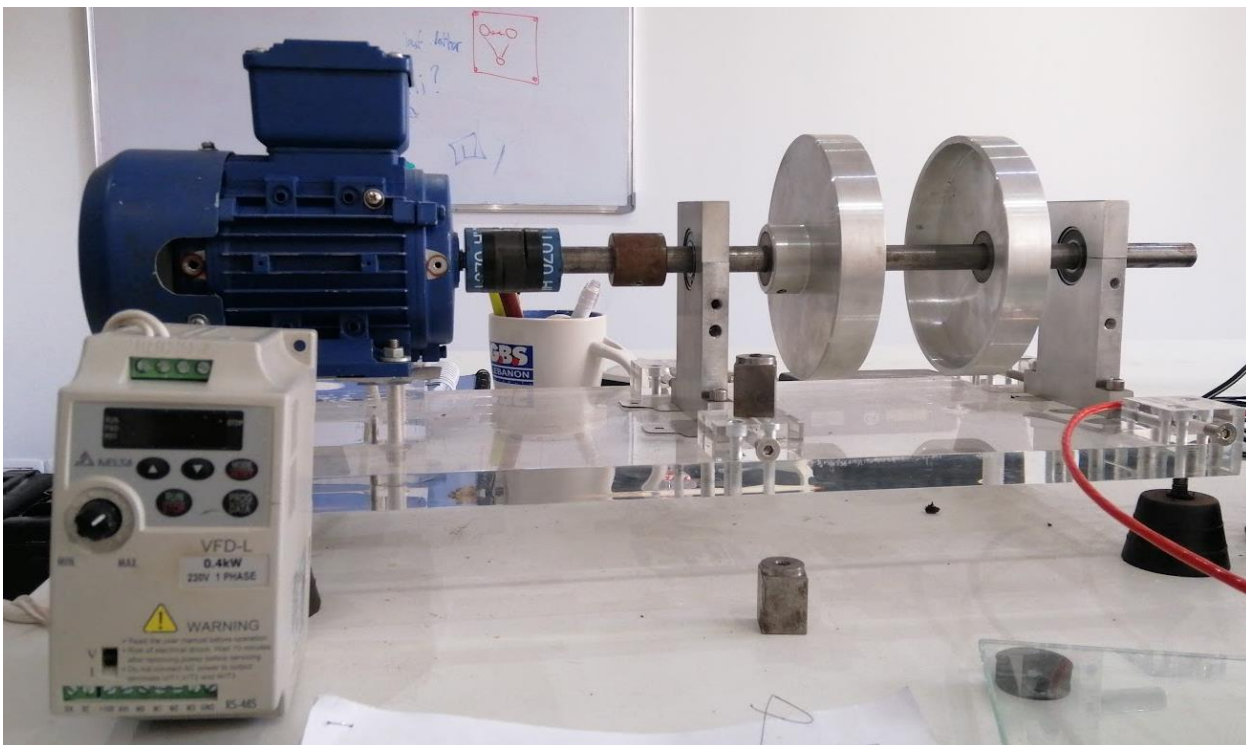


Figure 105 Configuration de la machine de test de laboratoire

La deuxième configuration de test utilisé est la configuration de la machine de laboratoire. Il est composé d'un moteur à induction triphasé, alimenté par un VFD de 4 kW. Le moteur est fixé à un axe, par un accouplement de 8/10 mm. L'axe est maintenu par 2 boîtiers de roulements en aluminium et deux disques creux pour pouvoir y ajouter des poids.

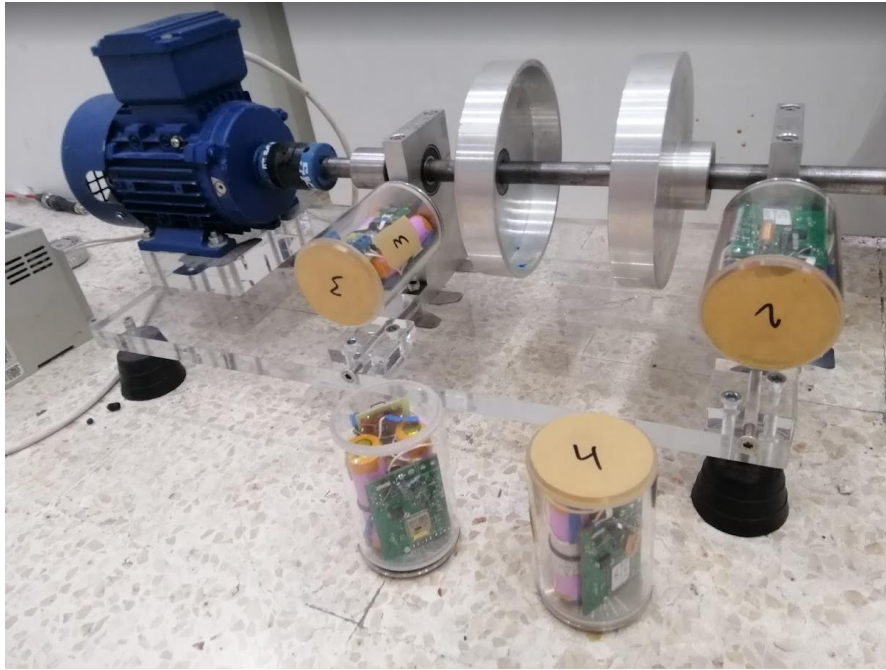


Figure 106 Test sur le machine de laboratoire

Ce banc permet de simuler n'importe quelle machine composée de 4 points :

- Point 1 : Moteur côté opposé à l'entraînement (M-NDE)
- Point 2 : Côté entraînement du moteur (M-DE)
- Point 3 : Chargement côté entraînement (L-DE)
- Point 4 : Charge non côté entraînement (L-NDE)

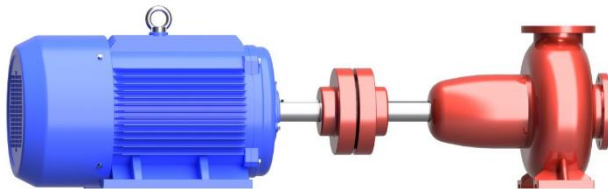


Figure 108 Représentation graphique d'une machine composé d'un moteur et une pompe

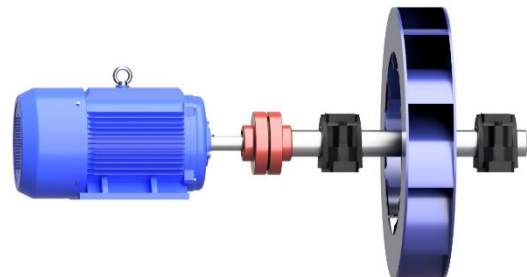


Figure 107 Représentation graphique d'une machine composé d'un moteur et une ventilateur

Un capteur pourrait être installé sur chaque point via une vis de taille standard.

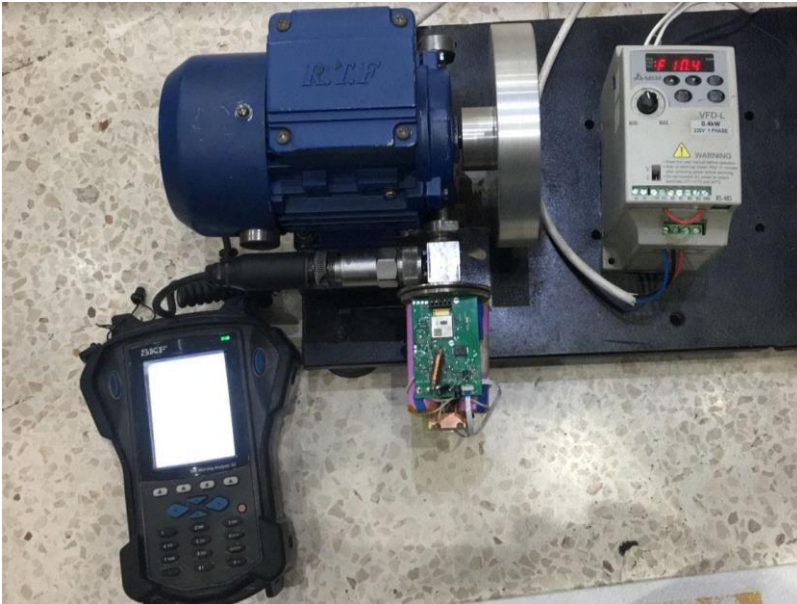
Le seul but de cette configuration est de simuler toute combinaison de défauts mentionnées dans le second chapitre.

Les deux disques sont alignés lors de l'assemblage à l'aide d'une machine d'alignement laser, et sont équilibrés, afin que l'on sache que la machine est isolée de tout défaut et est parfaitement saine.

D'où, on peut ajouter des poids sur les deux disques quelconques pour simuler un défaut de désalignement, ou bien on peut élever l'un des boîtiers de roulement par quelques dixièmes de mm pour simuler un désalignement vertical, ou bien encore remplacer l'un des roulements avec un qui est défectueux d'une manière particulière (défaut de bague intérieure / extérieure ou défaut de manque de lubrification).

Ces tests nous aident à tester la réponse du système dans n'importe quel cas d'usage, c.-à-d. l'entrée de cette configuration est le défaut mécanique de la machine, et la sortie est le diagnostic de notre système de maintenance prédictive.

Plusieurs tests seront découverts et analysés dans les chapitres prochains.



*Figure 109 test de déséquilibre*



## 5.6 Hub – IOT Gateway



Figure 110 IOT Gateway prototype



Le hub ou bien *IOT gateway* est composé d'une carte de développement ESP32 et d'un écran OLED. La version actuelle du hub est une version alpha de test.

Le hub est placé à proximité de la machine surveillée, préalablement à la distance supportée par BLE (10 - 100 mètres) avec les différents capteurs auxquels elle est connectée, et à portée à la distance supportée par Wifi (20 - 40 mètres).

Les cas d'utilisation du hub sont physiquement limités à 2 cas d'entrée et 1 cas de sortie. Le hub dispose de deux boutons tactiles.

Le premier bouton sert à déclencher un acquisition urgent, c'est-à-dire au cas où des données instantanées seraient acquises des capteurs connectés. Et un

deuxième bouton pour réinitialiser le hub en cas de dysfonctionnement. L'écran OLED sert à indiquer l'état dans lequel se trouve le système. Dans le chapitre suivant, nous en découvrirons davantage sur les états du système intégré dans le logiciel embarqué du hub. Conception actuelle du châssis et du boîtier du capteur



Figure 111 Boitier Version de production du



Figure 112 Chassit du version de production du capteur

La conception finale se compose de deux composants principaux : le boîtier, fabriqué à l'aide d'un 3D Printer en matériel de type PLA, puis recouvert d'une peinture noire résistante aux hautes températures.

La base, fabriqué d'aluminium, conçue pour porter deux accéléromètres ADXL, et le PCB principale. On remarque une cavité au centre de cette base, qui est spécialement réservé pour une pile lithium CR123 ou 18650.

Les dimensions du capteur sont environs de  $h*d = 80 * 45$  mm. Il est important de mentionner que le boîtier présente une conception incurvée, garantissant la conformité aux spécifications de l'antenne du BLE. La documentation de conception RF du fabricant Cypress suggère que tout objet en plastique doit maintenir une distance minimale d'au moins 8 mm de l'antenne BLE.

Une antenne dipôle isotrope rayonne de manière égale dans toutes les directions dans le plan perpendiculaire à l'axe de l'antenne. Cependant, la plupart des antennes s'écartent de ce comportement idéal. Voir le diagramme de rayonnement d'une antenne PCB illustré sur la figure comme une illustration. Chaque point de données représente l'intensité du champ RF, mesurée par l'indicateur d'intensité du signal reçu (RSSI) dans le récepteur. Comme prévu, les contours ne sont pas exactement circulaires, car l'antenne n'est pas isotrope.

Remarque : Le gain indique le rayonnement dans la direction d'intérêt par rapport à l'antenne isotrope, qui rayonne uniformément dans toutes les directions. Ceci est exprimé en termes de dBi, c'est-à-dire l'intensité du champ de rayonnement par rapport à une antenne idéale.

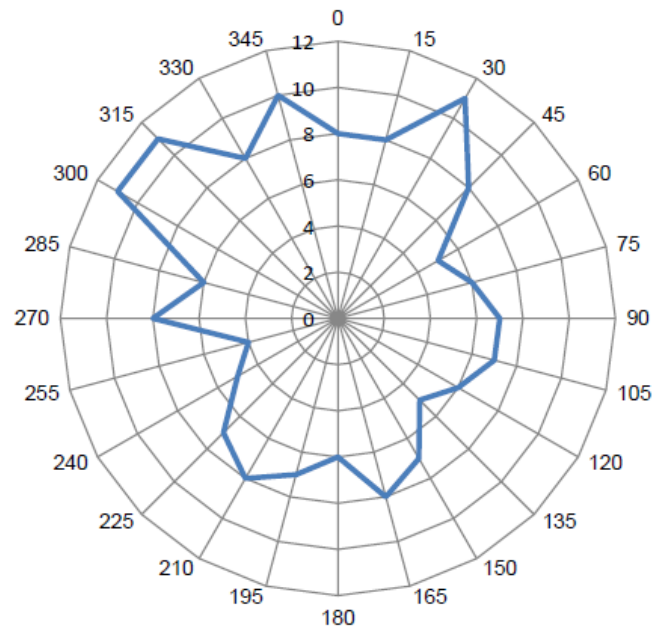


Figure 113 Diagramme de rayonnement de l'antenne PSOC 6 BLE

## 5.7 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a exploré de manière approfondie les diverses méthodes employées dans la conception et le développement du hardware. Nous avons examiné en détail des processus cruciaux tels que la conception de circuits imprimés, le prototypage de ces circuits, ainsi que la gestion des commandes auprès des fabricants. De plus, nous avons également abordé la conception mécanique en 3D, l'impression 3D, les types de tours et le fraisage CNC, soulignant ainsi l'importance de ces techniques dans le domaine de l'ingénierie matérielle. Ce chapitre a fourni un aperçu complet des outils et des approches disponibles pour concevoir et développer des composants matériels, ouvrant ainsi la voie à une exploration plus poussée de ces sujets passionnants et en constante évolution. En somme, la diversité des méthodes présentées ici reflète l'éventail de possibilités offertes aux professionnels de la conception matérielle pour concrétiser leurs idées et leurs projets.

## Chapitre 6. Conception Software

Dans cette section de ce mémoire, nous approfondissons une exploration approfondie des organigrammes et des environnements de développement qui ont joué un rôle central dans la création et la mise en œuvre du système de maintenance prédictive. Comprendre l'architecture logicielle et ses outils de développement associés est essentiel pour comprendre le processus complexe de maintenance prédictive, qui exploite la puissance de l'analyse des données et de l'apprentissage automatique pour optimiser les calendriers de maintenance et améliorer la fiabilité des équipements. Nous examinerons les organigrammes qui expliquent la séquence des opérations au sein du système, mettant en lumière la logique derrière notre approche de maintenance prédictive. De plus, nous examinerons les environnements de développement utilisés dans la conception et le déploiement du logiciel, mettant en lumière le cadre technique qui sous-tend l'efficacité et l'évolutivité du système.

### 6.1 Conception Software du Capteur

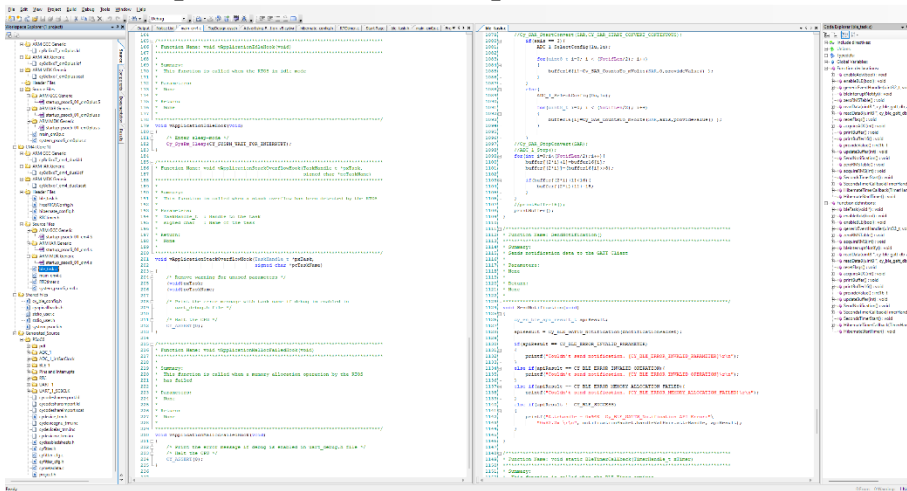


Figure 114 Interface de développement du PSoC Creator 6

Pour le développement du code du capteur, nous avons utilisé le polyvalent PSoC Creator, un puissant environnement de développement intégré conçu pour créer des logiciels embarqués pour le système sur puce (SoC) PSoC 6. Le SoC PSoC 6, construit sur l'architecture ARM Cortex-M4,

nous fournit une base solide pour notre code de capteur, nous permettant d'exploiter les capacités d'un microcontrôleur hautes performances. Dans PSoC Creator, nous avons utilisé le langage de programmation C pour créer le micrologiciel qui interagit avec les capteurs et traite leurs données. Cet environnement de développement offre une gamme d'API prédéfinies qui s'avèrent déterminantes pour simplifier l'interaction matérielle, nous permettant de nous concentrer sur les aspects spécifiques à l'application de notre code. Ces API résument les opérations matérielles complexes de bas niveau, ce qui rend plus efficace le développement de code pour les systèmes embarqués tels que le PSoC 6 et constituent une pratique courante dans le développement basé sur ARM pour garantir la portabilité et la facilité de maintenance du code.

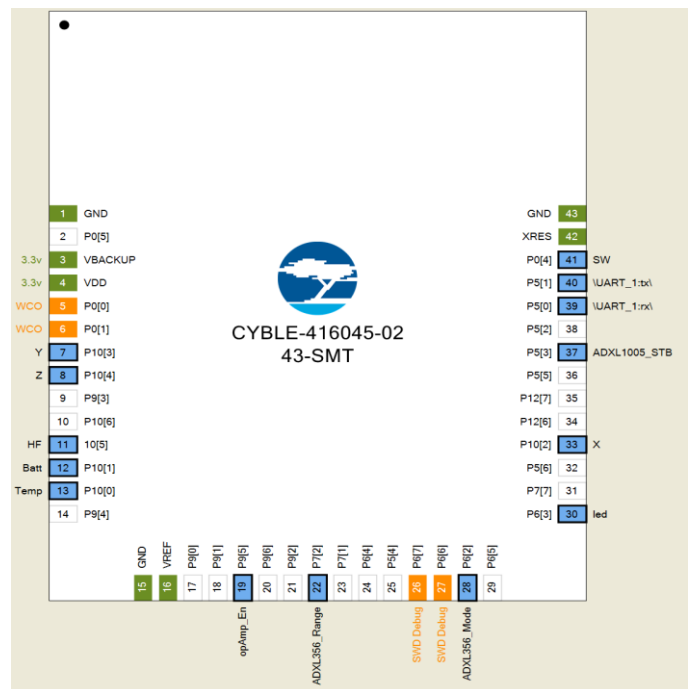


Figure 115 Brochage du PSoC 6



Sur cette figure, nous présentons une illustration du SoC PSOC 6, composant central de notre capteur de bord de maintenance prédictive. La figure met en évidence les divers brochages que nous avons utilisés stratégiquement pour connecter et contrôler divers éléments de notre système. Ces brochages servent d'interface entre le PSOC 6 et les composants externes, permettant un échange transparent de données et de commandes. Cette représentation visuelle fournit un aperçu clair de la connectivité physique qui sous-tend la fonctionnalité de notre solution de maintenance prédictive, soulignant le rôle central du microcontrôleur PSOC 6 dans l'architecture de notre système.

