

Mémoire présenté à l'institut des sciences et techniques appliquées

En vue de l'obtention du diplôme de Master professionnel Instrumentation et Métrologie IM

Thème

Conception et réalisation d'un instrument de mesure et suivi de vibration des matériels roulants

Par

FERDI El abbes

Soutenu le 21 juin 2026 devant le jury composé de

Dr. CHAIB Mohammed

Président

Dr. DAHO Nour El Houda

Examineur

Dr. MAHIDA Hanane

Représentant de
l'incubateur

Mr. ABOUDAUD
Mohammed Lamine

(Gérant de Sarl Mesurelec
électronique)

Partenaire
socioéconomique

Pr. ILES Nadia

Encadrant

Année universitaire : 2025 - 2026

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation de deux systèmes embarqués de mesure et d'analyse des vibrations destinés à la surveillance de l'état des machines et à la maintenance conditionnelle. Les deux solutions développées adoptent des approches complémentaires, combinant une instrumentation industrielle de précision et une solution embarquée à faible coût basée sur des technologies MEMS.

Le premier système repose sur un capteur ADXL345 associé à une plateforme ESP32. Il permet la mesure triaxiale des vibrations ainsi que leur traitement en temps réel. Le système intègre le calcul de paramètres caractéristiques tels que la valeur efficace (RMS), les amplitudes et l'analyse fréquentielle par transformée de Fourier rapide (FFT). Il offre également des fonctionnalités avancées, notamment l'évaluation selon la norme ISO 10816, le stockage des données sur carte SD, l'affichage sur écran TFT et la supervision à distance via une interface web. Les essais réalisés ont montré des performances satisfaisantes malgré les limitations liées à la précision du capteur.

Le second système est basé sur un accéléromètre industriel AS-062 intégré dans une chaîne complète d'acquisition comprenant un conditionneur de signal, une isolation galvanique, un convertisseur analogique-numérique ADS1220 et un microcontrôleur ESP32. Ce dispositif assure une acquisition fiable des vibrations, en particulier pour les faibles amplitudes, avec une visualisation en temps réel des données via une interface web. Toutefois, certaines limites ont été observées, notamment la fragilité de l'isolation galvanique et la nécessité d'un étalonnage plus rigoureux.

Les résultats obtenus confirment la faisabilité de solutions de surveillance vibratoire basées sur les systèmes embarqués. Ce travail met en évidence l'intérêt de ces technologies pour des applications de maintenance prédictive, tout en soulignant l'importance de la précision des capteurs et de la robustesse de la chaîne de mesure.

Mots-clés : Vibromètre, vibrations mécaniques, accéléromètre ADXL345, accéléromètre AS-062, ESP32, acquisition de données, étalonnage, surveillance vibratoire, instrumentation.

المخلص

يقدم هذا البحث تصميم وإنجاز نظامين مدمجين لقياس وتحليل الاهتزازات بهدف مراقبة حالة الآلات وتطبيقات الصيانة التنبؤية. يعتمد النظامان على مقاربتين متكاملتين تجمعان بين القياس الصناعي عالي الدقة والحلول المدمجة منخفضة التكلفة المعتمدة على تقنيات MEMS.

يعتمد النظام الأول على حساس ADXL345 مدمج مع منصة ESP32 ، حيث يسمح بقياس الاهتزازات على ثلاثة محاور ومعالجتها في الزمن الحقيقي. يتضمن النظام حساب عدة معاملات أساسية مثل القيمة الفعالة (RMS) ، والسعات العظمى، بالإضافة إلى التحليل الترددي باستخدام تحويل فورييه السريع (FFT). كما يوفر وظائف متقدمة مثل التقييم وفق معيار ISO 10816، وتخزين البيانات على بطاقة SD ، والعرض على شاشة TFT ، والمراقبة عن بعد عبر واجهة ويب. وقد أظهرت التجارب العملية نتائج مرضية رغم بعض القيود المرتبطة بدقة الحساس.

أما النظام الثاني فيعتمد على حساس صناعي من نوع AS-062 مدمج ضمن سلسلة قياس كاملة تشمل تكييف الإشارة، العزل الكهربائي، محول تماثلي-رقمي ADS1220 ، إضافة إلى متحكم ESP32. يتيح هذا النظام قياساً أكثر دقة واستقراراً خاصة

عند الاهتزازات الضعيفة، مع عرض البيانات في الزمن الحقيقي عبر واجهة ويب. ومع ذلك، تم تسجيل بعض القيود مثل هشاشة العزل الكهربائي والحاجة إلى تحسين عملية المعايرة لضمان دقة أعلى.