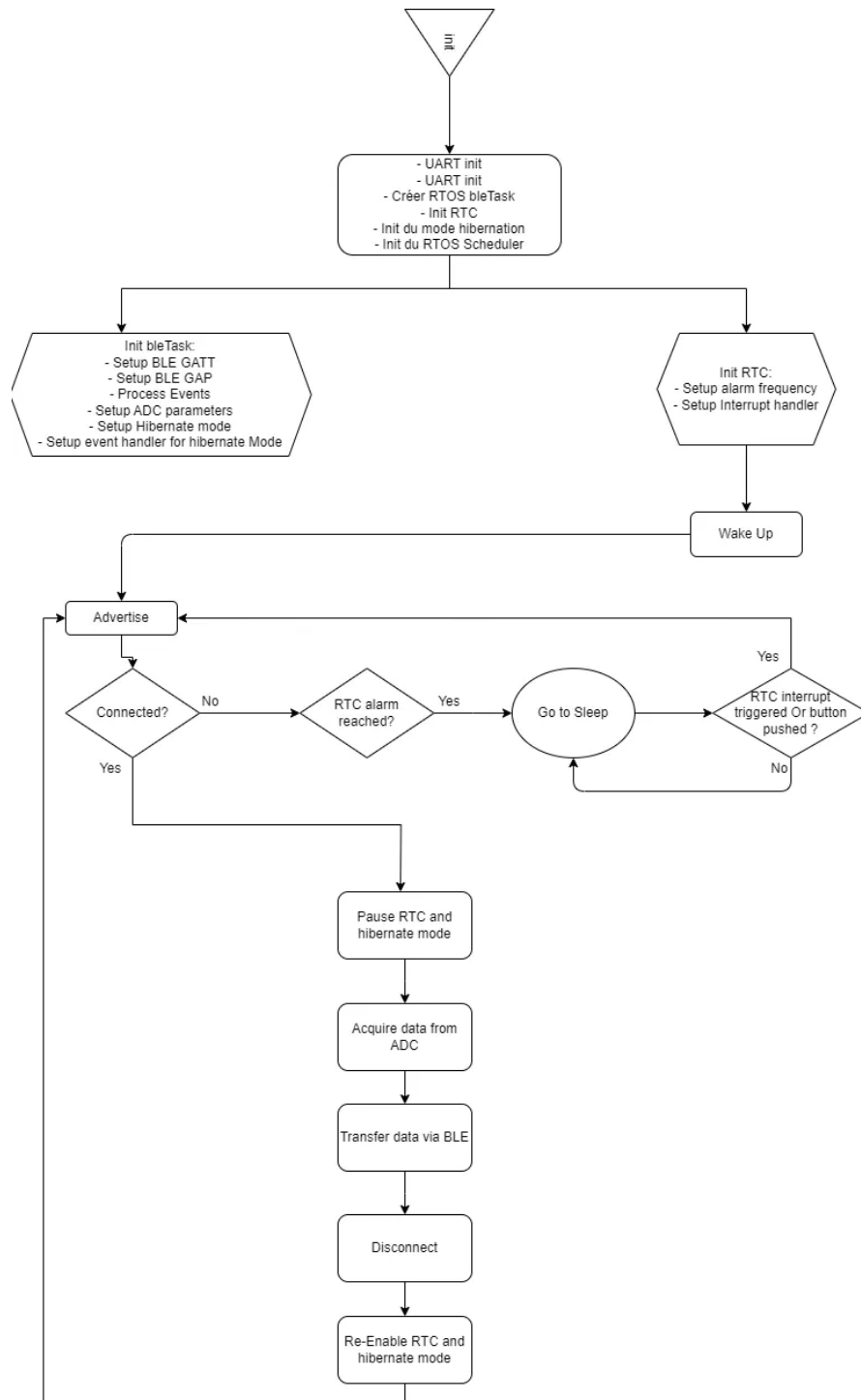


Figure 116 Organigramme représentant le logiciel embarqué du PSOC 6

Tableau 20 Interruptions du PSOC 6

| Instance Name   | Interrupt Number | ARM CM0+ Enable                     | ARM CM0+ Priority (1 - 3) | ARM CM0+ Vector (3 - 29) | ARM CM4 Enable                      | ARM CM4 Priority (0 - 7) |
|-----------------|------------------|-------------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| ADC_1_IRQ       | 138              | <input type="checkbox"/>            | --                        | --                       | <input checked="" type="checkbox"/> | 7                        |
| BLE_1_bless_isr | 24               | <input checked="" type="checkbox"/> | 1                         | 3                        | <input type="checkbox"/>            | --                       |
| RTC_RTC_IRQ     | 21               | <input type="checkbox"/>            | --                        | --                       | <input checked="" type="checkbox"/> | 7                        |
| UART_1_SCB_IRQ  | 46               | <input type="checkbox"/>            | --                        | --                       | <input checked="" type="checkbox"/> | 7                        |

Ce tableau présente un aperçu des principales sources d'interruption au sein du système PSOC 6, chacune jouant un rôle crucial dans le fonctionnement de notre solution de maintenance prédictive. Ces demandes d'interruption (IRQ) facilitent l'interaction et la coordination en temps réel de divers composants. Ici, nous répertorions les quatre principales sources d'interruption : ADC IRQ, BLE ISR, RTC IRQ et UART IRQ. Ces interruptions permettent une gestion efficace de l'acquisition de données, de la communication sans fil, de la gestion de l'horloge en temps réel et de la communication série, garantissant collectivement la fonctionnalité et la réactivité de notre système de maintenance prédictive.

Remarque : Une gestion efficace de ces sources d'interruption est essentielle au fonctionnement transparent de notre système de maintenance prédictive, garantissant une acquisition de données et une communication en temps opportun entre les composants du système.

## 6.2 Interface Utilisateur Graphique

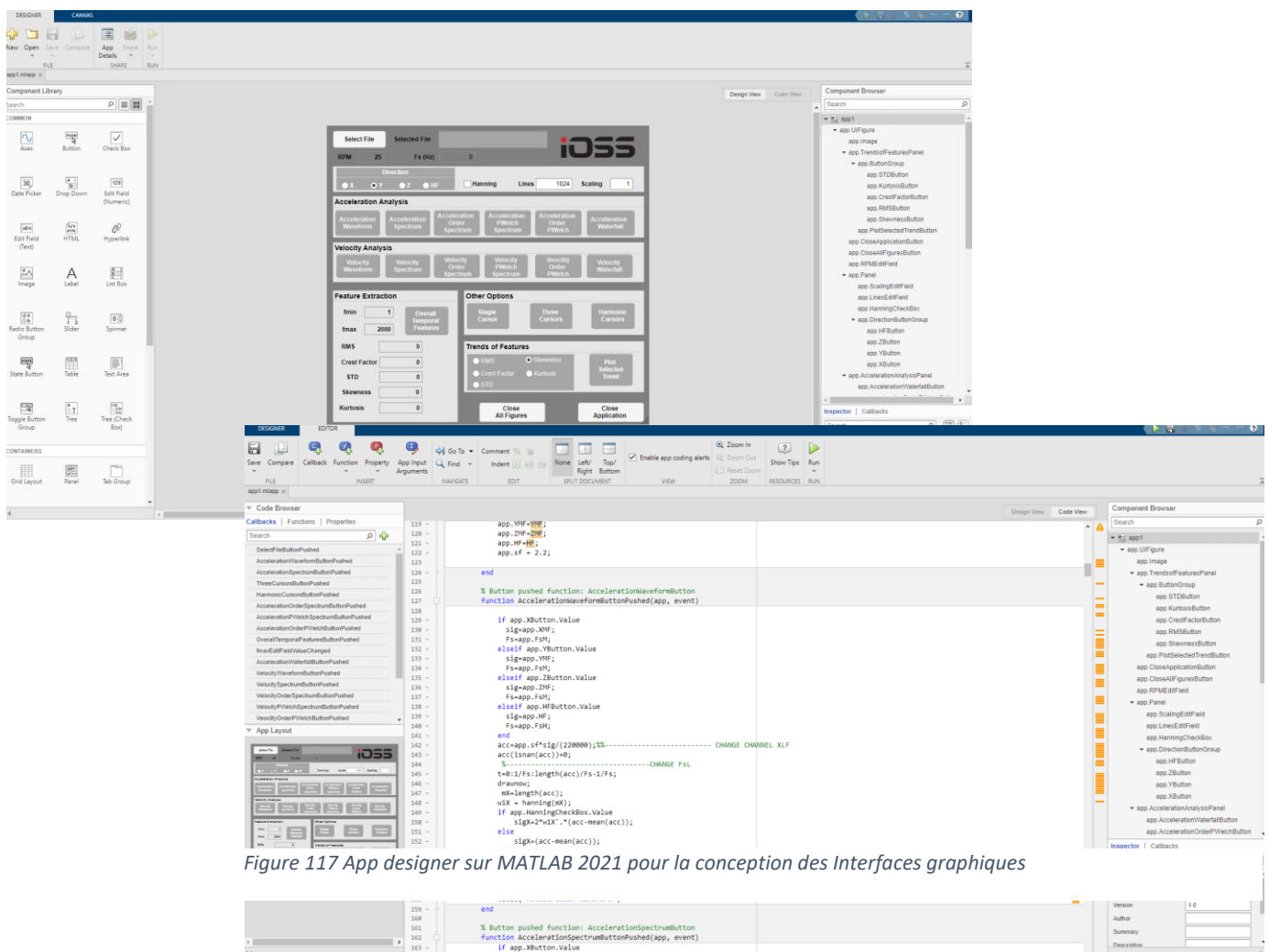


Figure 117 App designer sur MATLAB 2021 pour la conception des Interfaces graphiques

Dans cette section, nous tournons notre attention vers l'aspect basé sur MATLAB de notre système de maintenance prédictive, en mettant en évidence le code MATLAB personnalisé et l'interface utilisateur graphique (GUI) conçue avec le puissant de l'App Designer dans MATLAB 2021R. Ces composants logiciels constituent le frontal convivial de notre système, offrant un contrôle intuitif et une visualisation des données en temps réel pour nos opérations de maintenance prédictive. Le code MATLAB constitue l'épine dorsale de nos processus d'analyse de données et de prise de décision, tandis que l'interface graphique simplifie les interactions avec les utilisateurs, permettant au personnel de maintenance de surveiller plus facilement l'état des équipements et de recevoir des informations exploitables. Notre utilisation d'Apogee App Designer démontre l'adaptabilité et l'innovation qui sous-tendent notre approche, garantissant que notre système de maintenance prédictive est non seulement techniquement robuste, mais également centré sur l'utilisateur et accessible.

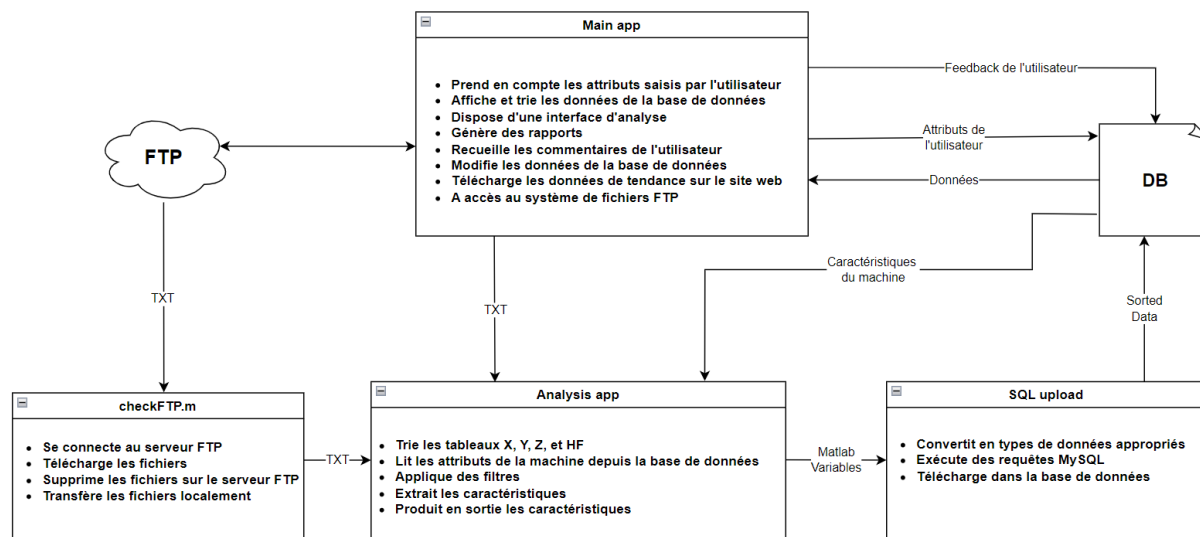


Figure 118 Architecture Software du GUI

Voici un aperçu de haut niveau de l'architecture logicielle, où nous délimitons les principaux composants logiciels et mettons en évidence les caractéristiques distinctives de chaque élément constitutif.

### 6.3 Gateway IOT

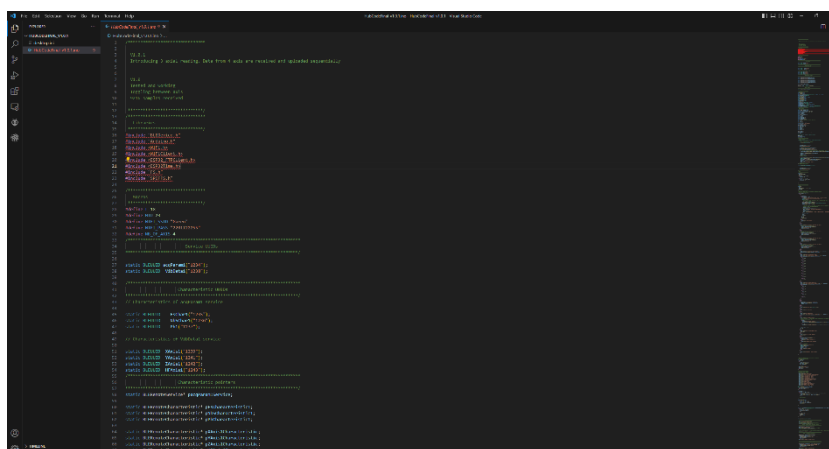


Figure 119 Environnement VsCode avec le framework Arduino

Dans le contexte de notre système, le développement de la passerelle IoT représente un aspect critique de notre architecture. Cette passerelle, alimentée par le système sur puce (SoC) ESP32-S3, joue un rôle central dans la connexion de notre système de maintenance prédictive à l'écosystème plus large de l'Internet des objets (IoT). Pour rationaliser le processus de développement et exploiter les capacités de l'ESP32-S3, nous avons opté pour le framework Arduino comme plate-forme de développement. Cependant, plutôt que d'utiliser l'IDE Arduino, nous avons adopté Visual Studio Code comme environnement de développement intégré (IDE). VSCode offre une multitude d'avantages, notamment une navigation améliorée dans le code, des capacités de débogage et un écosystème d'extensions dynamique, qui sont primordiaux pour la complexité de notre projet. Ce choix permet à notre équipe de développement de travailler plus efficacement et de maintenir la cohérence du code, garantissant ainsi que notre passerelle IoT est non seulement robuste, mais également hautement adaptable et évolutive.

Ce tableau présente un aperçu des différents états que le système de passerelle IOT peut prendre lors de son fonctionnement. Chaque état signifie une phase ou une condition distincte, contribuant à la fonctionnalité et au comportement global de la passerelle.

Tableau 21 Séquence normale de travail du système

| Séquence normale      |                                                                                   |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| State                 | Description                                                                       |
| SD=OK                 | La carte mémoire a été initialisée avec succès                                    |
| File=OK               | Les fichiers de la carte mémoire ont été chargés avec succès                      |
| Wifi=OK               | Le Wifi s'est connecté avec succès                                                |
| File=OK               | Les fichiers de la carte mémoire ont été chargés avec succès                      |
| Uploading             | télécharger le fichier PING sur le serveur FTP                                    |
| Ready                 | vous pouvez maintenant appuyer sur le commutateur pour acquérir des données       |
| acquiring             | déclenché lorsque le bouton est enfoncé, ne récupérant pas les données du capteur |
| error, please restart | Erreur                                                                            |
| Uploading             | Le fichier est en cours de téléchargement sur le serveur FTP                      |
| Ready                 | Fichier téléchargé avec succès. Prêt à acquérir un autre ensemble de données      |

Tableau 22 Tous les états du système sur l'IOT Gateway

| Tous les états |           |                                                                                   |
|----------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| Case           | state     | Description                                                                       |
| 0              | Power on  | Le Hub est sous tension                                                           |
| 1              | SD=OK     | La carte mémoire a été initialisée avec succès                                    |
| 2              | SD=ERR    | La carte mémoire n'a pas été initialisée avec succès                              |
| 3              | FILE=OK   | Les fichiers de la carte mémoire ont été chargés avec succès                      |
| 4              | FILE=ERR  | Les fichiers de la carte mémoire n'ont pas été chargés avec succès                |
| 5              | Wifi=OK   | Le Wifi s'est connecté avec succès                                                |
| 6              | Wifi=ERR  | Le Wifi n'est pas connecté                                                        |
| 7              | FTP=OK    | Le hub s'est connecté au serveur FTP                                              |
| 8              | FTP=ERR   | Impossible de se connecter au serveur FTP                                         |
| 9              | Ready     | Prêt à acquérir un autre ensemble de données                                      |
| a              | acquiring | déclenché lorsque le bouton est enfoncé, ne récupérant pas les données du capteur |
| b              | Uploading | Télécharger des fichiers de la carte SD vers FTP                                  |

|   |           |                      |
|---|-----------|----------------------|
| c | Loading   | Chargement           |
| d | uploaded! | Téléchargé sur FTP ! |

Ce tableau présente la séquence typique d'états qui subit la passerelle IOT pendant le fonctionnement normal. Cette séquence représente le flux de travail standard de la passerelle, illustrant comment elle passe d'un état à l'autre pour remplir efficacement son rôle.

Tableau 23 Tests au niveau system

| Actions                              | Couper l'alimentation du capteur. | Désactiver le Wi-Fi          | Pas de connection au web | Redémarrer l'IOT gateway | Résultat |
|--------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------|
| Durant le lecture du fichier cmd.txt | Independent                       | Erreur FTP, puis reboot      | Erreur FTP, puis reboot  | Pas d'effet              | Passer   |
| Durant le téléchargement à l'FTP     | Independent                       | Données corompus             | Erreur FTP, puis reboot  | Données corompus         | Passer   |
| Durant la connexion au Wifi          | Independent                       | Réessaye 20 fois puis reboot | Connexion normal         | Pas d'effet              | Passer   |
| Durant la connexion au BLE           | Reboot après 20 sec               | Acquisition du donnée        | Acquisition du donnée    | Reboot                   | Passer   |
| Durant l'acquisition                 | Erreur HCI, puis reboot           | Independent                  | Independent              | Reboot                   | Passer   |
| Durant la transmission               | Erreur HCI, puis reboot           | Independent                  | Independent              | Reboot                   | Passer   |
| Error 421: Too mant connections      | Independent                       | FTP offline, puis reboot     | FTP offline, puis reboot | Reboot après 90 sec      | Passer   |

Dans notre quête pour parvenir à un système de maintenance prédictive robuste et fonctionnant de manière transparente, nous effectuons une série de tests d'intégration essentiels au niveau du système visant à garantir une interaction parfaite entre la passerelle IOT et le code PSOC. Ces tests englobent des aspects critiques, notamment la transmission des données, l'interaction des capteurs, la compatibilité des protocoles de communication, la synchronisation de l'horloge en temps réel, les mécanismes de gestion des erreurs et de récupération, l'efficacité de la gestion de l'énergie, l'intégrité des données et la validation. De plus, nous évaluons rigoureusement l'interaction entre l'interface graphique MATLAB et le code PSOC. La réussite de l'exécution de ces tests est essentielle pour garantir la collecte, le traitement et la transmission précis des données, permettant à notre système de prendre des décisions éclairées et d'assurer sa résilience face aux défis imprévus.

## Chapitre 7. Test et Résultats

Ce chapitre approfondira les différents tests que nous avons effectués pour garantir la fiabilité de notre système. Nous examinerons les tests en laboratoire, qui comprennent des essais de simulation, ainsi que des tests sur le terrain menés dans plusieurs usines à travers le Liban.

### 7.1 Test de mise à l'échelle

#### 7.1.1 Réponse fréquentielle des accéléromètres

Dans le test suivant, nous avons placé les deux accéléromètres sur le shaker. L'objectif de ce test est de tester la réponse en fréquence des deux accéléromètres, afin de s'assurer que le signal analogique émis par les capteurs est réellement utile dans leurs plages de fréquences de fonctionnement normales. Rappelons que l'ADXL 356 est utilisé comme capteur « Basse fréquence » alors que l'ADXL 1005 est utilisé comme capteur « Haute fréquence ».

Nous avons fixé individuellement les capteurs ADXL sur le cube Analog Device EVAL-XLMOUNT1, en utilisant quatre vis de 2,5\*2 mm pour chacun. Le cube, à son tour, est fixé au shaker au moyen d'une vis conventionnelle de ¼ de pouce et d'une rondelle.

Le générateur de fonctions est configuré pour produire une onde sinusoïdale pure caractérisée par la fréquence « f » et une amplitude constante de 10 V crête à crête. La connexion s'effectue via un câble coaxial blindé qui relie le générateur de fonctions à l'agitateur.

Par la suite, nous mesurons la tension crête à crête de l'onde sinusoïdale en connectant un oscilloscope à la sortie de l'accéléromètre. La connexion s'effectue via des câbles de liaison connectés à une sonde d'oscilloscope.

Étant donné que le shaker n'émet des vibrations que sur l'axe vertical, nous avons placé le capteur sur le cube afin que nous puissions lire les valeurs de l'axe vertical sur les deux accéléromètres.

Voici un schéma qui représente la connexion :

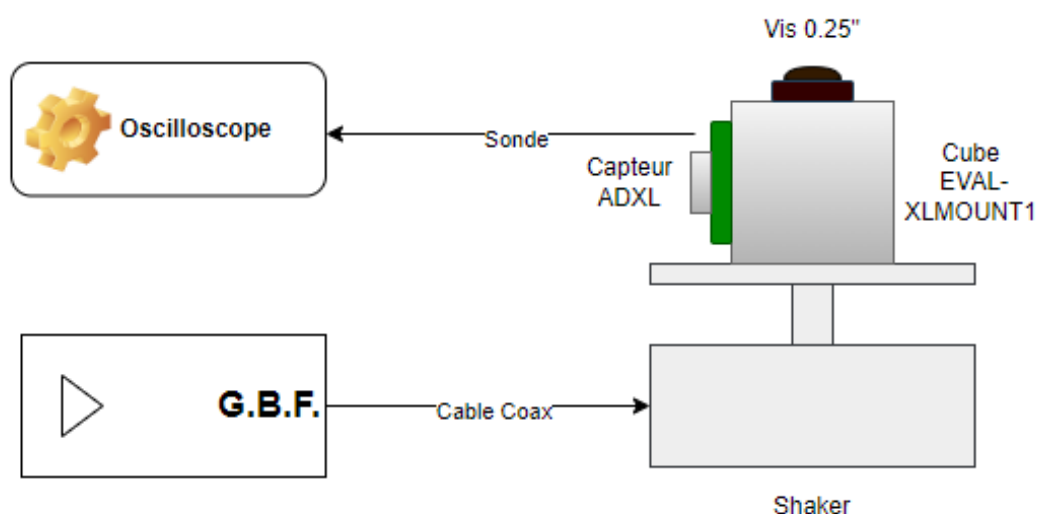


Figure 121 Configuration du test "Réponse fréquentiel des accéléromètres"



Figure 120 Test du capteur ADXL 356 sur le shaker

Voici la procédure de test :

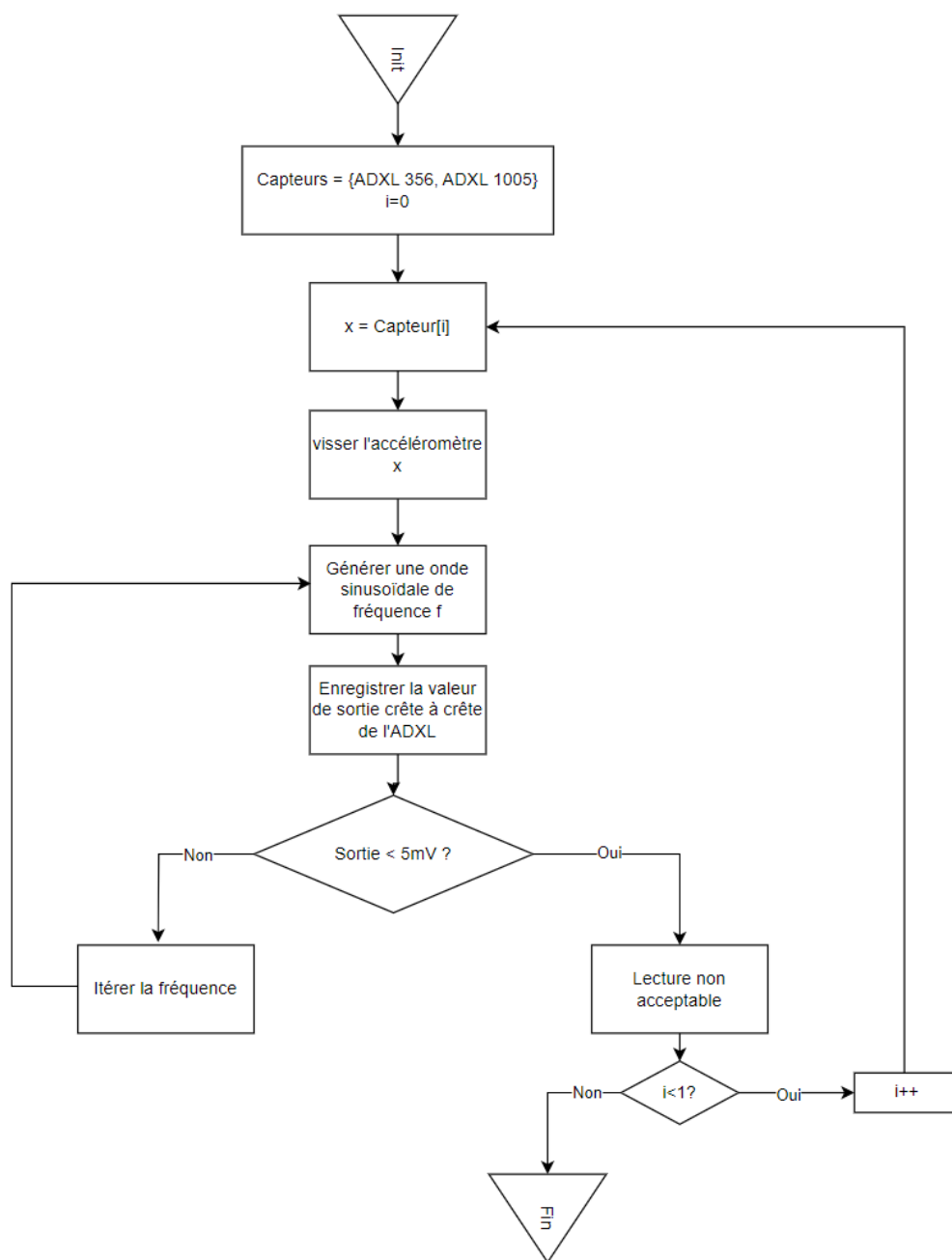


Figure 122 Procédure du test "Réponse fréquentiel des accéléromètres"

**Critères de réussite du test :** L'ADXL 356 peut lire des signaux dans la plage de basses fréquences  $< 1\,000$  Hz et l'ADXL 1005 peut lire des signaux dans la plage de hautes fréquences de  $1\,000\text{ Hz} < f < 10\,000\text{ Hz}$ .

Une fois le test exécuté sur les deux accéléromètres, nous traçons les résultats dans le graphique logarithmique suivant :



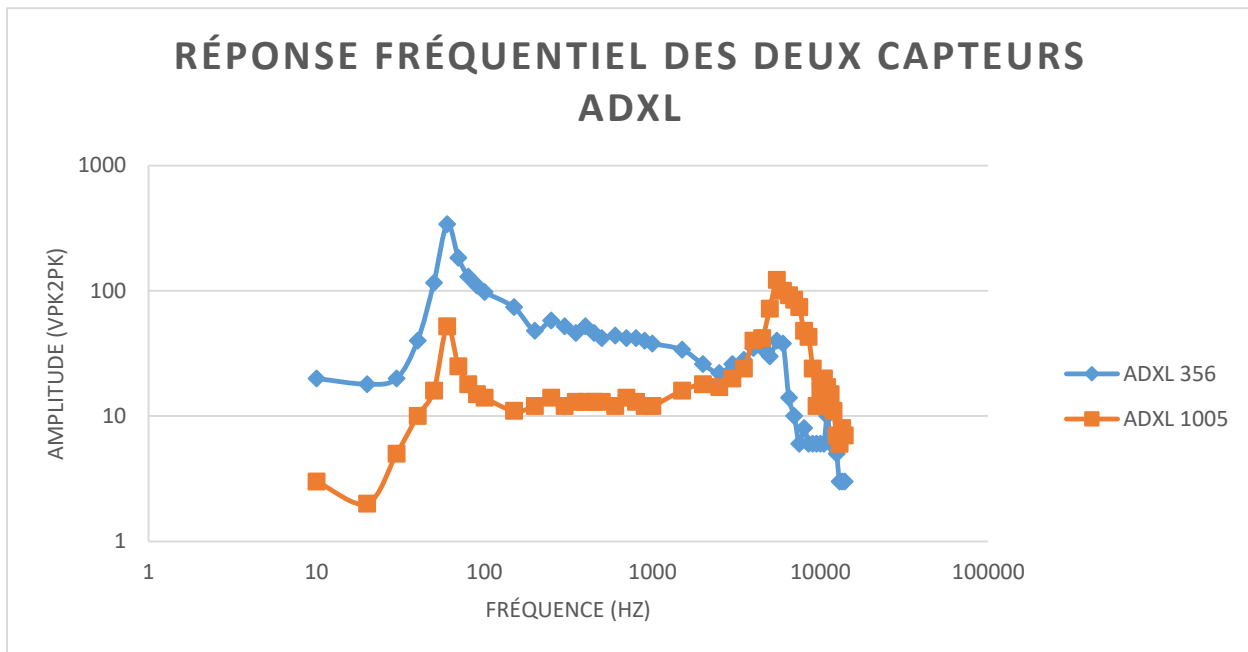


Figure 123 Résultat du test "Réponse fréquentiel des accéléromètres"

On peut voir que la sortie de l'ADXL 356 est supérieure à celle de l'ADXL 1005 pour les basses fréquences (<4500Hz). Jusqu'à ce que nous ayons un point d'inflexion autour de 6500 Hz où la sortie de l'ADXL 1005 semble être supérieure à celle de l'ADXL356.

Ces résultats montrent que l'ADXL356 peut être utilisé pour lire des fréquences dans la plage de basses fréquences <1 000 Hz que nous proposons, et que l'ADXL est capable de lire des fréquences dans la plage de hautes fréquences de 1 000 Hz < f < 10 000 Hz.

Le test est donc réussi, et nous pouvons conclure que les accéléromètres ADXL sont compatibles pour notre application.

### 7.1.2 Ondes sinusoïdales et mise à l'échelle sur différents axes

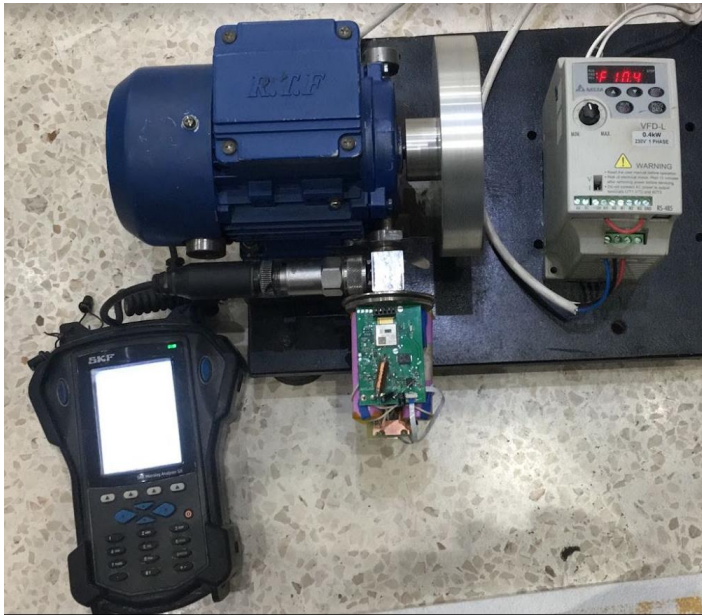


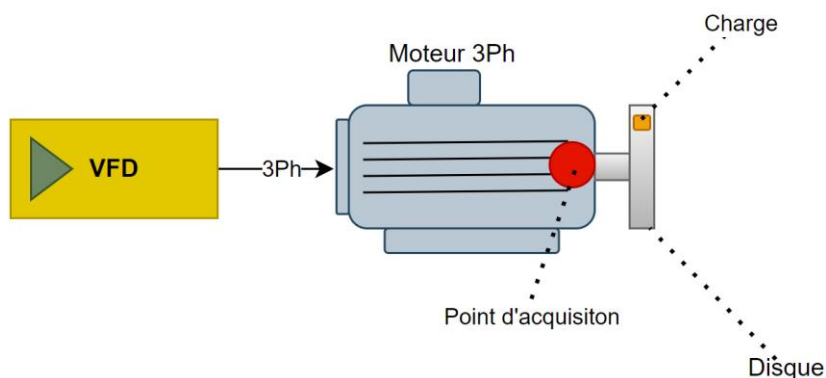
Figure 124 Test de Déséquilibre

Après avoir assemblé l'ensemble du système, toute évaluation des données doit être vérifiée auprès d'unités scientifiques. Étant donné que nous avons conçu nos propres cartes ADXL et que nous utilisons un circuit de traitement du signal analogique et numérique personnalisé dans notre système, la mise à l'échelle des valeurs doit être ajustée avant le traitement, afin d'obtenir des valeurs fiables.

Critères de réussite du test : Générez des courbes d'échelle pour les directions verticale et horizontale, pour la plage de fréquences de  $10 \text{ Hz} < f < 50 \text{ Hz}$ , pour 3 amplitudes distinctes, 3, 6 et 9 mm/s.

Pour exécuter ce test, nous avons préparé le banc de test présenté dans le chapitre précédent. Nous avons ajusté l'amplitude de la vitesse à l'aide de l'analyseur de vibrations SKF Microlog avec un accéléromètre piézoélectrique CTC calibré comme référence. Une fois l'amplitude réglée, nous acquérons des données à l'aide de notre capteur sur le même point et enregistrons l'amplitude de la fréquence fondamentale.

La figure suivante explique la configuration du test :



La procédure de test est la suivante :

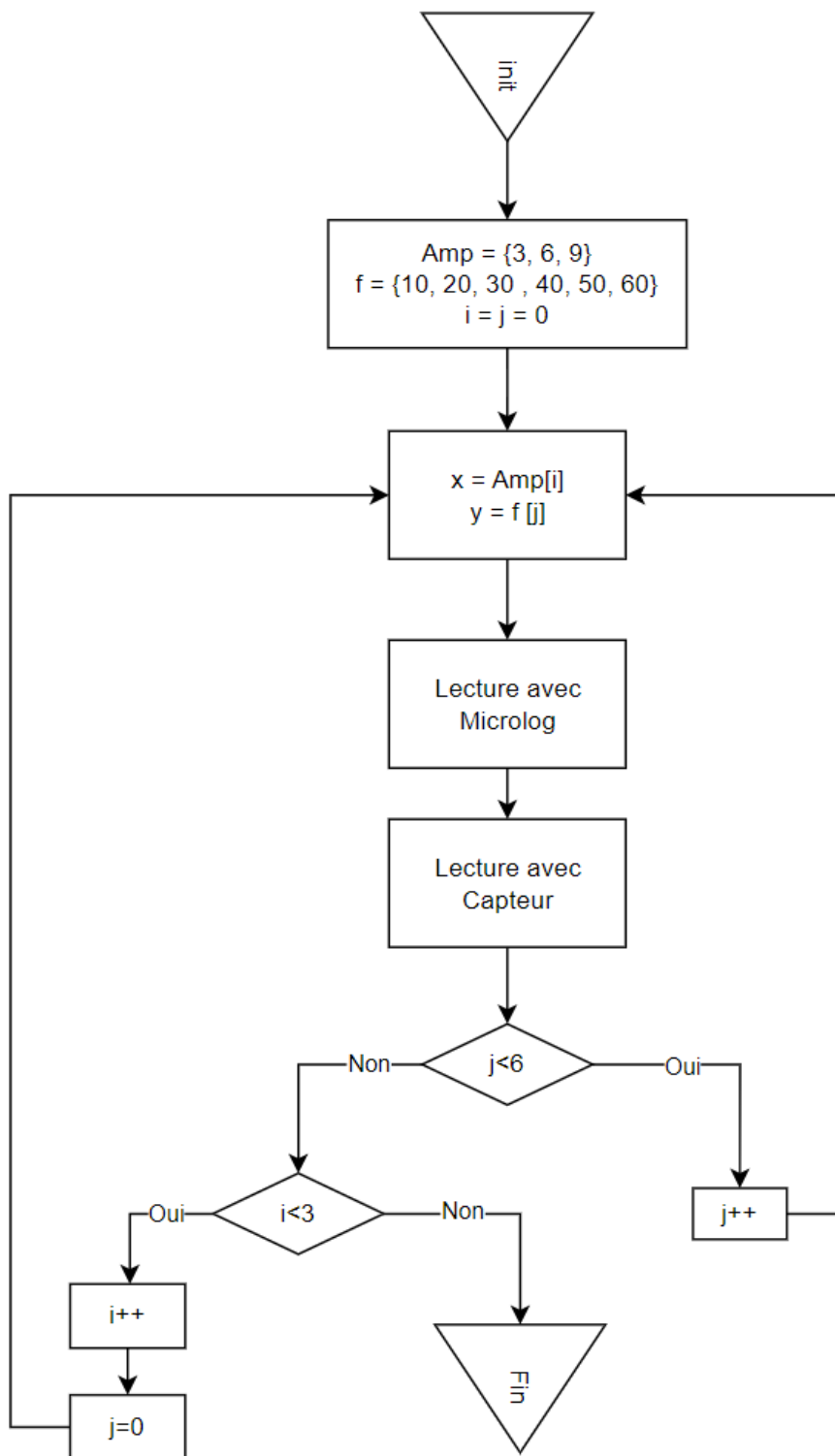


Figure 125 Procédure du test de scaling

Une fois que nous avons fini d'acquérir toutes les données, nous traçons le graphique suivant :

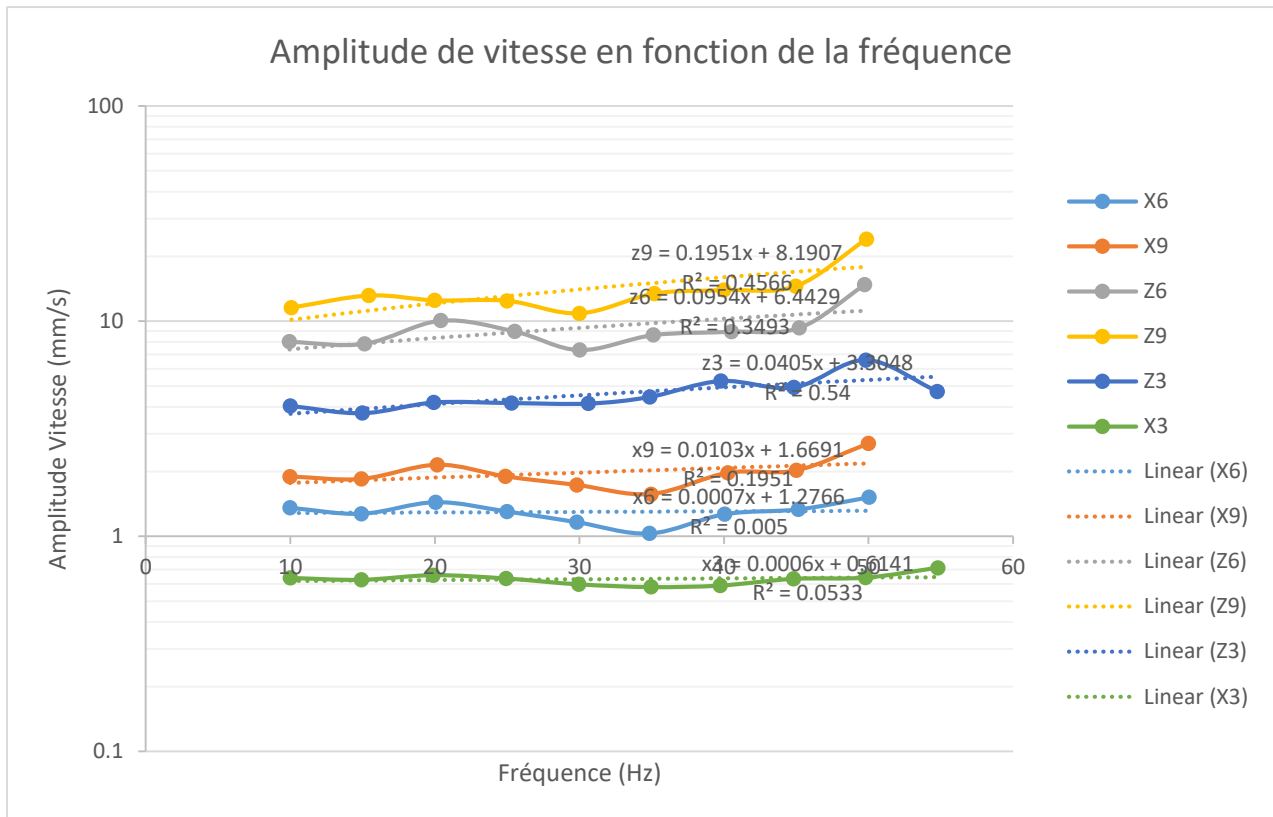


Figure 126 Résultats du test de scaling

Ce graphique montre les différentes courbes des directions horizontale et verticale. L'équation linéaire de ces courbes est calculée puis utilisée comme facteur d'échelle dans le logiciel de traitement sous Matlab.