تؤكد النتائج المحصل عليها إمكانية تطوير أنظمة مراقبة اهتزازات منخفضة التكلفة تعتمد على الأنظمة المدمجة، مع إبراز أهمية دقة الحساسات وجودة سلسلة القياس في تحسين الأداء العام.

الكلمات المفتاحية: جهاز قياس الاهتزازات، الاهتزازات الميكانيكية، مقياس التسارع ADXL345 ، مقياس التسارع AS-062 ، ESP32، اقتناء البيانات، المعايرة، المراقبة الاهتزازية، الأجهزة والقياسات

Abstract

This research presents the design and implementation of two embedded vibration measurement and analysis systems aimed at machine condition monitoring and predictive maintenance applications. The two systems follow complementary approaches, combining a high-precision industrial solution and a low-cost embedded solution based on MEMS technology.

The first system is based on an ADXL345 MEMS accelerometer integrated with an ESP32 platform, enabling triaxial vibration measurement and real-time signal processing. It computes key vibration parameters such as RMS values, peak amplitudes, and performs frequency analysis using the Fast Fourier Transform (FFT). The system also includes advanced features such as ISO 10816-based evaluation, data storage on an SD card, TFT display visualization, and remote monitoring via a web interface. Experimental results showed satisfactory performance despite limitations related to sensor accuracy.

The second system is built around an industrial AS-062 accelerometer integrated into a complete acquisition chain including signal conditioning, galvanic isolation, an ADS1220 analog-to-digital converter, and an ESP32 microcontroller. This system provides more stable and accurate measurements, particularly for low-amplitude vibrations, with real-time data visualization through a web interface. However, some limitations were identified, including the fragility of the galvanic isolation under harsh conditions and the need for improved calibration to ensure higher measurement accuracy.

Overall, the obtained results confirm the feasibility of low-cost embedded vibration monitoring systems. This work highlights the importance of sensor accuracy and measurement chain quality in overall system performance.

Keywords: Vibrometer, Mechanical Vibrations, ADXL345 Accelerometer, AS-062 Accelerometer, ESP32, Data Acquisition, Calibration, Vibration Monitoring, Instrumentation.

Remerciement

Je tiens à exprimer ma sincère gratitude et mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet. Leur soutien et leur collaboration ont été essentiels tout au long de cette expérience enrichissante.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon encadreur de projet Pr. ILES N. pour son encadrement attentif, ses conseils précieux et sa disponibilité tout au long de cette période. Son expertise et son expérience m'ont permis d'approfondir mes connaissances dans le domaine et de relever les défis rencontrés avec confiance.

Je tiens également à remercier les membres de jury pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe de MESURELEC-ELECTRONIQUE pour leur aide en particulier Mr. ABOUDAUD Mohamed Lamine, Mr. HOCINE Hamza et Mme. BENDJAEL Hayat. Leurs conseils et leur soutien m'ont permis de progresser dans mes compétences professionnelles.

Je souhaite également adresser mes remerciements à mes enseignants, qui m'ont offert l'opportunité de réaliser ce projet ont soutenu mes démarches tout au long de mon parcours de Licence et Master. Leur confiance et leur accompagnement ont été précieux.

Enfin, je n'oublie pas de remercier ma famille et mes amis pour leur soutien constant et leur encouragement. Leur soutien moral a été d'une grande importance pour moi.

Tableau des matières

Remerciement.....	iv
Tableau des figures	ix
Tableau des tableaux	xii
Liste des abréviations	xiii
Introduction.....	1
Chapitre I Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants	2
1. Introduction.....	3
2. Les matériels roulants.....	3
3. Définition des vibrations.....	3
3.1. Vibration sinusoïdale	4
3.2. Vibrations périodiques	4
3.3. Vibrations aléatoires.....	5
4. Paramètres de mesurages.....	5
4.1. Gamme de fréquences.....	5
4.2. Grandeur de mesurage	5
4.3. Amplitude des vibrations.....	6
4.4. Sévérité vibratoire.....	6
5. Relation entre fréquences et amplitudes.....	8
6. Origines des vibrations	8
6.1. Le Balourd	8
6.2. Le délignage ou défaut de lignage.....	8
6.3. Chocs périodiques (chocs à la rotation)	9
6.4. Les phénomènes magnétiques	9
6.5. Les engrenages.....	9
6.6. Les transmissions par courroie.....	10
6.7. Les roulements.....	11
6.8. Les paliers lisses hydrodynamique	12
7. La surveillance vibratoire	12
8. Maintenance préventive	13
9. Techniques d'analyse vibratoire.....	13
9.1. Analyse temporelle.....	13

9.2. Analyse spectrale.....	13
10. Effets des vibrations.....	14
11. La chaine de mesure	15
12. Les grandeurs d'influence	15
13. Capteur et technologie de mesure de vibration.....	16
13.1. L'accéléromètre à détection capacitive	16
13.2. L'accéléromètre à détection piézorésistive	16
13.3. L'accéléromètre à détection à base de piezo-jonction de transistor	17
13.4. L'accéléromètre à détection piézoélectrique.....	17
13.5. L'accéléromètre à détection à effet tunnel.....	18
13.6. L'accéléromètre à détection à structures résonantes.....	18
13.7. L'accéléromètre à détection optique	19
14. Le choix de capteur de vibration	20
15. Méthodes de montage d'accéléromètre.....	20
16. Les normes internationales sur les mesures de vibrations	23
16.1. ISO 10816.....	23
16.2. ISO 2631.....	23
16.3. EN 12299	23
16.4. UIC 518	23
Conclusion	25
<i>Chapitre II Conception et réalisation</i>	26
Partie 1 : Choix des composants	27
Introduction :	27
1. Cahier de charge	27
2. Le capteur de vibration (ADXL345)	27
3. Le microcontrôleur (ESP32 – WROOM)	28
4. Interface d'affichage	29
4.1. Ecran TFT	29
4.2. Interface Web	30
5. Stockage des données dans la carte SD	30
6. Horloge DS3231.....	31
7. Alimentation du système	31
Partie 2 : Réalisation du système de mesure vibratoire.....	33
1. Conception électronique.....	33

1.1.	Tests sur une plaque d'essai	33
1.2.	Carte PCB.....	34
2.	Développement logiciel	34
2.1.	Espace de développement (Arduino IDE).....	34
3.	Calibration de système.....	49
3.1.	Le calibrateur	49
3.2.	Algorithme de calibrage	49
3.3.	Mode opératoire :.....	50
3.4.	Test de système :.....	51
3.5.	Essais de correction de l'erreur	52
3.6.	Erreur du capteur fournie par le fabricant	52
4.	Tests et essais	53
4.1.	Pompe à eau.....	53
5.	Discussion des résultats	55
Partie 3 : Réalisation du système mesure vibratoire basé sur un capteur industriel.....		56
1.	Matériel utilisé.....	56
1.1.	Microcontrôleur ESP32 (<i>page 28</i>).....	56
1.2.	Capteur de vibration.....	56
1.3.	Acquisition des données.....	56
1.4.	Convertisseur Analogique / Numérique.....	57
1.5.	Circuit d'isolation	57
2.	Schéma de montage.....	57
3.	Résultat	58
<i>Conclusion.....</i>		<i>60</i>
<i>Perspectives</i>		<i>62</i>
<i>Chapitre 04 Etude technico-économique</i>		<i>64</i>
1.	Premier axe : Présentation du projet	65
1.1.	L'idée de projet	65
1.2.	Les valeurs suggérées.....	65
1.3.	L'équipe	66
1.4.	Les objectifs du projet	66
1.5.	Le planning de réalisation du projet	66
2.	Deuxième axe: Aspects innovants.....	67

2.1.	La nature des innovations	67
2.2.	Les domaines d'innovation	67
3.	Troisième axe : Analyse stratégique du marché.....	67
3.1.	Le segment du marché.....	67
3.2.	La mesure de l'intensité de la concurrence	68
3.3.	La stratégies marketing	69
4.	Quatrième axe : Plan de production et organisation	70
4.1.	Processus de production	70
4.2.	L'approvisionnement.....	70
4.3.	La main d'œuvre	71
4.4.	Principaux partenaires :	71
5.	Cinquième axe : Plan financier.....	71
5.1.	Les coûts et les charges :	71
6.	Sixième axe : Business model canvas.....	74
	<i>Références</i>	76
	<i>Annexes</i>	81
	Annexe n° 01 Conception de la plaque PCB.....	82
	Annexe n° 02 Conception de boîtier en 3D	87
	Annexe n° 03 Liste des Bibliothèque utilisé dans la programmation.....	88
	Annexe n° 04 L'isolation galvanique.....	89
4.1.	Utilisation d'un optocoupleur	89
4.2.	Convertisseur DC-DC.....	91