Le même test est réalisé pour le capteur Haute Fréquence ADXL 1005, et voici le résultat :

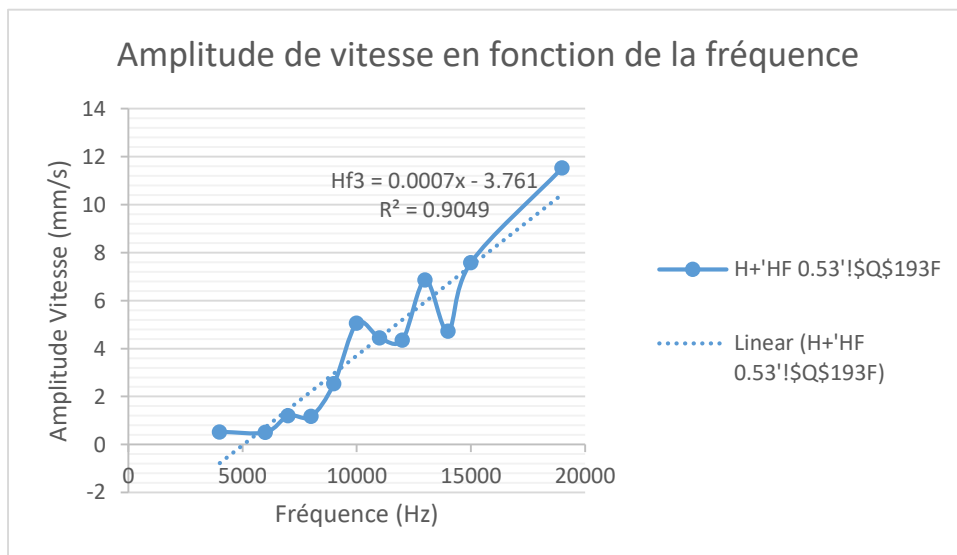


Figure 127 Résultats du test de scaling HF

### 7.1.3 Sensor vs Microlog

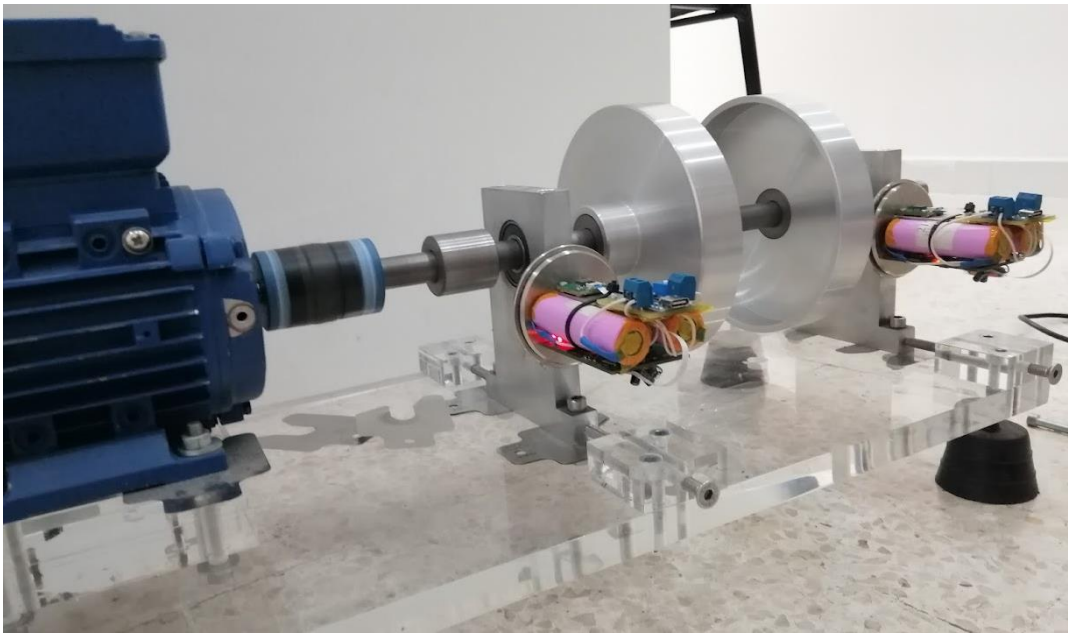


Figure 128 Test sur la machine de lab

Afin de donner un sens à l'ensemble des lectures et de tester la fidélité des valeurs que nous mesurons, nous devons effectuer un test de comparaison avec un instrument déjà calibré et certifié qui mesure les vibrations. Dans notre cas, nous utilisons le SKF Microlog.

**Critères de réussite du test :** La réponse en fréquence du capteur et du Microlog est de forme similaire.

Afin de réaliser ce test, nous avons placé deux capteurs sur le point 3 et le point 4, ou également appelés L-DE et L-NDE. Ensuite, nous itérons progressivement la fréquence d'entrée avec une charge fixe.

Le diagramme suivant représente la configuration de test :

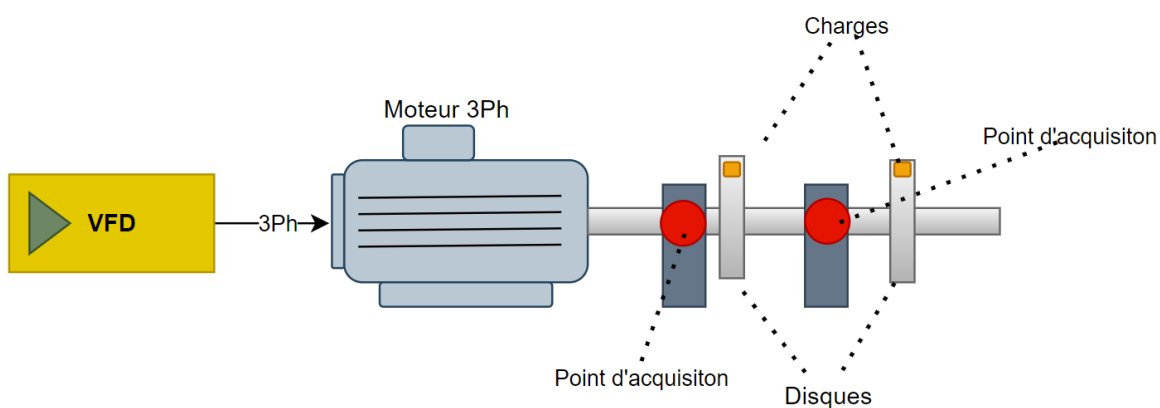


Figure 129 Figure représentant le test de Capteurs vs Microlog

Et voici la procédure de test :

Après avoir acquis tous les points de données, nous avons les deux graphiques suivants :

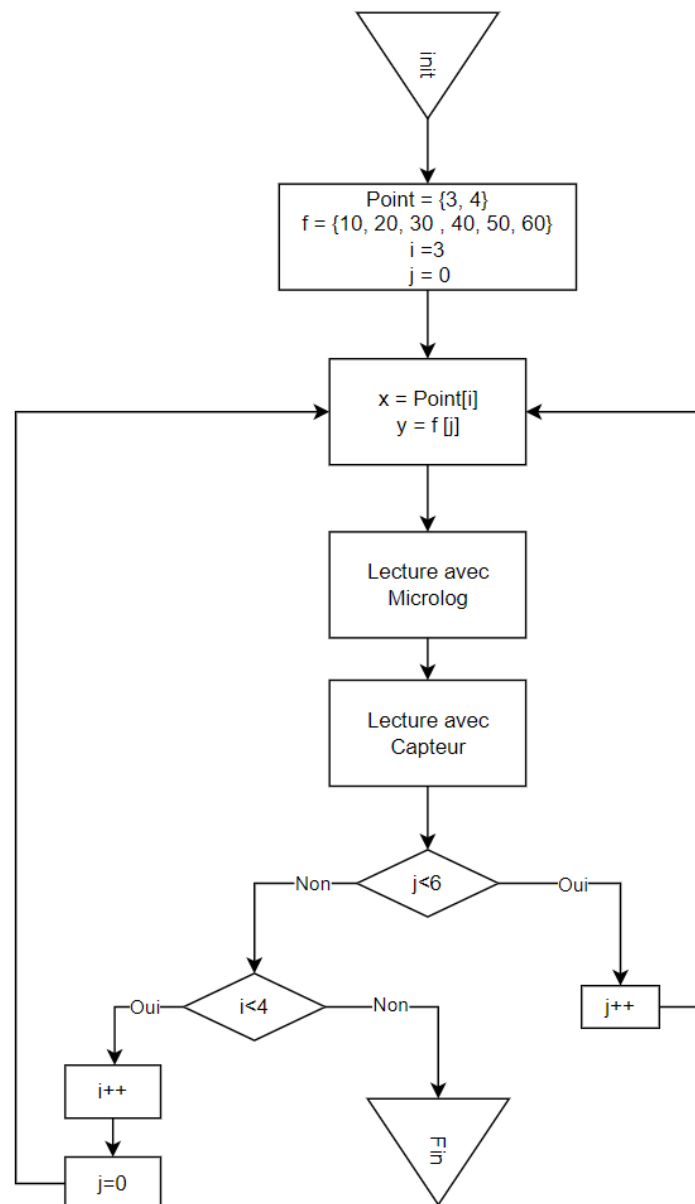


Figure 130 Procedure de test Capteur vs Microlog

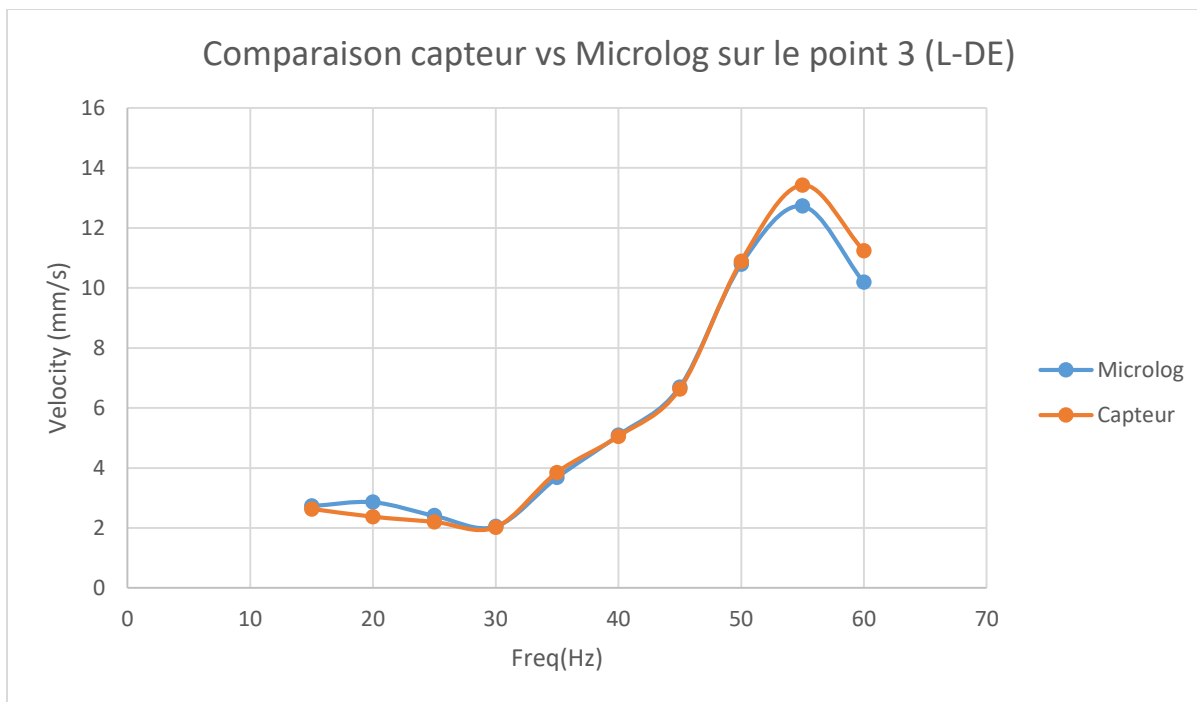


Figure 131 Résultat sur le point 3

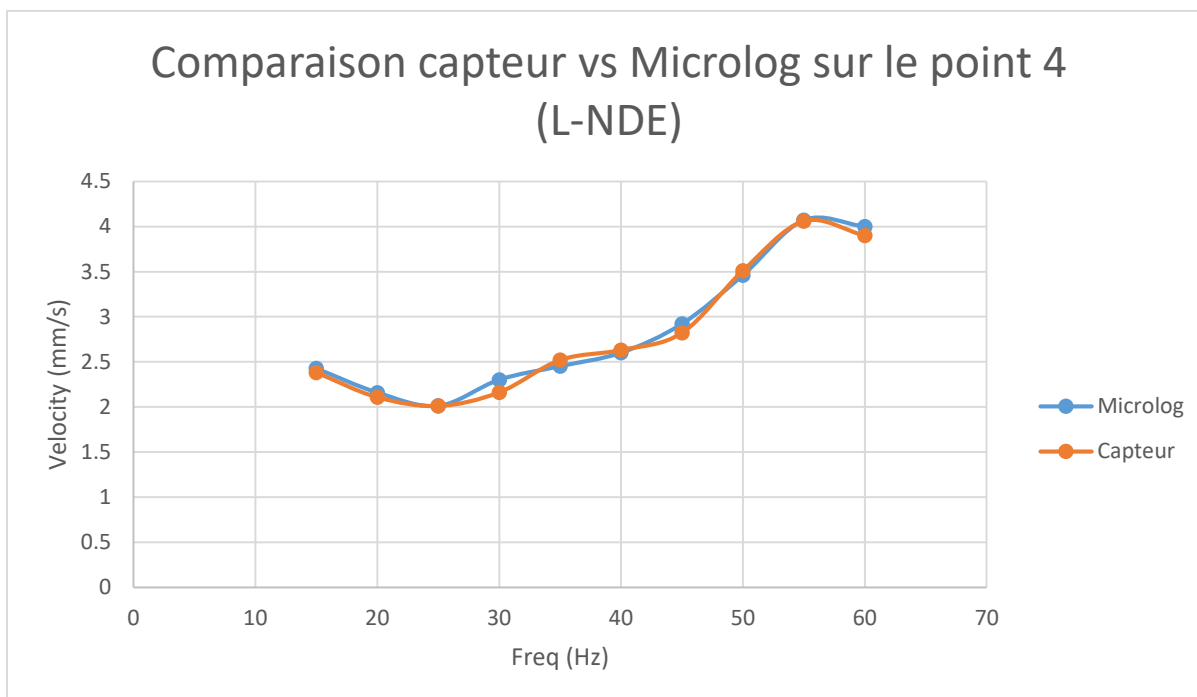


Figure 132 Résultats sur le point 4

On peut observer que les deux courbes du capteur et du Microlog sont bien alignés. Cela est pour quelques raisons mécanique car la mise d'échelle est réalisée d'où le résultat de ce test reconfirmé le résultat du test de la mise à échelle (scaling).

#### 7.1.4 Combinaison de défauts sur banc d'essai

Dans ce paragraphe, nous effectuons une série de tests, où chaque test s'attaque à la création d'un type spécifique de défaut sur la machine de test, suivi d'une brève analyse des vibrations à l'aide de nos outils.

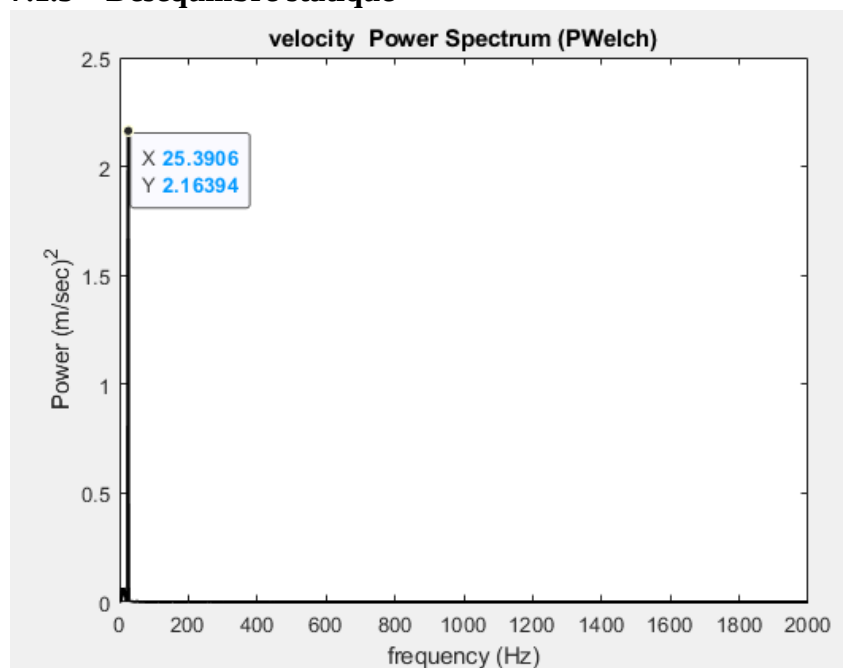


**Critères de réussite :** Le ou les défauts implicites ont été diagnostiqués.

Tableau 24 Combinaisons de défauts sur banc d'essai

| Test# | Défauts                                                                             | Notes                                        |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 1     | Machine sans problème                                                               | équilibré et aligné                          |
| 2     | Déséquilibre statique                                                               | Charge Déséquilibré sur une des deux disques |
| 3     | Déséquilibre Dynamique                                                              | Charge Déséquilibré sur les deux disques     |
| 4     | Roulement défectueuse au point 4                                                    | Défaut de BPFO                               |
| 5     | Roulement défectueuse au point 4                                                    | Défaut de BPFI                               |
| 6     | Désalignement                                                                       |                                              |
| 7     | Déséquilibre dynamique + Désalignement                                              |                                              |
| 8     | Roulement défectueuse au point 4 + Désalignement                                    | Défaut de BPFO                               |
| 9     | Roulement défectueuse au point 4 + Roulement défectueuse au point 3 + Désalignement | Défaut de BPFO sur pt4 et BPFI sur pt3       |

### 7.1.5 Déséquilibre statique



On peut observer un pic de 2.16 mm/s au fréquence 25.39 Hz, ce qui indique que le machine souffre d'un défaut de déséquilibre.

Figure 133 Résultat du test de déséquilibre statique

### 7.1.6 Déséquilibre dynamique

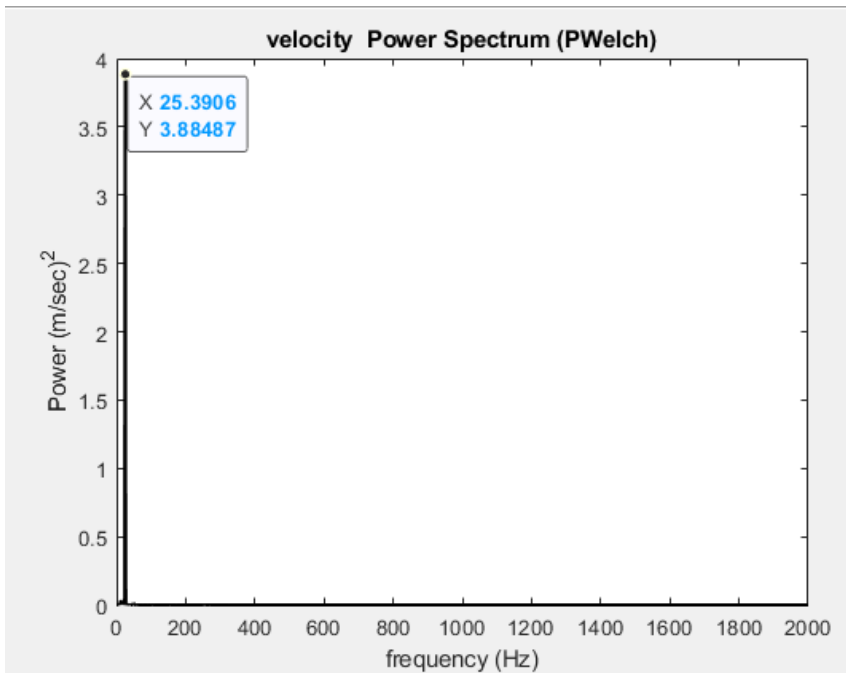


Figure 134 Résultat du test de déséquilibre dynamique

Le déséquilibre dynamique est un type plus grave de défaut de déséquilibre, ceci est clairement indiqué par l'augmentation de l'amplitude de la fréquence fondamentale.

### 7.1.7 Défaut roulement BPFO

Dans ce test, nous avons remplacé le roulement du point 4 par un roulement dont la bague extérieure est défectueuse.

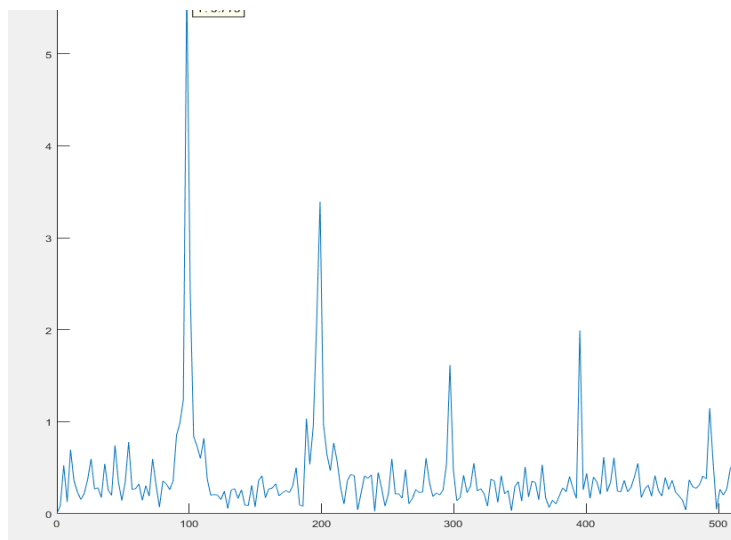


Figure 135 Resultat du test BPFO

Nous pouvons observer un pic principal vers 98 Hz, le modèle de roulement 2202 est utilisé dans notre banc d'essai. Lorsque nous parcourons la fiche technique, nous pouvons voir que le facteur de fréquence global sur l'anneau extérieur ou BPFFO est de 3,8903.

En multipliant ce facteur par la vitesse de rotation de la machine, on obtient :

$$f = BPFFO * f_{speed} = 3.8903 * 25.39 = 98.84 \text{ Hz}$$

Les autres pics sont des harmoniques de cette vibration fondamentale.

Nous pouvons comparer ce résultat avec le logiciel SKF Microlog.

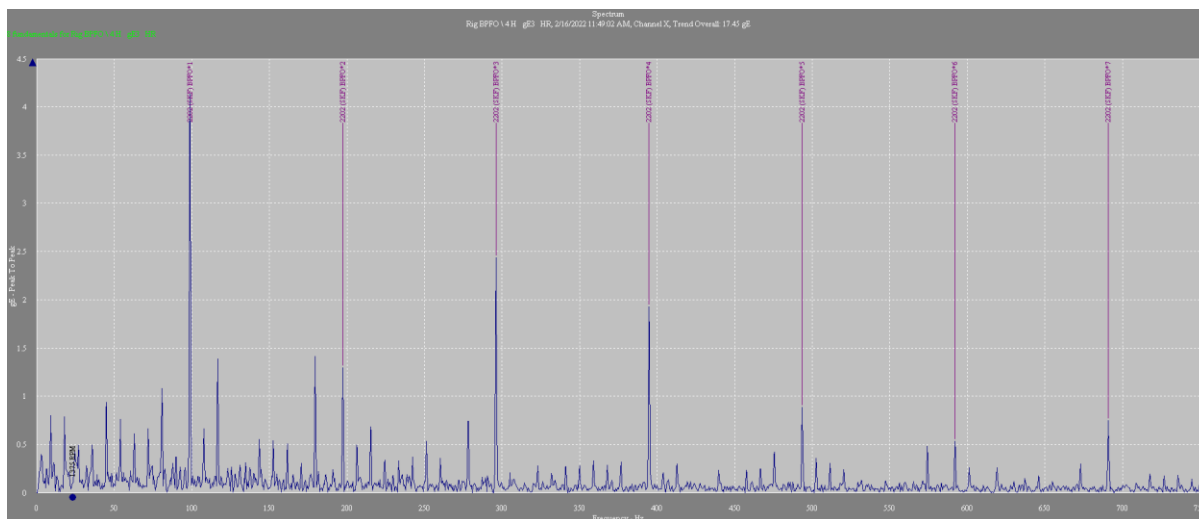


Figure 136 Comparaison avec SKF Microlog

| POINT                   | Label           | Activity Index | Harmonic | Frequency | Amplitude | Orders |
|-------------------------|-----------------|----------------|----------|-----------|-----------|--------|
| ■ Rig BPFO \ 4 H gE3 HR | 2202 (SKF) BPFO | 10.78          | 1        | 98.71     | 4.127     | 4.307  |
|                         |                 |                | 2        | 197.4     | 1.298     | 8.613  |
|                         |                 |                | 3        | 296.1     | 2.433     | 12.92  |
|                         |                 |                | 4        | 394.8     | 1.926     | 17.23  |
|                         |                 |                | 5        | 493.5     | 0.8856    | 21.53  |
|                         |                 |                | 6        | 592.3     | 0.5371    | 25.84  |
|                         |                 |                | 7        | 691       | 0.752     | 30.15  |
|                         |                 |                | -        |           |           |        |

Figure 137 Pics BPFO sur le logiciel de SKF

Les pics correspondent clairement à ceux affichés sur le SKF Microlog, c'est une indication supplémentaire que notre capteur fonctionne comme prévu.

### 7.1.8 Défaut roulement BPFI

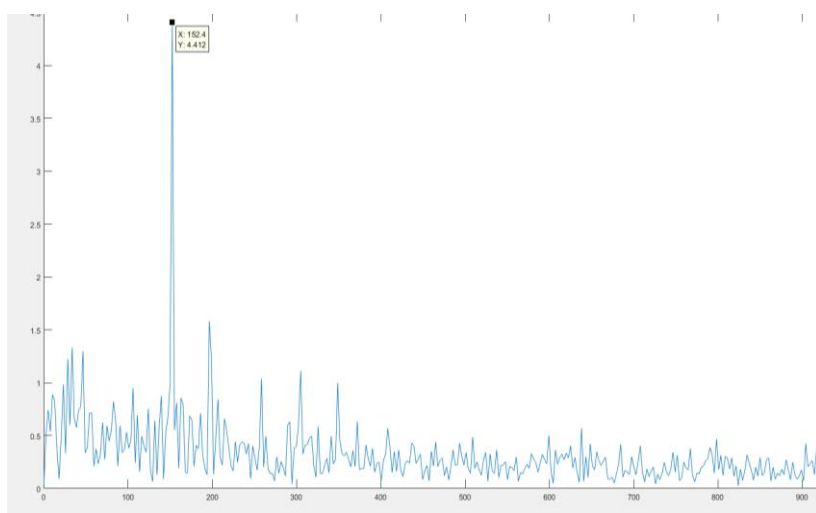


Figure 138 Resultat du test de BPFI

Dans ce test, nous avons remplacé le roulement du point 4 par un roulement dont la bague intérieure est défectueuse.

On distingue clairement un pic vers 152 Hz. Le roulement utilisé est également un roulement de type 2202, et selon sa fiche technique, son facteur BPFFI est de 6,1097.

$$f = BPFFI * f_{speed} = 6.1097 * 25 = 152.74 \text{ Hz}$$

Cette fréquence correspond à la fréquence BPFI, on peut donc conclure qu'il s'agit d'un défaut de roulement.

## 7.1.9 Désalignement

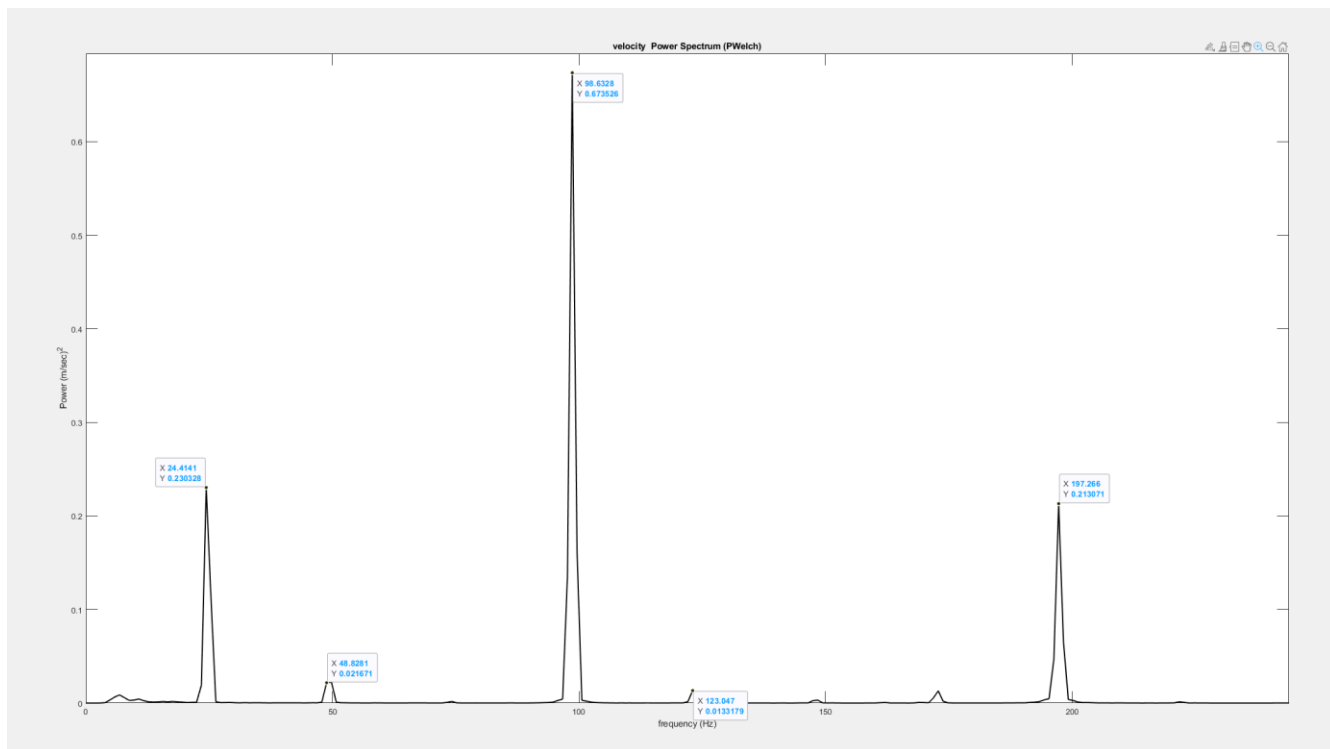


Figure 139 Résultat du test de désalignement

Afin de créer un désalignement, nous avons déplacé les boîtiers de roulements selon un désalignement vertical et horizontal. Dans ce test, nous pouvons voir qu'il y a un pic dans les harmoniques de la vitesse de rotation fondamentale, ce qui est un exemple clair de défaut d'alignement dans l'analyse des vibrations.

### 7.1.10 Déséquilibre et désalignement

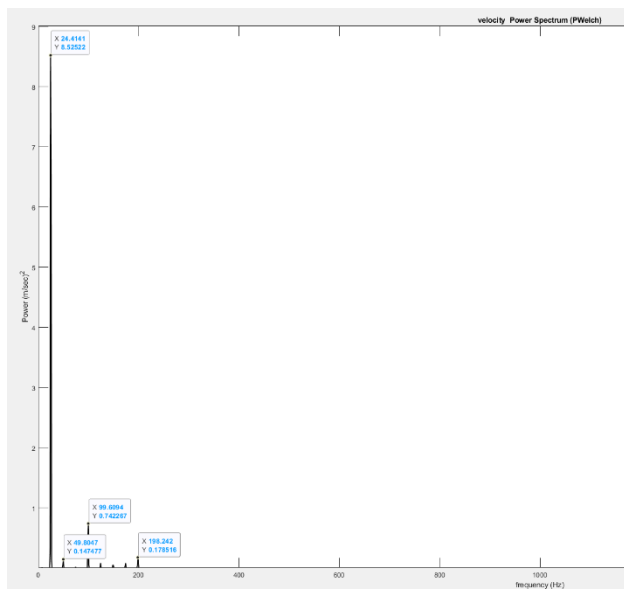
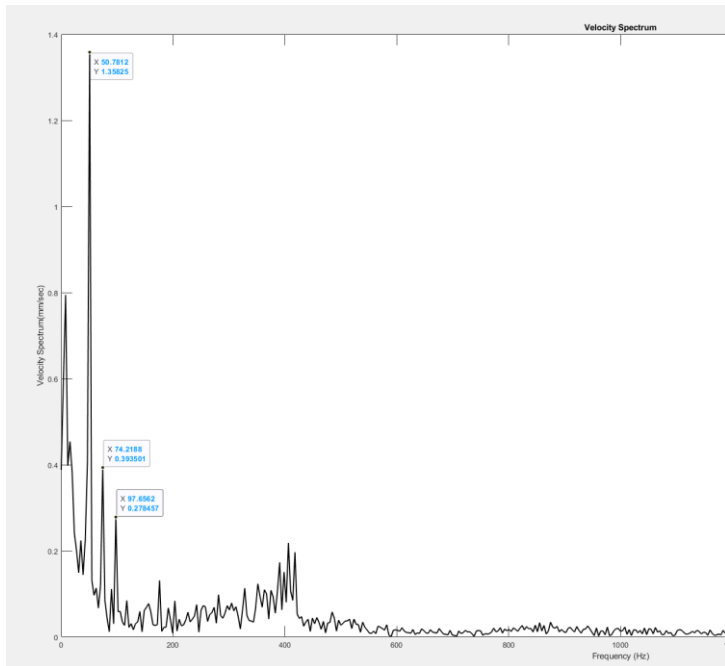


Figure 140 résultat du test de désalignement + déséquilibre

On voit bien que le balourd Dynamique gêne les pics d'harmoniques provoqués par le désalignement, puisque l'amplitude dominante provient principalement du défaut de balourd.

### 7.1.11 BPFO + Désalignement



Nous pouvons voir le pic BPFO et le désalignement provoqué par les harmoniques.

Figure 141 Résultats du tests de BPFO + Désalignement

7.1.12

7.1.13

### 7.1.14 BPFO + BPFI + Désalignement

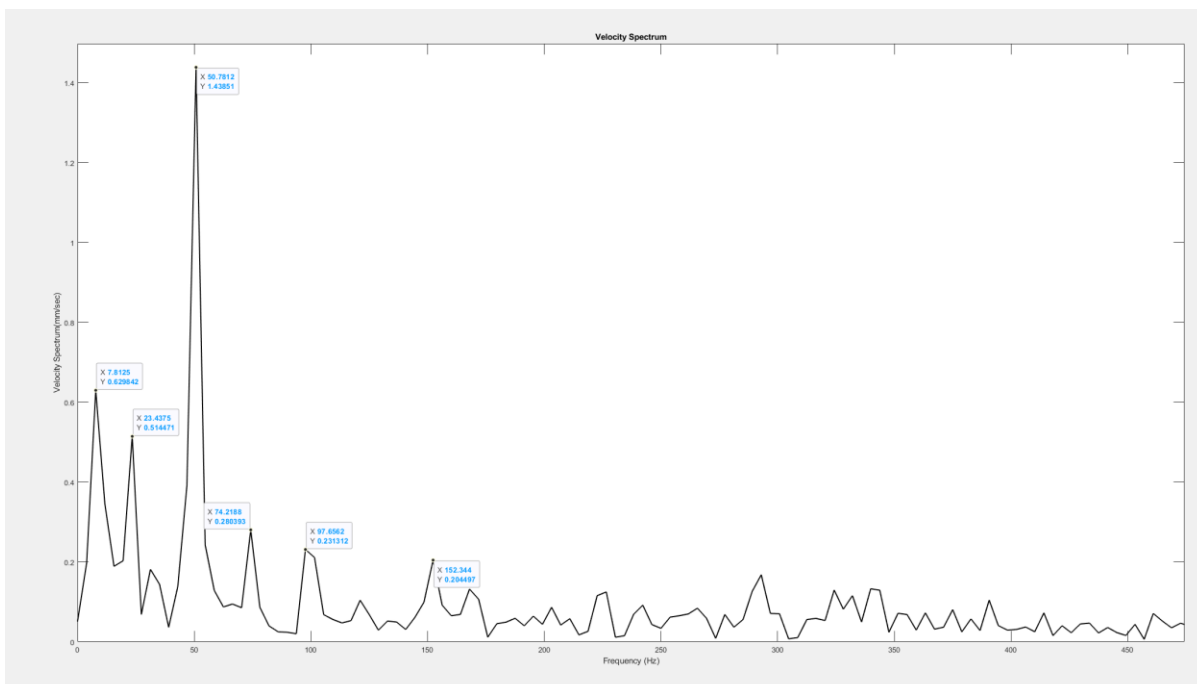


Figure 142 Résultats du test de BPFO +BPFI + Désalignement

Voici les deux pics BPFO et BPFI et on peut également repérer les harmoniques de fréquence fondamentales. Puisqu'il y a un pic correspondant aux alentours de 100 Hz, entre le BPFO et la 2ème harmonique on obtient alors un pic beaucoup plus prononcé. Nous pouvons conclure du test en laboratoire que notre capteur est plus que capable de diagnostiquer les défauts.

Tableau 25 Résumé des résultats des tests "Combinaison des défauts"

| Test# | Défauts                                                                             | Résultat |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1     | Machine sans problème                                                               | Réussit  |
| 2     | Déséquilibre statique                                                               | Réussit  |
| 3     | Déséquilibre Dynamique                                                              | Réussit  |
| 4     | Roulement défectueuse au point 4                                                    | Réussit  |
| 5     | Roulement défectueuse au point 4                                                    | Réussit  |
| 6     | Désalignement                                                                       | Réussit  |
| 7     | Déséquilibre dynamique + Désalignement                                              | Réussit  |
| 8     | Roulement défectueuse au point 4 + Désalignement                                    | Réussit  |
| 9     | Roulement défectueuse au point 4 + Roulement défectueuse au point 3 + Désalignement | Réussit  |

## 7.2 Field tests

### 7.2.1 Sicomo

#### 7.2.1.1 Machine 1 : Ventilateur industriel

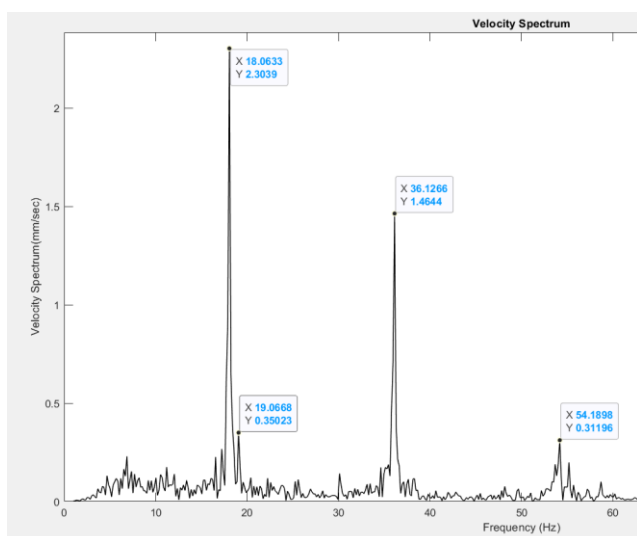


Figure 143 Resultat du Field test Sicomo

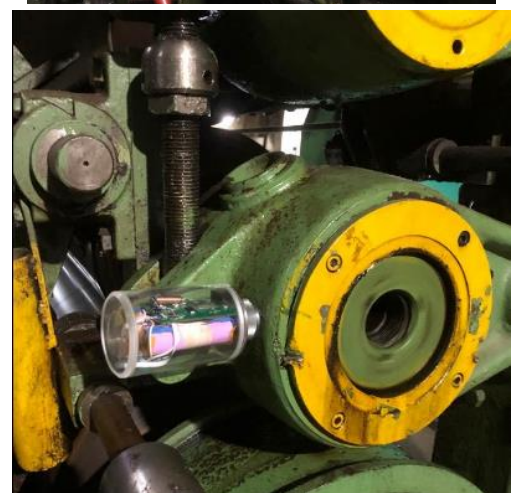


Figure 144 Capteur version 3 sur un boîtier de roulement dans l'usine de carton Sicomo