Tableau des figures

Figure 1: Fonction Harmonique [1]	3
Figure 2: Représentation graphique des éléments du système vibratoire [2]	4
Figure 3: Sévérité vibratoire par ISO 10816 [38]	7
Figure 4: Différents types de balourd [23]	8
Figure 5: Différents types de délignage [6]	8
Figure 6: Principe de fonctionnement d'un moteur électrique [6]	9
Figure 7: Les différent classes d'engrenage [6]	10
Figure 8: Technologies poulie courroie	11
Figure 9: Les constituants d'un roulement [6]	11
Figure 10: Roulement déformé	11
Figure 11: Déséquilibre d'un palier [6]	12
Figure 12: Comparaison entre le signal fréquentiel et le temporel [9]	14
Figure 13: Exemples de pièces déformées	14
Figure 14: Composants de la chaine de mesure [10]	15
Figure 15: Principe d'accéléromètre capacitif [10]	16
Figure 16: Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive [9]	17
Figure 17: Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes [10]	17
Figure 18: Un accéléromètre à effet tunnel [10]	18
Figure 19: Un accéléromètre résonnant [10]	18
Figure 20: Un accéléromètre optique [10]	19
Figure 21: montage d'accéléromètre (goujon, cire d'abeille) selon la norme 5348 [5]	21
Figure 22: Montage d'accéléromètre (colle, aimant) selon la norme 5348 [5]	22
Figure 23: accéléromètre tenu a la main d'après ISO 5348 [5]	23
Figure 24: Logo de l'ISO	24
Figure 25: ADXL345 [12]	27
Figure 26: Connexion matérielle ADXL345 avec ESP32 [12]	28
Figure 27: Brochage du module ADXL345 [12]	28
Figure 28: ESP32 - WROOM	28
Figure 29 : Ecran TFT	29
Figure 30: Ecran TFT 2.4 inch	29
Figure 31: connexion matérielle de l'écran TFT avec l'esp 32 (écran + circuit tactile + module SD carte) [37]	30
Figure 32: RTC DS3231 [17]	31
Figure 33: Connexion matériel entre le DS3231et le ESP32 [36]	31
Figure 34: Circuit de charge TP4056	32
Figure 35: Circuite booster MT3608	32
Figure 36: Le test de système dans une plaque d'essai	33
Figure 37: Plaque PCB fabriqué par le traitement avec le chlorure de fer	34
Figure 38: Logo de l'Arduino IDE	34
Figure 39: Résumé de l'algorithme de fonctionnement de système	34
Figure 40: algorithme principal de système	35
Figure 41: exemple d'affichage d'erreur (absence de composant)	36
Figure 42: Schéma de fonctionnement d'évaluation ISO 10816	37

Figure 43:page principale (Acc - TFT screen).....	39
Figure 44: ACC et RMS data_page.....	39
Figure 45: synthèse des 3 axes (évaluation iso).....	40
Figure 46: page de calibration	40
Figure 47: Page des plages	41
Figure 48: Menu de présentation des graphes.....	42
Figure 49:Page d'enregistrement des données dans la carte SD	42
Figure 50: Sélection d'une machine à partir de la base de données selon la norme ISO 10816	43
Figure 51: Pages d'ajoute d'une nouvelle machine.....	43
Figure 52: Page des paramètre	44
Figure 53: Page principale de l'affichage web.....	45
Figure 54: Page d'affichage web des caractéristiques de la machine selon l'ISO - 10816.....	45
Figure 55: Graphe temporel web.....	46
Figure 56: Graphe FFT web	46
Figure 57: Page des statistiques web	47
Figure 58: Gestion de la carte SD web	48
Figure 59: Sauvegarde automatique dans le web.....	48
Figure 60: Calibrateur de vibrations portable (modèle 9110D)	49
Figure 61: Algorithme de calibrage de système	49
Figure 62: Essai de calibration du capteur ADXL345.....	50
Figure 63: positionnement de capteur de calibré l'axe Z	51
Figure 64: Test de mesure sur l'axe Z avec la réf 1g RMS (1.41 g Pic).....	51
Figure 65 : Essai sur une pompe à eau.....	53
Figure 66 : Amplitudes des accélérations par apport au temps.....	54
Figure 67 : AS - 062	56
Figure 68 : Interface web d'acquisition des données mesurées pour le capteur AS - 062	56
Figure 69 : Le convertisseur analogique-numérique (CAN/ADC) ADS1220	57
Figure 70 : Schéma de montage de capteur AS - 062 avec le ESP32.....	57
Figure 71 : Montage du circuit avec le capteur AS - 062	58
Figure 72 : Capture d'écran des mesures affichées sur la page web	59
Figure 73: les contraintes de fabrication de almitech electronics engineering	82
Figure 74: Logo EasyEDA.....	83
Figure 75: Top layer (miroir effet)	83
Figure 76: Top silk layer (miroir effet)	83
Figure 77: Plaque PCB en 3D conceptionné par EasyEDA.....	84
Figure 78: Buttom layer	84
Figure 79: Typon tranféré.....	84
Figure 80: Plaque PCB	84
Figure 81: Immerger la plaque dans le chlorure de fer	85
Figure 82: La PCB avant l'utilisation de l'acétone	86
Figure 83: La PCB après le nettoyage.....	86
Figure 84: Plaque PCB soudé et positionné dans le boitier.....	86
Figure 85: Logo Blender.....	87
Figure 86: Boitier principal.....	87