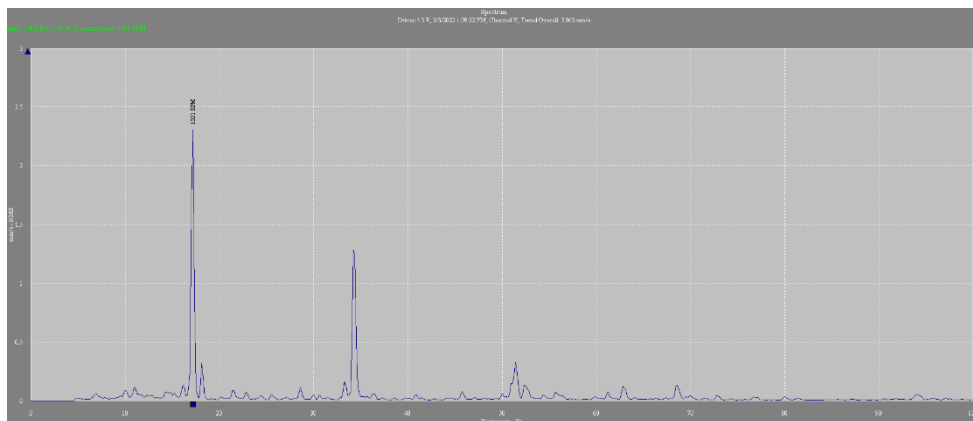


Figure 145 Comparaison des résultats avec le Microlog SKF

### 7.2.1.2 Machine 2 : Cylindre

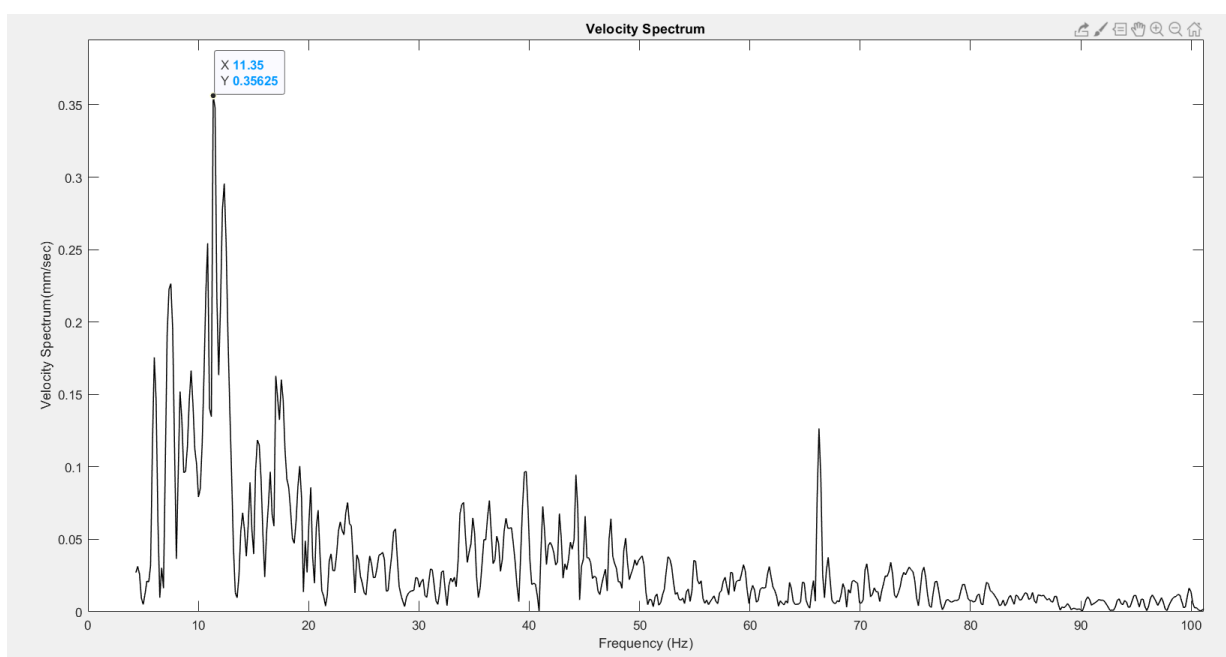


Figure 147 Spectre de vitesse acquis d'un cylindre dans l'usine de Sicomo

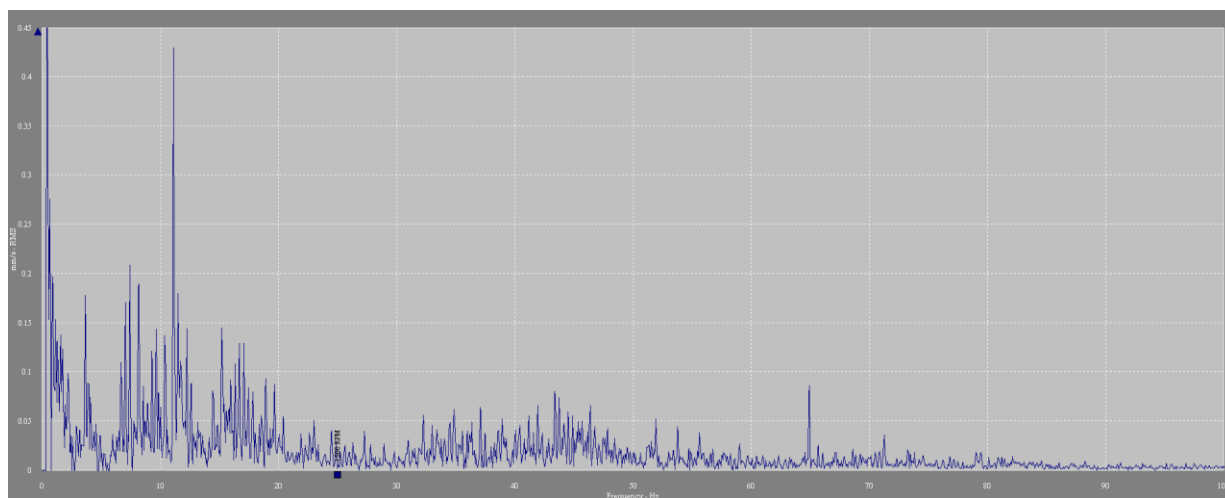


Figure 146 Comparaison des résultats spectral avec celle du SKF Microlog



## 7.2.2 Cimenterie National : Test de Stress

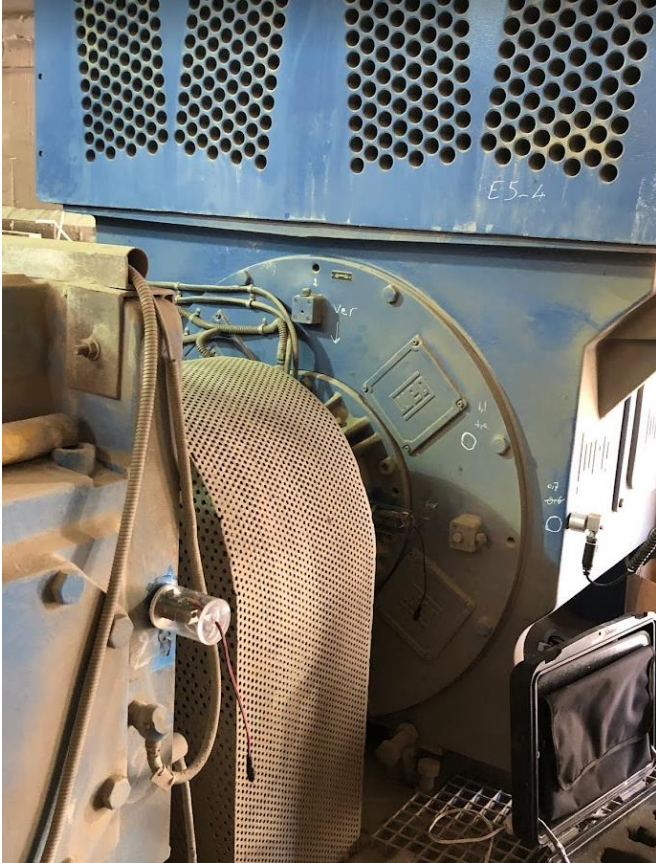
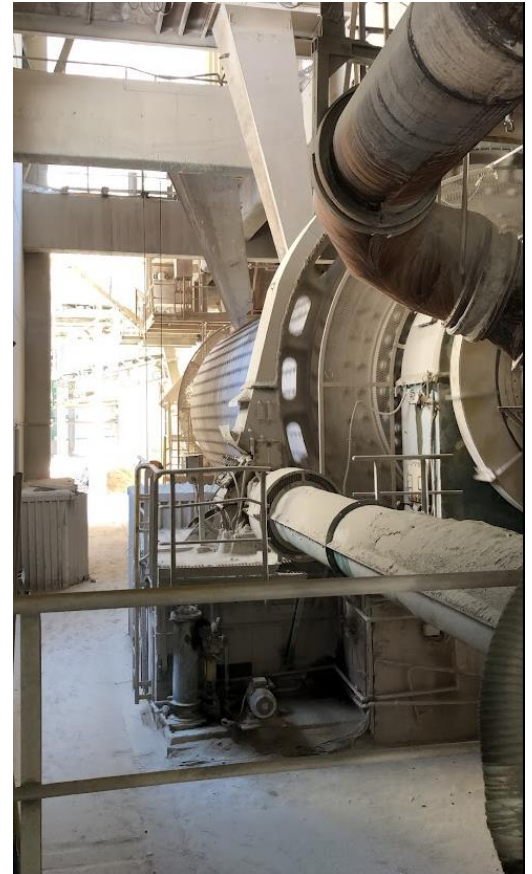


Figure 148 Capteur version 3 modifié sur le boîtier d'engrainage d'une machine au Cimenterie Nationale



Le Cimenterie National est le plus grand fabricant de ciment au Liban. Le département des cimenteries est l'un des principaux départements d'une cimenterie où le clinker produit, mélangé à des additifs tels que du gypse, du calcaire pur et du laitier granulé de haut fourneau, est broyé à un faible degré de finesse pour produire la poudre de couleur grise connue sous le nom de Ciment. La ligne de production particulière produit jusqu'à 400 tonnes/heure au total. Faisant ainsi de cette machine une zone de test idéale pour notre système de maintenance prédictive, pour deux raisons principales :

- L'environnement difficile d'une ligne de production de ciment fait de cette usine une industrie lourde par rapport aux autres lignes de production, ce qui en fait un excellent environnement pour effectuer un test de résistance.
- La machine particulière que nous surveillons est l'un des deux broyeurs à boulets similaires que l'usine utilise pour fabriquer son produit, et le composant particulier de la machine est une boîte de vitesses suspectée d'être défectueuse. Ainsi le service de condition monitoring a été proposé à la Cimenterie Nationale à l'aide de deux de nos capteurs, montés sur deux points de cette boîte de vitesses.

Maintenant que le Cimenterie National est un client de longue date d'IOSS, vous pourriez vous demander pourquoi le client voudrait essayer nos capteurs au lieu d'un service régulier d'analyse des vibrations que l'entreprise demande depuis une dizaine d'années. Car dans ce cas particulier, la boîte de vitesses émettait de très légères vibrations, ce qui n'indique aucun défaut de la boîte de vitesses. Mais la chaîne de production étant de cette taille, une maintenance très précise est nécessaire en raison des coûts de réparation extrêmement élevés, sans parler des coûts d'immobilisation. Un système de surveillance 24h/24 et 7j/7 peut

particulièrement résoudre ce problème, car les données sont collectées et comparées à un rythme régulier et pas seulement discrètement à un moment précis.

Maintenant que nous avons une idée du pourquoi, nous pouvons maintenant nous pencher sur le comment.

La configuration se compose de quelques composants supplémentaires distincts du système de maintenance prédictive, nous avons placé un routeur Wi-Fi et une passerelle IOT dans un boîtier scellé et ventilé placé à proximité de la machine. L'ensemble du système a été connecté au système UPS, de sorte qu'aucune interruption due à une coupure de courant ne puisse se produire.

La fréquence d'acquisition est fixée à 1 acquisition de données par heure. Cela permet de surveiller le système avec une grande précision, en cas de légers changements.

Nous avons placé deux capteurs de chacun des maillages d'engrenages d'entrée et de sortie. Voici les paramètres machine qui nous intéressent :

Tableau 26 Paramètres du machine étudié

| Paramètre | Value        | Description                                                  |
|-----------|--------------|--------------------------------------------------------------|
| RPM       | 16.74<br>Hz  | Rotation speed of the induction motor in Hz                  |
| GMF1      | 53.66<br>Hz  | Gear mesh 1 frequency                                        |
| GMF2      | 108.32<br>Hz | Gear mesh 2 frequency                                        |
| GMF3      | 484.7<br>Hz  | Gear mesh 3 frequency                                        |
| BPFO1     | 7.056        | Bearing overrolling outer ring frequency 1                   |
| BPFI1     | 8.94         | Bearing overrolling inner ring frequency 1                   |
| BSF1      | 4.19         | Bearing overrolling cage frequency 1                         |
| FTF1      | 0.441        | Speed factor of rolling element set for rotating outer ring1 |
| BPFO2     | 3.565        | Bearing overrolling outer ring frequency 2                   |
| BPFI2     | 5.434        | Bearing overrolling inner ring frequency 2                   |
| BSF2      | 2.303        | Bearing overrolling cage frequency 2                         |
| FTF2      | 0.396        | Speed factor of rolling element set for rotating outer ring2 |
| BPFO3     | 6.21         | Bearing overrolling outer ring frequency 3                   |
| BPFI3     | 8.78         | Bearing overrolling inner ring frequency 3                   |
| BSF3      | 2.66         | Bearing overrolling cage frequency 3                         |
| FTF3      | 0.41         | Speed factor of rolling element set for rotating outer ring3 |

Comme tout objet du monde physique, tous les mouvements provoquent des vibrations à une fréquence spécifique. Ainsi, en nous référant à ces paramètres, nous pouvons diagnostiquer la partie exacte du composant défectueux.

Le spectre suivant nous montre qu'il existe deux pics principalement visibles. Les GMF1 et GMF2 culminent respectivement à 54 Hz et 108 Hz.

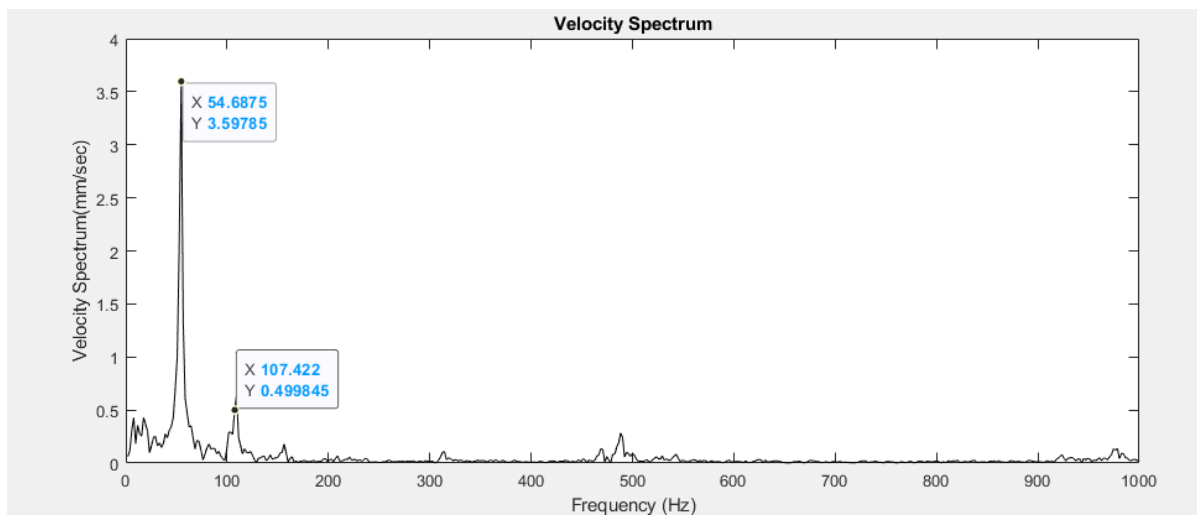


Figure 149 Spectre résultant

Dans les graphiques suivants, nous avons tracé les valeurs RMS de ces deux pics et tracé leur tendance dans les fichiers de données.

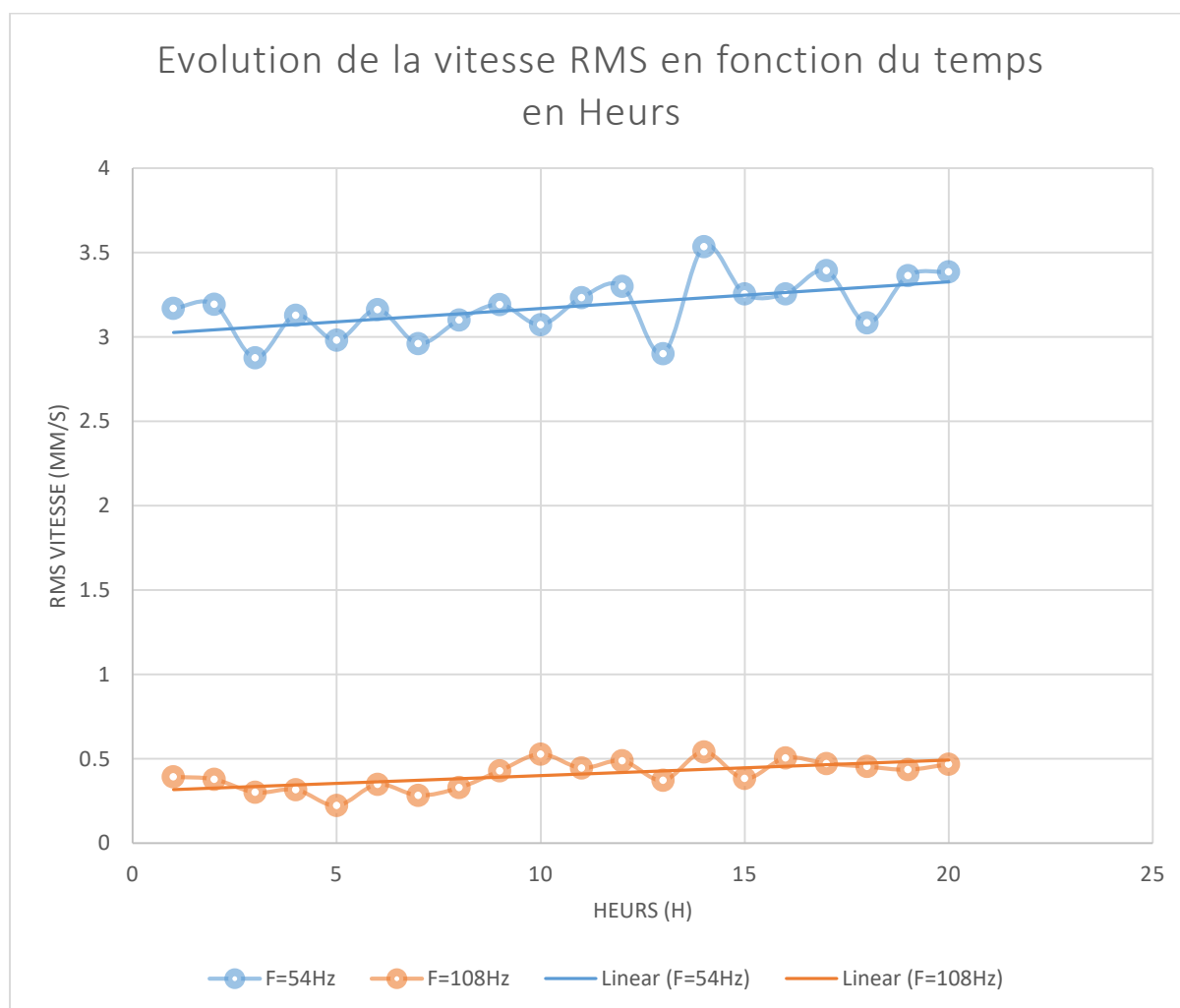


Figure 150 Résultats de tendance du RMS de vitesse des deux GMFs

Nous pouvons constater en si peu de temps que les engrenages de la boîte de vitesses génèrent tous deux des quantités de vibrations progressivement plus élevées, clairement indiquées par la courbe linéaire.



Cela indique donc que la santé des deux engrenages se détériore, car il y a eu une contamination ou un manque de lubrifiant de la boîte de vitesses qui a provoqué un frottement supplémentaire et un grincement des dents de ces deux engrenages, ce qui a affecté les tolérances de la boîte de vitesses.

### 7.2.3 Autres tests sur le terrain

#### 7.2.3.1 Masterpak - Sanita

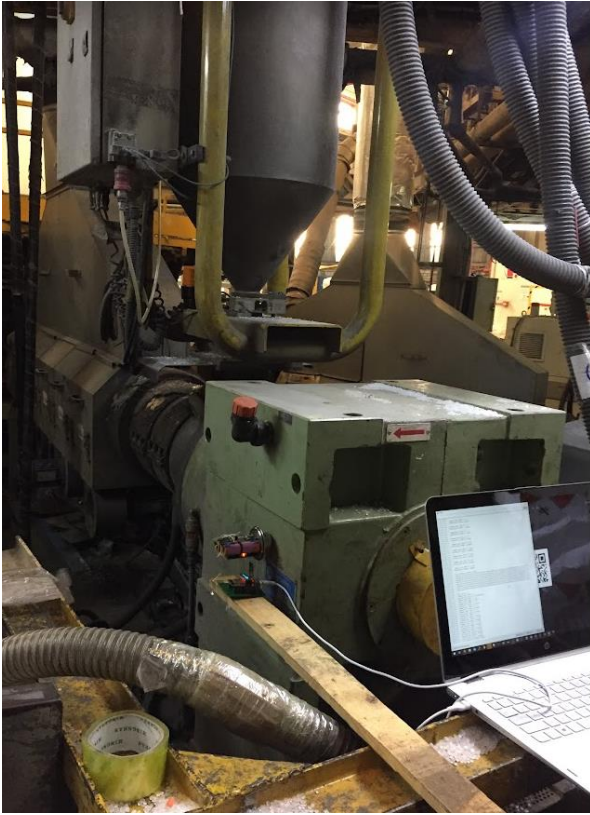


Figure 151 Acquisition de données avec le capteur version 2.5

Un test sur le terrain a été effectué chez Masterpak-Sanita, en utilisant l'une des versions antérieures de notre capteur.

La machine à tester était la « Vis A du moteur principal Agriline », dotée d'une boîte de vitesses récemment remplacée. Le service a été demandé afin de vérifier d'éventuelles anomalies de la machine et de s'assurer que la boîte de vitesses nouvellement échangée fonctionnait correctement.

Pour notre capteur, il s'agissait du premier test sur le terrain réalisé sur une boîte de vitesses dans un tel environnement. Il nous suffisait donc de nous assurer que les données étaient correctement acquises et transférées.

Lors des tests, le capteur a souffert d'un problème de connectivité constant, ce qui a provoqué la déconnexion du capteur de la passerelle IOT pendant le transfert de données. Nous avons découvert plus tard qu'il s'agissait d'un problème de portée. Après un diagnostic approfondi de l'ensemble du système, il a été identifié les deux causes de ce problème :

1. Interférences causées par les machines environnantes, qui ont provoqué une plage de transmission exceptionnellement basse.
2. La couche de terre du PCB du capteur et le châssis métallique du capteur se trouvent à proximité immédiate de l'antenne Bluetooth 4.0.

Pour résoudre ces deux problèmes, les versions ultérieures ont utilisé BLE 5.0 qui offre une portée de transmission allant jusqu'à 100 m dans un espace ouvert, et des modifications de conception matérielle ont été introduites pour supprimer la couche de terre sous l'antenne BLE et raccourcir le châssis afin qu'il ne bloque pas l'antenne.

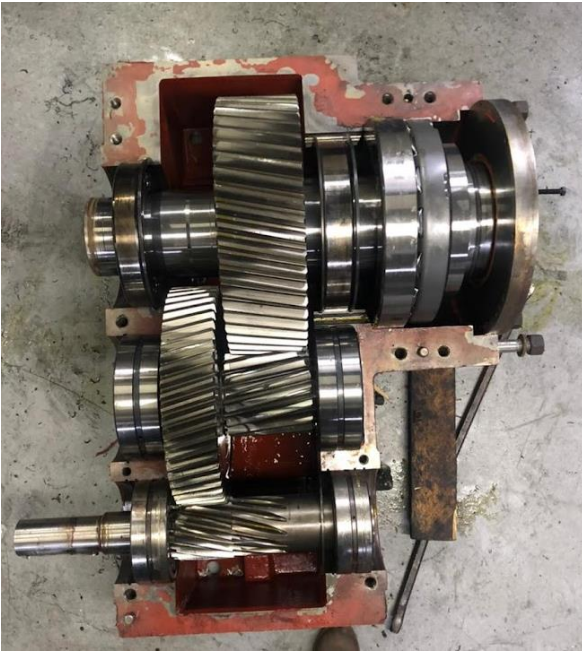


Figure 152 Boite d'engrainage défectueuse chez Masterpak

Après avoir testé de manière approfondie la nouvelle version du capteur avec les modifications mises en œuvre, nous avons effectué le même test sur la même machine chez Masterpak et les résultats ont été positifs.