Figure 87: Boitier de capteur	87
Figure 88: optocoupleur HCPL-7840 (A-7840)	89
Figure 89: optocoupleur PC-817	89
Figure 90: optocoupleur ISO-124	89
Figure 91: convertisseur DC - DC B1205S	91

Tableau des tableaux

Tableau 1: Unité de mesure [5]	5
Tableau 2: Gamme d'utilisation de capteur [5]	20
Tableau 3: Tableau des fonctions et ces exigences	27
Tableau 4: La consommation d'énergie de chaque composant	31
Tableau 5: Table comparatif entre les optocoupleurs à signal analogique	90

Liste des abréviations

RMS: Root Mean Square (Valeur efficace)

FFT : Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier Rapide)

ISO: International Organization for Standardization

UIC: International Union of Railways

ESP32: Espressif 32-bit Microcontroller

ADXL345: Accéléromètre triaxial numérique ADXL345

TFT: Thin Film Transistor

LCD: Liquid Crystal Display

RTC: Real Time Clock

I2C: Inter-Integrated Circuit

SPI: Serial Peripheral Interface

SDA: Serial Data

SCL: Serial Clock

SCK: Serial Clock

MOSI: Master Out Slave In

MISO: Master In Slave Out

CS: Chip Select

GPIO: General Purpose Input Output

SD: Secure Digital

PCB: Printed Circuit Board

IDE: Integrated Development Environment

EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

Wi-Fi: Wireless Fidelity

NTP: Network Time Protocol

UDP: User Datagram Protocol

HTML: HyperText Markup Language

CPU: Central Processing Unit

SRAM: Static Random Access Memory

ROM: Read Only Memory

TCXO: Temperature Compensated Crystal Oscillator

Hz : HertzkHzKilohertz

RMS Total : Valeur efficace résultante sur les trois axes

g : Accélération gravitationnelle (9,81 m/s²)

Introduction

Introduction

Les vibrations mécaniques constituent un indicateur essentiel de l'état de fonctionnement des systèmes industriels et des matériels roulants. Leur analyse permet de détecter précocement les défauts mécaniques tels que le balourd, le désalignement, l'usure des roulements ou encore les défauts d'engrenages. Ainsi, la surveillance vibratoire joue un rôle important dans la maintenance prédictive, en contribuant à améliorer la fiabilité, la disponibilité et la sécurité des équipements tout en réduisant les coûts liés aux arrêts imprévus.

Avec l'évolution des systèmes embarqués et des microcontrôleurs à faible coût, il est désormais possible de développer des dispositifs de mesure performants capables d'acquérir, traiter, afficher et stocker les données vibratoires en temps réel. Dans ce contexte, notre projet consiste à concevoir et réaliser un système embarqué de mesure vibratoire basé sur l'accéléromètre triaxial ADXL345 et le microcontrôleur ESP32.

Ce système permet l'acquisition des vibrations sur trois axes, le calcul des principaux paramètres vibratoires tels que la valeur efficace RMS et la Transformée de Fourier Rapide FFT, l'évaluation de l'état des machines selon la norme ISO 10816, ainsi que l'enregistrement des données sur carte SD et leur visualisation via une interface graphique locale et une interface web.

Ce mémoire est structuré en deux chapitres principaux. Le premier présente les notions théoriques relatives aux vibrations mécaniques, aux capteurs de mesure et aux normes d'évaluation vibratoire. Le second chapitre est consacré à la conception, à la réalisation et à la validation expérimentale du système développé.