#### 7.2.3.2 Cimenterie de Sibline

D'autres tests ont été réalisés sur des sites tels que la Cimenterie de Sibline et le City Mall. Bien que ces tests aient été effectués sur une version antérieure, ils ont largement contribué à de nombreuses modifications du système qui ont façonné notre version de production actuelle.



Figure 153 Machine étudié chez Cimenterie de Sibline



### 7.2.3.3 CityMall

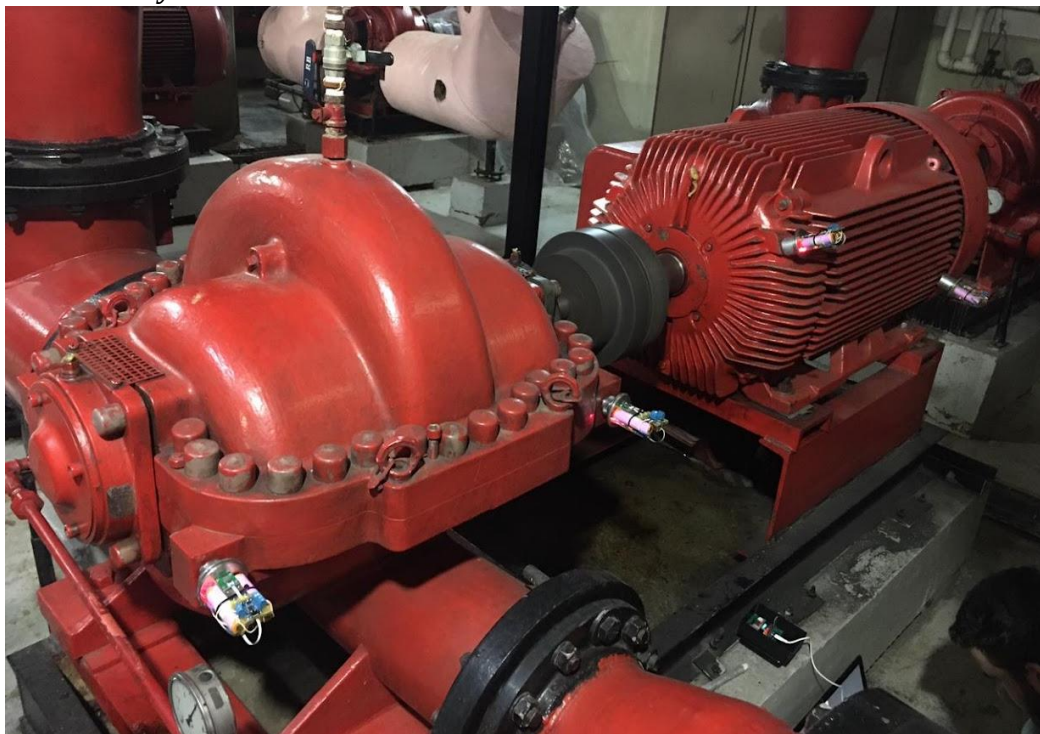
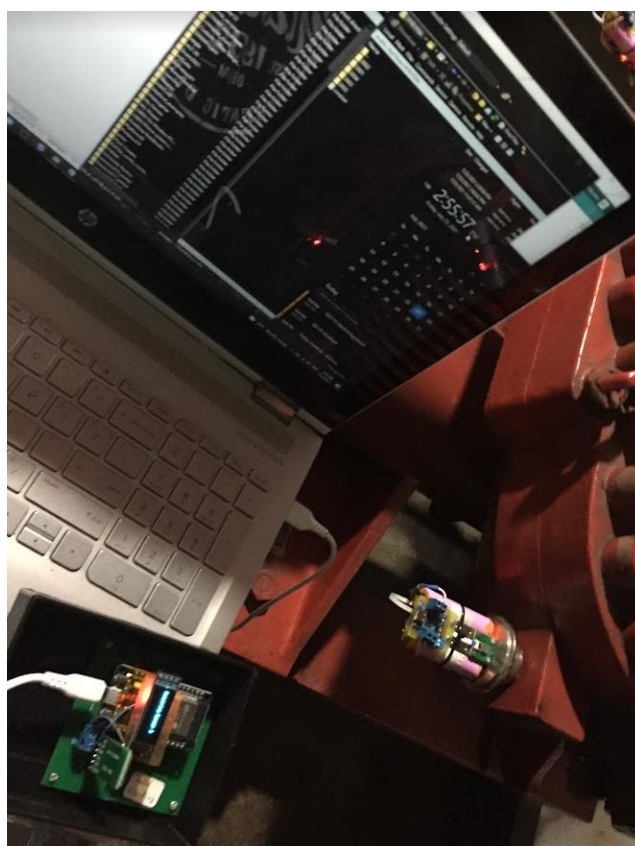
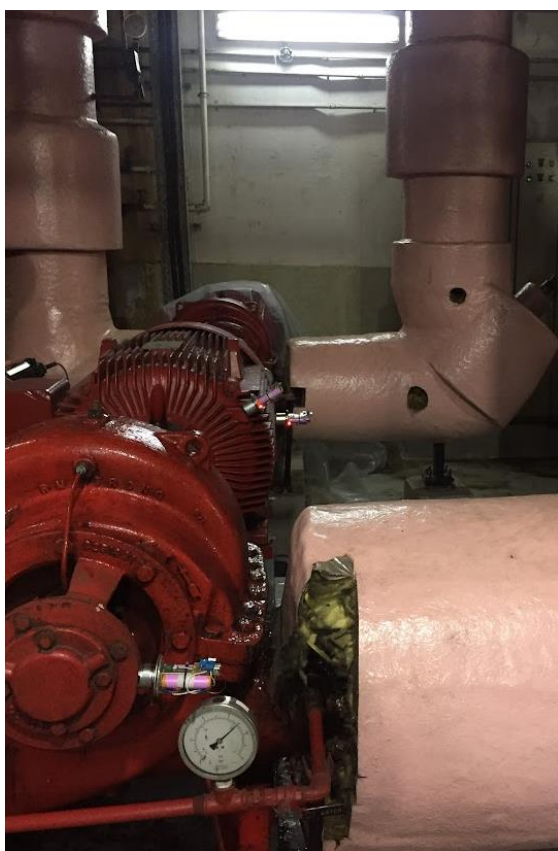


Figure 154 Machines étudiés chez CityMall



### 7.3 Test de batterie

Comme nos capteurs fonctionnent sur batterie, il était impératif pour nous d'approfondir la consommation électrique des capteurs de bord. Pour commencer notre exploration, nous nous sommes d'abord penchés sur les différents modes d'alimentation fournis par les API PSOC.

Tableau 27 Différents mode de puissance sur le PSOC 6

| Opération # | Consommation de courant (mA) | Power mode                | LED          |
|-------------|------------------------------|---------------------------|--------------|
| 3           | 7.63                         | System LP and CPU active  | Blink rapide |
| 4           | 3.43                         | System LP and CPU sleep   | Allumé       |
| 5           | 7.61                         | System LP and CPU active  | Blink rapide |
| 6           | 0.007                        | System Hibernate          | désactivé    |
| 7           | 7.61                         | System LP and CPU active  | Blink rapide |
| 8           | 3.89                         | System ULP and CPU active | Blink lente  |
| 9           | 2.13                         | System ULP and CPU sleep  | Atténué      |
| 10          | 3.89                         | System ULP and CPU active | Blink lente  |
| 11          | 0.007                        | System Hibernate          | désactivé    |
| 12          | 7.63                         | System LP and CPU active  | Blink rapide |

La mise en veille prolongée du système a été le mode d'alimentation choisi pendant le mode veille, car nous n'avons besoin d'aucun périphérique éteint lorsque ce mode est activé. De plus, le capteur pourrait être réveillé à distance grâce à une interruption externe offerte par le module BLE.

Nous avons donc effectué des tests de puissance pour mesurer la consommation électrique de chaque composant du capteur et calculer la durée de vie estimée de la batterie en cas d'association avec une batterie lithium-ion rechargeable 18650 ou une batterie lithium CR 123 non rechargeable.

Tableau 28 Consommation de puissance des différents composants utilisé dans le capteur

| Composant | état   | Consommation (mA) | Temps Active (par cycle) | Cycles par heure | Temps total (h) | Activité (h) | Consommation (mAh) | Consommation (mAh/jour) |
|-----------|--------|-------------------|--------------------------|------------------|-----------------|--------------|--------------------|-------------------------|
| Psoc      | Active | 2.00              | 0.06                     | 0.04             | 24.00           | 0.06         | 0.01               | 0.00                    |
| ADXL1005  | Active | 1.00              | 0.06                     | 0.04             | 24.00           | 0.06         | 0.00               | 0.00                    |
| ADXL356   | Active | 0.15              | 0.06                     | 0.04             | 24.00           | 0.06         | 0.00               | 0.00                    |
| Psoc      | Sleep  | 0.01              | 0.94                     | 0.04             | 0.00            | 23.94        | 0.01               | 0.17                    |
| ADXL1005  | Sleep  | 0.00              | 0.94                     | 0.04             | 0.00            | 23.94        | 0.00               | 0.00                    |
| ADXL356   | Sleep  | 0.00              | 0.94                     | 0.04             | 0.00            | 23.94        | 0.00               | 0.00                    |

Après les tests, nous avons obtenu les calculs suivants :



Tableau 29 Estimation de la durée de vie du pile du capteur

|                                             |                   |
|---------------------------------------------|-------------------|
| <b>Capacité du pile* (mAh)</b>              | 1000              |
| <b>Consommation moyenne par heure (mAh)</b> | 0.0316075         |
| <b>Consommation total par jour (mAh)</b>    | 0.75858           |
| <b>Durée de vie (h)</b>                     | 31638.06059       |
| <b>Durée de vie (J)</b>                     | <b>1318.25252</b> |
| <b>Durée de vie (A)</b>                     | <b>3.61165075</b> |

Utilisant une pile CR123 non rechargeable, qui a une plage de tension comprise entre 1 500 mAh et 500 mAh, notre capteur a une autonomie de 3,6 ans d'activité continue.

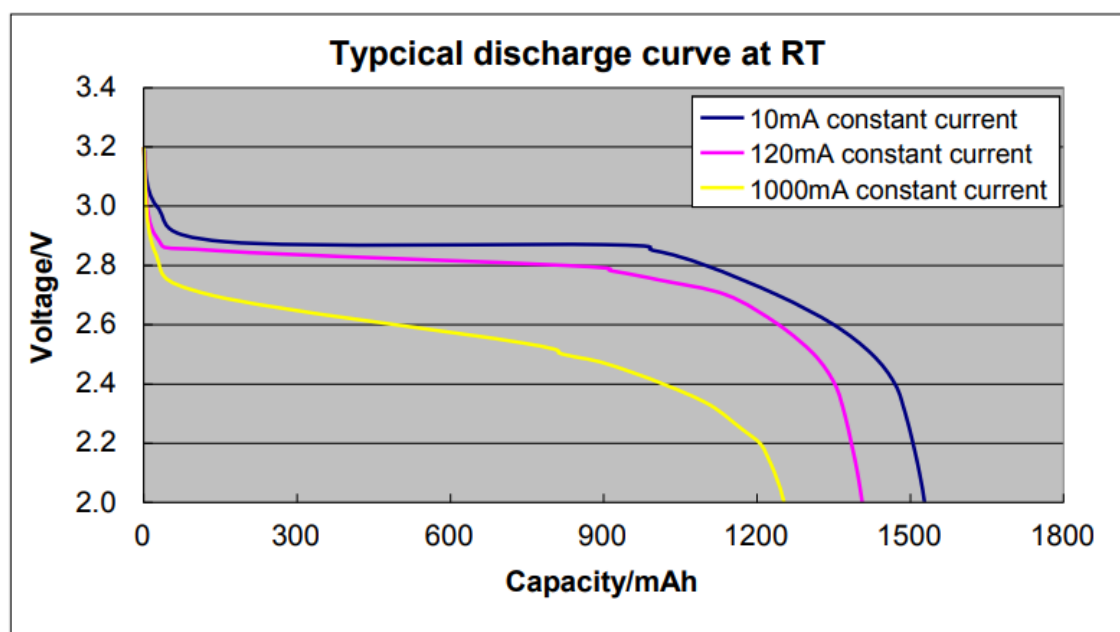


Figure 155 Courbes de décharges d'une pile CR123

Nous avons conclu de ce chapitre que le système de maintenance prédictive que nous avons conçu est fiable en termes de fidélité des données et de fiabilité du système. Ces tests ne sont pas les tests finaux qui seront effectués sur notre système, l'avenir du projet et les phases à venir de celui-ci seront découverts dans le prochain chapitre, où nous découvrirons plusieurs sous-projets que notre produit pourrait démarrer.

## Chapitre 8. : Future du projet

Dans ce chapitre, nous décrivons la gamme de sous-projets potentiels que l'IOSS pourrait envisager d'entreprendre à l'avenir. Nous fournissons une mise à jour complète sur l'état du projet, détaillant les réalisations et les étapes franchies jusqu'à présent. De plus, nous mettons en évidence les différents domaines dans lesquels l'IOSS est sur le point d'apporter une contribution significative, offrant une feuille de route pour les efforts futurs de l'organisation et l'expansion de son portefeuille de projets.

### 8.1 Accordeur automatique de piano



Figure 156 Acquisition de signaux vibratoire d'un piano

Parallèlement au projet de maintenance prédictive, nous avons assemblé un prototype qui utilise le même système d'analyse vibratoire de base que celui utilisé dans notre système, mais utilisé pour accorder les pianos. Le capteur était destiné à être associé à un tuner automatique alimenté par un moteur pas à pas, afin que le capteur puisse donner les commandes de réglage exactes au dispositif de réglage, alimenté par un moteur pas à pas.

Nous en avons bien sûr assemblé un tout premier prototype en analysant d'abord avec un oscilloscope si notre accéléromètre était capable d'acquérir le mélange d'harmoniques véhiculé par une note de musique et d'en distinguer les légères variations de fréquence.

## 8.2 Lubrificateur intelligent

Dans certains environnements industriels, il existe des roulements de taille considérable qui fonctionnent à des températures extrêmement élevées, nécessitant un approvisionnement continu en lubrification. Cependant, les techniciens responsables de cette tâche doivent veiller avec vigilance à ne pas trop remplir les roulements de lubrifiant ni à introduire de contaminants dans le lubrifiant à l'intérieur du roulement.

Pour relever ce défi, le concept de « lubrificateur intelligent » a émergé. Cet appareil est équipé d'un moteur pas à pas précis qui distribue avec précision du lubrifiant dans un roulement et peut être monté en toute sécurité sur le boîtier du roulement pour une période indéterminée. Le terme « intelligent » entre en jeu dans la mesure où ces lubrificateurs peuvent être intégrés à notre système de maintenance prédictive. Par conséquent, notre système peut demander de manière autonome à ces lubrificateurs intelligents de distribuer de la lubrification chaque fois qu'un roulement spécifique l'exige.



Figure 157 Prototype du lubrificateur intelligent

## 8.3 Interface Utilisateur Graphique basé sur web

Cette version de l'interface graphique est étroitement associée à la plateforme [aisense.iossco.com](https://aisense.iossco.com). Elle se trouve actuellement dans une phase de prototypage, affichant l'état global de santé de la machine, fournissant un diagnostic de la machine, ainsi que des recommandations d'actions correctives à entreprendre, le tout à l'attention du client.



Figure 158 Prototype du GUI basé sur web

## 8.4 Conclusion

Après un long périple de développement du projet AiSense, ce mémoire met en lumière plusieurs concepts clés.

Nous avons initié le projet en fournissant un aperçu fonctionnel et pratique du système. Par suite, nous avons plongé dans les principes de l'analyse vibratoire et des divers défauts et anomalies mécaniques.

Dans les deux chapitres suivants, nous avons adopté une approche descendante dans l'ingénierie système, en décomposant le système en sous-systèmes, et puis en composants et puis en sous-composants. Cette approche nous a permis d'établir des exigences S.M.A.R.T. et de définir les spécifications techniques pour différentes parties du projet.

Le cinquième chapitre se concentre sur les aspects matériels du projet, notamment la conception de PCB et la conception mécanique. Nous avons également examiné les différentes méthodes et configurations de test utilisées pour le prototypage tout au long du projet.

Par la suite, le chapitre 6 clarifie le développement des composantes logicielles et de l'interface graphique.

Dans le chapitre 7, nous avons effectué des tests en laboratoire et sur le terrain. Les tests en laboratoire ont prouvé que notre capteur est aussi fiable et précis qu'un analyseur de vibrations industriel. Les tests sur le terrain nous ont aidé à diagnostiquer des machines réelles dans des scénarios réels. Le test de Cimenterie National indique que notre système peut prédire les défauts des machines à un stade précoce et réduire efficacement les coûts de maintenance et les temps d'arrêt.

Enfin, le dernier chapitre met en lumière des projets potentiels et des opportunités futures. À l'ère de l'IoT, le projet AiSense sert de témoignage à la présence de l'innovation dans diverses industries encore à explorer. Ce mémoire souligne le potentiel des jeunes ingénieurs à avoir un impact significatif et à changer le monde à travers l'ingénierie, en mettant en avant l'idée que tout est possible avec une vision claire et un engagement envers le domaine.

Le potentiel d'expansion de ce projet est illimité. Nous espérons que ce mémoire servira de base et nous attendons avec impatience d'autres travaux scientifiques qui repousseront encore les limites de la connaissance dans ce domaine. Notre voyage ne se termine pas ici ; nous attendons avec impatience les efforts futurs dans ce domaine passionnant.

Fin

# Liste de Figures

|                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 Défauts communs des machines industrielles .....                            | 11 |
| Figure 2 Types de maintenances .....                                                 | 11 |
| Figure 3 Overview du système de maintenance prédictive conçu durant ce projet.....   | 12 |
| Figure 4 De l'idée à des spécifications .....                                        | 13 |
| Figure 5 Défaut de déséquilibre .....                                                | 16 |
| Figure 6 Défaut de désalignement .....                                               | 16 |
| Figure 7 Défaut de desserrement .....                                                | 17 |
| Figure 8 Défaut de faute d'isolation .....                                           | 17 |
| Figure 9 Défaut de Barres de rotor cassés.....                                       | 18 |
| Figure 10 Explication d'un roulement mécanique.....                                  | 18 |
| Figure 11 Cavités sur le chemin intérieur du roulement .....                         | 19 |
| Figure 12 Cavités et rouille sur le chemin externe du roulement.....                 | 19 |
| Figure 13 Placement d'un capteur sur un machine à 4 points.....                      | 21 |
| Figure 14 Environnement extrême industrielle.....                                    | 22 |
| Figure 15 Acquisition de signal vibratoire à l'aide d'un analyseur de vibration..... | 23 |
| Figure 16 Standard du positionnement de l'accéléromètre industrielle par main. ....  | 23 |
| Figure 17 Types de fixations des accélérateurs industrielles .....                   | 24 |
| Figure 18 Système au Niveau 0 .....                                                  | 26 |
| Figure 19 Système au Niveau -1 .....                                                 | 27 |
| Figure 20 Système au Niveau -2 .....                                                 | 28 |
| Figure 21 Composants du sous-système S1.1 .....                                      | 29 |
| Figure 22 Composants internes d'un accéléromètre piézoélectrique.....                | 30 |
| Figure 23 Composants internes d'un accéléromètre MEMS. ....                          | 31 |
| Figure 24 Accéléromètre ADXL 1005Z de type MEMS .....                                | 33 |
| Figure 25 Accéléromètre ADXL 356C de type MEMS.....                                  | 33 |
| Figure 26 Réponse fréquentiel du ADXL 356 .....                                      | 34 |
| Figure 27 Réponse fréquentiel du ADXL 1005 .....                                     | 34 |
| Figure 28 Architecture du composant S1.1.1 .....                                     | 36 |
| Figure 29 Exemple d'un circuit de filtre Passe Bas de 5eme ordre .....               | 37 |
| Figure 30 LPF MAX7420.....                                                           | 38 |
| Figure 31 Architecture du composant S1.1.2 .....                                     | 38 |
| Figure 32 SoC ESP32-S3.....                                                          | 39 |
| Figure 33 SoC PSOC 6 .....                                                           | 39 |
| Figure 34 Planche de développement PSOC 6 BLE .....                                  | 40 |
| Figure 35 Planche de développement ESP32-S3 .....                                    | 41 |
| Figure 36 Architecture du composant ADC.....                                         | 42 |
| Figure 37 Menu de configuration de l'EEPROM sur PSOC 6 .....                         | 44 |
| Figure 38 Représentation du composant l'EEPROM du PSOC 6.....                        | 44 |
| Figure 39 Sous composants du composant S1.2.1 .....                                  | 45 |
| Figure 40 Représentation du Stack BLE .....                                          | 46 |
| Figure 41 Client GATT du composant émetteur BLE .....                                | 48 |
| Figure 42 Représentation du fichier TXT .....                                        | 50 |
| Figure 43 Organigramme indiquant le flux de données .....                            | 50 |
| Figure 44 Nom du fichier TXT .....                                                   | 51 |
| Figure 45 Procédure de connexion au serveur FTP .....                                | 52 |
| Figure 46 Représentation des préparatoires du serveur FTP.....                       | 53 |
| Figure 47 Base de données SQL .....                                                  | 55 |
| Figure 48 Organigramme du logiciel Backend .....                                     | 57 |
| Figure 49 App Database du logiciel MATLAB R2021 .....                                | 60 |
| Figure 50 Page de configuration de l'usine .....                                     | 62 |
| Figure 51 Page de configuration des informations du machine .....                    | 62 |
| Figure 52 Page de configuration des différents composants mécaniques du machine..... | 63 |
| Figure 53 Page des paramètres du moteur .....                                        | 64 |
| Figure 54 Page des paramètres du boite à engrainage .....                            | 64 |
| Figure 55 Page de configuration du capteur .....                                     | 65 |