Chapitre I

Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder les bases théoriques nécessaires à notre projet. Aussi comprendre pleinement le sujet central de notre projet nécessite de maîtriser les concepts clés et les principes fondamentaux.

2. Les matériels roulants

Les matériels roulants représentent l'ensemble des équipements mobiles utilisés dans les secteurs industriels et de transport pour assurer le déplacement de personnes, de marchandises ou de matériaux grâce à un système de roulement adapté aux conditions d'exploitation.

3. Définition des vibrations

Selon la norme AFNOR 90.001, la vibration est une variation dans le temps de la valeur d'une grandeur donnée, propre au mouvement, voir de la position d'un système mécanique, lorsque la grandeur dont il est question est soit plus grande soit plus petite que la valeur moyenne connue comme valeur de référence. [1]

Un corps vibre lorsqu'il est animé par un mouvement oscillatoire alors qu'il se trouve en position d'équilibre (**figure 1**). La forme la plus simple de mouvement oscillatoire est la forme sinusoïdale caractérisée par une amplitude, une fréquence et une phase. [1]

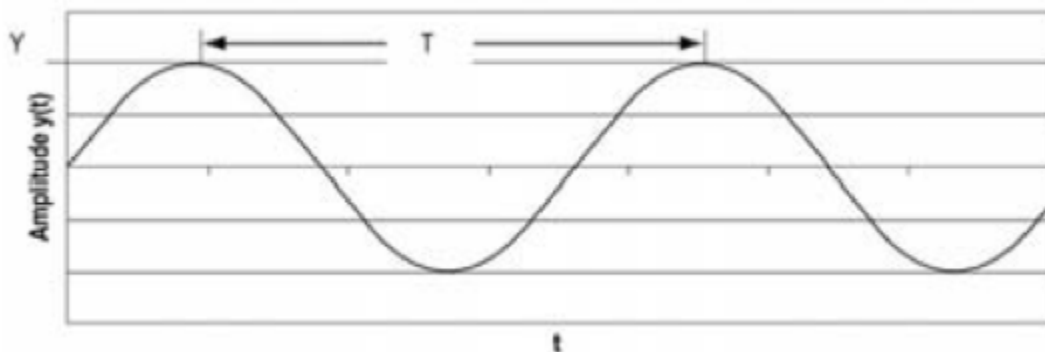


Figure 1: Fonction Harmonique [1]

Le mouvement qui se répète au cours du temps s'appelle un mouvement vibratoire ou un mouvement oscillatoire. Tout système mécanique ayant une masse et un élément flexible (un ressort par exemple) ou leur équivalence dans un système électrique (inductance, condensateur) peut faire des mouvements vibratoires. Dans la plupart des cas, ces systèmes ont un amortisseur pour les systèmes mécaniques ou une résistance pour les systèmes électriques. En général, on peut représenter un système vibratoire par les schémas suivants : [2]

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

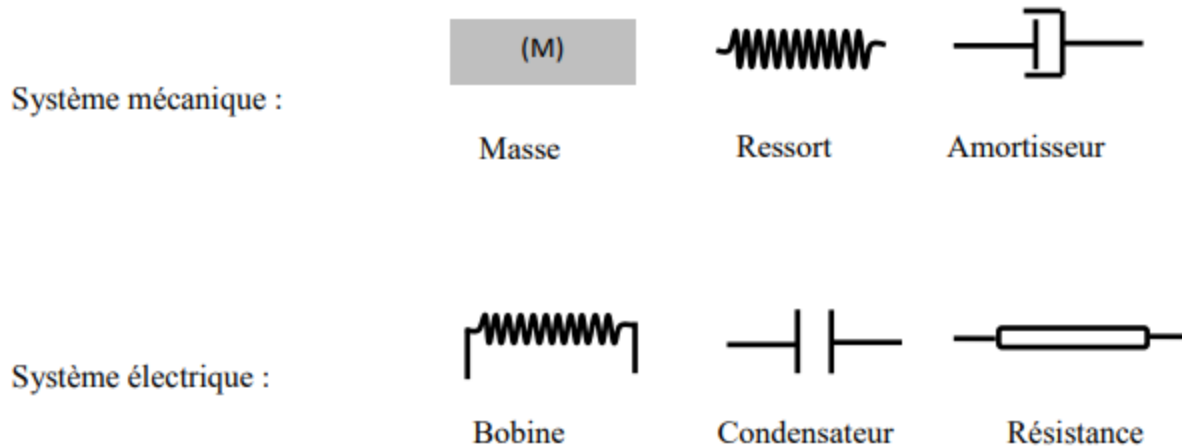


Figure 2: Représentation graphique des éléments du système vibratoire [2]

Il existe 3 types de vibrations : sinusoïdales, périodiques et aléatoires.