|                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 56 Interface d'analyse vibratoire du GUI .....                                           | 66 |
| Figure 57 Les différents outils d'analyse .....                                                 | 67 |
| Figure 58 Analyse d'un signale d'accélération vibratoire .....                                  | 67 |
| Figure 59 Analyse d'un spectre d'accélération vibratoire .....                                  | 68 |
| Figure 60 Spectre d'accélération avec le filtre digital pwelche .....                           | 68 |
| Figure 61 Graphe Waterfall .....                                                                | 69 |
| Figure 62 Outil des curseurs .....                                                              | 69 |
| Figure 63 outil du curseur harmonique .....                                                     | 69 |
| Figure 64 Extraction des caractéristiques .....                                                 | 70 |
| Figure 65 Tendance du caractéristique des valeurs RMS .....                                     | 70 |
| Figure 66 Circuit du captuer .....                                                              | 71 |
| Figure 67 PCB du capteur .....                                                                  | 71 |
| Figure 69 PCB du ADXL 1005 .....                                                                | 72 |
| Figure 70 Circuit du ADXL 1005 .....                                                            | 72 |
| Figure 72 PCB du ADXL 356 .....                                                                 | 73 |
| Figure 73 Circuit du ADXL 356 .....                                                             | 73 |
| Figure 75 Planche à test .....                                                                  | 74 |
| Figure 76 Conception du PCB .....                                                               | 75 |
| Figure 77 Couche supérieur du PCB .....                                                         | 75 |
| Figure 78 Circuit imprimé sur papier transparent .....                                          | 75 |
| Figure 79 Circuit collé sur la carte PCB vide .....                                             | 75 |
| Figure 80 Exposition du PCB à la lumière UV .....                                               | 75 |
| Figure 81 Solution Basique NaOH .....                                                           | 76 |
| Figure 82 Extraits Solides du NaOH et clFe .....                                                | 76 |
| Figure 83 Exemple du PCB fabriqué avec la méthode acide-base .....                              | 77 |
| Figure 84 PCB assemblé .....                                                                    | 77 |
| Figure 85 Prototype v2 du capteur .....                                                         | 77 |
| Figure 86 PCBs des accéléromètres MEMS .....                                                    | 77 |
| Figure 87 CNC de PCB .....                                                                      | 78 |
| Figure 88 Exemple d'un circuit .....                                                            | 79 |
| Figure 89 Exemple finale .....                                                                  | 79 |
| Figure 90 Gravure des traces du PCB .....                                                       | 79 |
| Figure 91 Exemple d'un PCB fabriqué avec un CNC .....                                           | 79 |
| Figure 92 Logiciel FFlatCAM pour preparer le Gcode .....                                        | 79 |
| Figure 93 Site web du manufacturer de PCB .....                                                 | 80 |
| Figure 94 Prototype du MEMS Digital .....                                                       | 80 |
| Figure 95 version 3 du capteur .....                                                            | 80 |
| Figure 96 Version 3 des PCB ADXL 356 .....                                                      | 81 |
| Figure 97 Version production des PCBs .....                                                     | 81 |
| Figure 98 3D print des boitiers des capteurs en filament PLA .....                              | 82 |
| Figure 99 Prototype de la conception mécanique .....                                            | 82 |
| Figure 100 Prototype de tous les composants du capteur .....                                    | 83 |
| Figure 101 Autres Prototypes .....                                                              | 83 |
| Figure 102 Chassie et Boitiers du version 3 du capteur. Fabriquées sur une machine à tour ..... | 83 |
| Figure 103 Chassie du version de production du capteur .....                                    | 84 |
| Figure 104 Accelerometre ADXL 356 en test sur le Shaker .....                                   | 84 |
| Figure 105 Shaker attaché à un piece de glass .....                                             | 85 |
| Figure 106 Shaker de 100 W pour les tests à basse fréquence .....                               | 85 |
| Figure 107 ADXL CUBE .....                                                                      | 86 |
| Figure 108 Configuration de la machine de test de laboratoire .....                             | 86 |
| Figure 109 Test sur le machine de laboratoire .....                                             | 87 |
| Figure 110 Représentation graphique d'une machine composé d'un moteur et une ventilateur .....  | 87 |
| Figure 111 Représentation graphique d'une machine composé d'un moteur et une pompe .....        | 87 |
| Figure 112 test de déséquilibre .....                                                           | 88 |
| Figure 113 IOT Gateway prototype .....                                                          | 89 |
| Figure 114 Boitier Version de production du capteur .....                                       | 89 |
| Figure 115 Chassit du version de production du capteur .....                                    | 89 |
| Figure 116 Diagramme de rayonnement de l'antenne PSOC 6 BLE .....                               | 90 |



|                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figure 117 Interface de developement du PSOC Creator 6 .....                                            | 91  |
| Figure 118 Brochage du PSOC 6 .....                                                                     | 91  |
| Figure 119 Organigramme représentant le logiciel embarqué du PSOC 6 .....                               | 92  |
| Figure 121 App designer sur MATLAB 2021 pour la conception des Interfaces graphiques .....              | 93  |
| Figure 122 Architecture Software du GUI.....                                                            | 94  |
| Figure 123 Environnement VsCode avec le framework Arduino .....                                         | 94  |
| Figure 124 Test du capteur ADXL 356 sur le shaker .....                                                 | 97  |
| Figure 125 Configuration du test "Réponse fréquentiel des accelerometers" .....                         | 97  |
| Figure 126 Procédure du test "Réponse fréquentiel des accéléromètres" .....                             | 98  |
| Figure 127 Résultat du test "Réponse fréquentiel des accéléromètres" .....                              | 99  |
| Figure 128 Test de Déséquilibre .....                                                                   | 100 |
| Figure 129 Procedure du test de scaling .....                                                           | 101 |
| Figure 130 Résultats du test de scaling .....                                                           | 102 |
| Figure 131 Résultats du test de scaling HF.....                                                         | 102 |
| Figure 132 Test sur la machine de lab .....                                                             | 103 |
| Figure 133 Figure représentant le test de Capteurs vs Microlog.....                                     | 103 |
| Figure 134 Procedure de test Capteur vs Microlog.....                                                   | 104 |
| Figure 135 Résultat sur le point 3 .....                                                                | 105 |
| Figure 136 Résultats sur le point 4.....                                                                | 105 |
| Figure 137 Résultat du test de déséquilibre statique .....                                              | 106 |
| Figure 138 Résultat du test de déséquilibre dynamique.....                                              | 107 |
| Figure 139 Resultat du test BPFO.....                                                                   | 107 |
| Figure 140 Comparaison avec SKF Microlog .....                                                          | 108 |
| Figure 141 Pics BPFO sur le logiciel de SKF.....                                                        | 108 |
| Figure 142 Resultat du test de BPFI .....                                                               | 108 |
| Figure 143 Résultat du test de désalignement.....                                                       | 109 |
| Figure 144 résultat du test de désalignement + déséquilibre.....                                        | 109 |
| Figure 145 Résultats du tests de BPFO + Désalignement.....                                              | 110 |
| Figure 146 Résultats du test de BPFO +BPFI + Désalignement.....                                         | 110 |
| Figure 147 Resultat du Field test Sicomo .....                                                          | 111 |
| Figure 148 Capteur version 3 sur un boitier de roulement dans l'usine de carton Sicomo.....             | 111 |
| Figure 149 Comparaison des résultats avec le Microlog SKF .....                                         | 112 |
| Figure 150 Comparaison des résultats spectral avec celle du SKF Microlog .....                          | 112 |
| Figure 151 Spectre de vitesse acquis d'un cylindre dans l'usine de Sicomo .....                         | 112 |
| Figure 152 Capteur version 3 modifié sur le boit d'engrainage d'un machine au Cimenterie Nationale..... | 113 |
| Figure 153 Spectre résultant .....                                                                      | 115 |
| Figure 154 Résultats de tendance du RMS de vitesse des deux GMFs.....                                   | 115 |
| Figure 155 Acquisition de données avec le capteur verison 2.5 .....                                     | 116 |
| Figure 156 Boite d'engrainage défectueuse chez Masterpak.....                                           | 117 |
| Figure 157 Machine étudié chez Cimenterie de Sibline .....                                              | 117 |
| Figure 158 Machines étudiés chez CityMall.....                                                          | 118 |
| Figure 159 Courbes de décharges d'une pile CR123.....                                                   | 120 |
| Figure 160 Acquisition de signaux vibratoire d'un piano .....                                           | 121 |
| Figure 161 Prototype du lubrificateur intelligent.....                                                  | 122 |
| Figure 162 Prototype du GUI basé sur web .....                                                          | 122 |

## Liste de tableaux

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tableau 1 Comparaison des différents accéléromètres .....                                     | 32  |
| Tableau 2 Capteurs MEMS utilisés pour ce projet .....                                         | 34  |
| Tableau 3 Brochage du composant S1.1.1 .....                                                  | 35  |
| Tableau 4 Comparaison des différents LPFs .....                                               | 37  |
| Tableau 5 Brochage du composant S1.1.2 .....                                                  | 39  |
| Tableau 6 Les données acquises et leurs paramètres .....                                      | 42  |
| Tableau 7 Les paramètres de l'ADC .....                                                       | 42  |
| Tableau 8 Brochage de l'ADC .....                                                             | 43  |
| Tableau 9 Tableau Comparatif des différentes technologies RF .....                            | 45  |
| Tableau 10 Caractéristiques du BLE .....                                                      | 47  |
| Tableau 11 Paramètres et configurations du client GATT .....                                  | 49  |
| Tableau 12 Paramètres et configuration des données transmises par BLE .....                   | 49  |
| Tableau 13 Paramètres de commande du fichier cmd.txt .....                                    | 54  |
| Tableau 14 Paramètres de configuration du fichier SET.txt .....                               | 54  |
| Tableau 15 Caractéristiques calculé par le Backend .....                                      | 58  |
| Tableau 16 Défauts possible des différents machines .....                                     | 59  |
| Tableau 17 Liste de composants du capteur .....                                               | 72  |
| Tableau 18 Liste de composants de l'ADXL 1005 .....                                           | 72  |
| Tableau 19 Liste de composants du ADXL 356 .....                                              | 73  |
| Tableau 20 Interruptions du PSOC 6 .....                                                      | 93  |
| Tableau 21 Séquence normale de travail du système .....                                       | 95  |
| Tableau 22 Tous les états du système sur l'IOT Gateway .....                                  | 95  |
| Tableau 23 Tests au niveau système .....                                                      | 96  |
| Tableau 24 Combinaisons de défauts sur banc d'essai .....                                     | 106 |
| Tableau 25 Résumé des résultats des tests "Combinaison des défauts" .....                     | 111 |
| Tableau 26 Paramètres du machine étudié .....                                                 | 114 |
| Tableau 27 Différents modes de puissance sur le PSOC 6 .....                                  | 119 |
| Tableau 28 Consommation de puissance des différents composants utilisés dans le capteur ..... | 119 |
| Tableau 29 Estimation de la durée de vie du pile du capteur .....                             | 120 |

## Références Bibliographiques

1. MCINERNEY S.A., DAI Y.: 'Basic vibration signal processing for bearing fault detection', IEEE Trans. Educ., 2003.
2. J. R. Stack, T. G. Habetler and R. G. Harley, "Fault classification and fault signature production for rolling element bearings in electric machines," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 3, pp. 735-739, May-June 2004, doi: 10.1109/TIA.2004.827454.
3. M. E. H. Benbouzid and G. B. Kliman, "What stator current processing-based technique to use for induction motor rotor faults diagnosis?," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 18, no. 2, pp. 238-244, June 2003, doi: 10.1109/TEC.2003.811741.
4. L. Frosini and E. Bassi, "Stator Current and Motor Efficiency as Indicators for Different Types of Bearing Faults in Induction Motors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 1, pp. 244-251, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2026770.
5. V. N. Ghate and S. V. Dudul, "Fault Diagnosis of Three Phase Induction Motor Using Neural Network Techniques," 2009 Second International Conference on Emerging Trends in Engineering & Technology, 2009, pp. 922-928, doi: 10.1109/ICETET.2009.100.
6. M. Blodt, P. Granjon, B. Raison and G. Rostaing, "Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, pp. 1813-1822, April 2008, doi: 10.1109/TIE.2008.917108.
7. R. R. Schoen, B. K. Lin, T. G. Habetler, J. H. Schlag and S. Farag, "An unsupervised, on-line system for induction motor fault detection using stator current monitoring," Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1994, pp. 103-109 vol.1, doi: 10.1109/IAS.1994.345492.
8. S. Nandi, H. A. Toliyat and X. Li, "Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Electrical Motors—A Review," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 20, no. 4, pp. 719-729, Dec. 2005, doi: 10.1109/TEC.2005.847955.
9. Czeslaw T Kowalski, Teresa Orlowska-Kowalska, Neural networks application for induction motor faults diagnosis, Mathematics and Computers in Simulation, Volume 63, Issues 3–5, 2003, Pages 435-448, ISSN 0378-4754.
10. Baptiste Trajin, Jérémie Regnier, Jean Faucher. Comparison between vibration and stator current analysis for the detection of bearing faults in asynchronous drives. IET Electric Power Applications, Institution of Engineering and Technology, 2010, 4 (2), pp.90-100. doi:10.1049/iet-epa.2009.0040ff. fhal02001669.
11. Nyquist, H., "Thermal Agitation of Electric Charge in Conductors", PhysRev.32.110, 1928, Jul, American Physical Society.
12. C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," in The Bell System Technical Journal, vol. 27, no. 3, pp. 379-423, July 1948, doi: 10.1002/j.1538-7305.1948.tb01338.x.

13. Dipesh B. Pardeshi , Mahadev G. Unde , Shraddha Maurya , Dhanshri A. Narayane, "Condition monitoring of induction motor-vibration analysis technique", International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 14, No. 3, 2022, pp. 38-46.
14. S. Zhang, S. Zhang, B. Wang and T. G. Habetler, "Deep Learning Algorithms for Bearing Fault Diagnostics—A Comprehensive Review," in IEEE Access, vol. 8, pp. 29857-29881, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972859.
15. Oppenheim - Discrete-time signal processing (2nd prentice hall),
16. Paresh Girdhar, C. Scheffer, Steve Machay, "Practical Machinery Vibration Analysis and Predictive maintenance", Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 2004.
17. R. Keith Mobley, "ROOT CAUSE FAILURE ANALYSIS", Butterworth-Heinemann 1999.
18. S. Nandi and H. A. Toliyat, "Novel frequency domain based technique to detect incipient stator inter-turn faults in induction machines," Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No.00CH37129), 2000, pp. 367-374 vol.1, doi: 10.1109/IAS.2000.881137.
19. P. C. M. L. Filho, R. Pederiva and J. N. Brito, "Detection of Stator Winding Faults in Induction Machines Using an Internal Flux Sensor," 2007 IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, 2007, pp. 432-437, doi: 10.1109/DEMPED.2007.4393133.
20. Brito, J. N., and R. Pederiva. Using artificial intelligence tools to detect problems in induction motors. Proceedings of the 1st International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems (International Session of 8th SOFT Fuzzy Systems Symposium) and 3rd International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS & ISIS 2002), Suzuka, Japao. Vol. 1. 2002.
21. Tandon, Naresh and Achintya Choudhury. "An analytical model for the prediction of the vibration response of rolling element bearings due to a localized defect." Journal of Sound and Vibration 205 (1997) 275-292.
22. Vinicius A. D. Silva, Robson Pederiva, « Fault detection in induction motors based on artificial intelligence », in International Conference - October 29-30, 2013 Institute of Technology of Chartres, France.
23. Bo Li, G. Goddu and Mo-Yuen Chow, "Detection of common motor bearing faults using frequency-domain vibration signals and a neural network based approach," Proceedings of the 1998 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No.98CH36207), 1998, pp. 2032-2036 vol.4, doi: 10.1109/ACC.1998.702983.
24. Early Detection of Faults in Induction Motors—A Review Tomas Garcia-Calva 1 , Daniel Morinigo-Sotelo 2 , Vanessa Fernandez-Cavero 3 and Rene Romero-Troncoso 4,\* 1 HSPdigital-Electronics Department, University of Guanajuato, Salamanca 36700, Mexico.
25. S. Zhang, S. Zhang, B. Wang and T. G. Habetler, "Deep Learning Algorithms for Bearing Fault Diagnostics—A Comprehensive Review," in IEEE Access, vol. 8, pp. 29857-29881, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972859.
26. M. -y. Chow, P. M. Mangum and S. O. Yee, "A neural network approach to real-time condition monitoring of induction motors," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 38, no. 6, pp. 448-453, Dec. 1991, doi: 10.1109/41.107100.
27. Vladimir N. Vapnik, "The Nature of Statistical Learning Theory", Second Edition, AT&T Labs-Research Room 3-130 100 Scultz Drive Red Bank, NJ 07701 USA, 2000.
28. M. Cococcioni, B. Lazzerini and S. L. Volpi, "Robust Diagnosis of Rolling Element Bearings Based on Classification Techniques," in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 9, no. 4, pp. 2256-2263, Nov. 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2231084.
29. D. He, R. Li, J. Zhu and M. Zade, "Data Mining Based Full Ceramic Bearing Fault Diagnostic System Using AE Sensors," in IEEE Transactions on Neural Networks, vol. 22, no. 12, pp. 2022-2031, Dec. 2011, doi: 10.1109/TNN.2011.2169087.
30. Chris Murphy, "Why MEMS Accelerometers Are Becoming the Designer's Best Choice for CbM Applications", Analog Devices, 2021.
31. Kankar, P.K., and Kankar, P., "A Review on Vibration Analysis of Induction Motors for Fault Detection," 2017.
32. Barkovskii, A.L., et al., "Condition Monitoring and Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013.
33. Shao, H., et al., "Vibration Analysis for Fault Detection in Induction Motors Using Complex Morlet Wavelet Transform and Singular Value Decomposition," Mechanical Systems and Signal Processing, 2018.
34. Sutanto, D., et al., "Vibration Analysis for Early Fault Detection of Induction Motors Using Machine Learning Techniques," Procedia CIRP, 2016.
35. Inoue, T., et al., "Online Fault Detection of Induction Motors Using Vibration Analysis and Statistical Process Control," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010.
36. Xie, J., et al., "Early Fault Detection of Induction Motors Using Vibration Analysis and Convolutional Neural Networks," IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020.
37. Sharma, N., and Biswas, P., "Fault Detection in Induction Motors Using Vibration Analysis and Artificial Neural Networks," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009.
38. Widodo, A., et al., "Induction Motor Fault Detection and Classification Using Vibration Analysis and Decision Trees," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007.
39. Chatterjee, A., et al., "Vibration Analysis for Early Detection of Rotor Faults in Induction Motors," Mechanical Systems and Signal Processing, 2011.
40. Bouzid, M., et al., "Induction Motor Fault Diagnosis Through Vibration Analysis and Ensemble Learning," Mechanical Systems and Signal Processing, 2019.
41. Shah, S.L., et al., "Application of Vibration Analysis for Fault Detection in Induction Motors," IEEE Industry Applications Magazine, 2016.
42. Wang, X., et al., "A Comprehensive Review of Vibration Analysis Techniques for Induction Motor Fault Diagnosis," IEEE Access, 2018.
43. Yen, K., et al., "A Comparative Study of Feature Extraction Techniques for Vibration Analysis-Based Fault Diagnosis of Induction Motors," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015.
44. Zhao, W., et al., "Vibration Analysis for Fault Detection in Induction Motors Using Time-Frequency Methods," Mechanical Systems and Signal Processing, 2017.
45. Sbarufatti, C., et al., "Vibration Analysis and Classification of Faults in Induction Motors Using Convolutional Neural Networks," IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021.
46. Zhang, Y., et al., "IoT-Based Smart Cities: A Survey," IEEE Internet of Things Journal, 2019.
47. Poh, T.H., et al., "MEMS Sensors for Smart Cities: A Review," Sensors, 2018.
48. Yun, J., et al., "IoT-Enabled Smart Buildings: A Review of Challenges and Solutions," IEEE Access, 2020.
49. Thouraya, S., et al., "MEMS Accelerometer-Based Activity Recognition for IoT Applications: Challenges and Opportunities," IEEE Sensors Journal, 2019.
50. Atzori, L., et al., "The Internet of Things: A Survey," Computer Networks, 2010.