3.1. Vibration sinusoïdale

Elle est obtenue dans le cas d'une masse fixée à un support via un ressort et écartée de sa position d'équilibre puis lâchée. Le spectre temporel de cette vibration représente l'amplitude de la vibration en fonction du temps. Il permet de définir :

- La période (s) : T
- La fréquence (Hz) : $1/T$
- La valeur efficace : caractérise l'énergie vibratoire

L'amplitude est difficile à définir surtout s'il s'agit de vibration aléatoire mais elle peut se caractériser par :

- Le Déplacement : (sous unités du mètre)
- La Vitesse : m/s
- L'Accélération s'exprime en m/s^2 ; ($g = 9.81 m/s^2$).

Elle est préférée à la vitesse dans les très hautes fréquences et dont les déplacements sont de l'ordre de quelques microns. Le spectre fréquentiel représente l'amplitude (vitesse ou accélération) en fonction de la fréquence. [3]

3.2. Vibrations périodiques

Ce sont des mouvements qui se reproduisent identiques à eux même, à des intervalles de temps égaux (machines, marteaux piqueurs,) Elles sont décomposables en une somme de fonctions sinusoïdales de fréquences et d'amplitude propres. [3]

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

3.3. Vibrations aléatoires

On parle de vibrations aléatoires lorsque la position du point considéré ne peut être prédite à un instant déterminé. Elles sont rencontrées dans le domaine des transports : poste de conducteur d'une chargeuse par exemple ; les vibrations sont liées aux irrégularités du terrain et au choc entre le godet de la chargeuse et tas. Elles peuvent être décomposées en une somme infinie de vibrations sinusoïdales de fréquence différentes mais contiguës. Le spectre temporel permet de mettre en relation les événements et les vibrations générées. Le spectre fréquentiel permet d'identifier les fréquences prédominantes (autour de 2 Hz par exemple) ce qui est primordial pour déterminer les types de défauts. [3]

4. Paramètres de mesurages

4.1. Gamme de fréquences

Le mesurage des vibrations doit être à large bande de sorte que le spectre de fréquence de la machine soit correctement couvert.

La gamme de fréquences dépendra du type de machine considérée (par exemple la gamme de fréquences nécessaires pour évaluer l'intégrité de paliers à roulement devrait comprendre des fréquences supérieures à celles nécessaires sur des machines à paliers à film d'huile uniquement). [4]

4.2. Grandeur de mesure

Aux fins de la présente partie de l'ISO 10816, les grandeurs de mesure suivantes peuvent être utilisées :

- a) Déplacement vibratoire, mesuré en micromètres ;
- b) Vitesse de vibration, mesurée en millimètres par seconde ;
- c) Accélération de vibration, mesurée en mètres par seconde carrée. [4]

Tableau 1: Unité de mesure [5]

Descripteur	Unités S.I.	Unités vibratoires	Correspondances	Système Impérial
Déplacement Y	m	μm	$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$	1 pouce = 25.4 mm 1 mil = 25.4 μm
Vitesse V	m/s	mm/s	$1 \text{ mm/s} = 10^{-6} \text{ m/s}$	1 pouce/s = 25.4 mm/s 1 mil/s = 0.025 μms
Acceleration A	m/s^2	G	$1 \text{ g} = 9.81 \text{ m/s}^2$	$1 \text{ g} = 386 \text{ pouces/s}^2$

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

4.2.1. Valeur crête

La valeur de crête est la valeur maximale du signal temporel $y(t)$ dans l'intervalle de temps considéré. Les mesures de vitesse et d'accélération sont généralement prises en valeur de crête ou en valeur efficace. [5]

4.2.2. Valeur crête à crête

La valeur de crête à crête est l'écart maximal entre la valeur de crête négative et la valeur de crête positive du signal $y(t)$ dans l'intervalle de temps considéré. En vibration de machines, le déplacement vibratoire est souvent mesuré en valeur de crête à crête. [5]

4.2.3. Valeur efficace

La valeur efficace (on RMS : Root Mean Square) est la racine carrée de la moyenne du carré du signal : [5]

$$Y_{\text{eff}} \text{ ou } Y_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt}$$

Ou Y_{eff} (Y_{RMS}) est la valeur efficace

4.2.4. Relation entre les unités

Les mesures vibratoires utilisant plusieurs unités (g RMS, g PIC, m/s^2 ...)

Les unités de vibration en accélération sont directement liées par des conversions simples. L'unité de base est le m/s^2 , et on obtient le mm/s^2 en multipliant par 1000 ($1 \text{ m/s}^2 = 1000 \text{ mm/s}^2$). La conversion en "g" se fait en divisant par l'accélération de la pesanteur : $1 \text{ g} = 9,81 \text{ m/s}^2$, donc $\text{g pic} = a_{\text{pic}} / 9.81$ et $\text{g rms} = a_{\text{rms}} / 9.81$.

La relation entre valeurs crête (pic) et efficaces (RMS) dépend du signal : pour une vibration sinusoïdale, $a_{\text{pic}} = \sqrt{2} a_{\text{rms}}$. Ainsi, toutes ces unités décrivent la même grandeur (l'accélération vibratoire) mais avec des échelles et des représentations différentes selon l'analyse temporelle ou fréquentielle.

4.3. Amplitude des vibrations

Il est pratique courante, sur la base de l'expérience, lors de l'évaluation des vibrations à large bande de machines tournantes de considérer la valeur efficace de la vitesse de vibration, puisqu'elle peut être liée à l'énergie vibratoire. Cependant, on peut préférer d'autres grandeurs comme le déplacement ou l'accélération et les valeurs de crête au lieu des valeurs efficaces. Dans ce cas, il faut d'autres critères qui ne sont pas nécessairement simplement liés aux critères basés sur les valeurs efficaces. [4]

4.4. Sévérité vibratoire

Normalement les mesurages sont faits à des postes de mesure et en deux ou trois directions de mesurage, ce qui amène un ensemble de valeurs d'amplitude de vibration différentes. La valeur

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

maximum d'amplitude à large bande mesurée dans des conditions convenues de support de machine et de fonctionnement se définit comme la sévérité vibratoire.

Pour la plupart des types de machine une seule valeur de sévérité vibratoire caractérisera l'état vibratoire de cette machine. Cependant, pour certaines machines, cette approche peut être inadéquate et la sévérité vibratoire sera alors évaluée de façon indépendante pour les points de mesure en un certain nombre d'endroits. [4]

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816						
Machine			Class I small machines	Class II medium machines	Class III large rigid foundation	Class IV large soft foundation
	in/s	mm/s				
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71		good		
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80		satisfactory		
	0.18	4.50				
	0.28	7.10		unsatisfactory		
	0.44	11.2				
	0.70	18.0				
	0.71	28.0		unacceptable		
	1.10	45.0				

Figure 3: Sévérité vibratoire par ISO 10816 [42]

La **Figure 3** représente la classification des niveaux de vibrations des machines selon la norme 'International Organization for Standardization' ISO 10816. Cette norme permet de déterminer si une machine fonctionne dans un état acceptable ou si elle présente un risque de défaillance mécanique.

Les classes des machines d'ISO 10816 :

- Classe I : Petites machines ou moteurs isolés d'une puissance maximale de 15 kW. Un exemple classique est un petit moteur électrique de ventilateur d'atelier.
- Classe II : Machines de taille moyenne d'une puissance comprise entre 15 et 75 kW, sans fondations lourdes. C'est le cas typique d'une pompe centrifuge standard de traitement des eaux.
- Classe III : Grandes machines de plus de 300 kW installés sur des fondations très lourdes et rigides. On y retrouve les grands compresseurs industriels d'usine chimique.
- Classe IV : Grandes machines de plus de 300 kW mais montées sur des supports souples ou flexibles. L'exemple type est un turbogénérateur de centrale électrique.

L'évaluation est basée sur la vitesse vibratoire efficace RMS exprimée en mm/s.

5. Relation entre fréquences et amplitudes

Fréquences et amplitudes sont étroitement liées. Dans le cas de vibrations de basses fréquences (véhicules, poids lourds : 1.5 à 12 Hz, tracteurs agricoles : 2 à 4 Hz), les amplitudes de déplacement rencontrées sont de l'ordre de plusieurs centimètres voire de mètres dans le cas de très basses fréquences (navires : 0.06 à 0.09 Hz).

En revanche, les outils à main sont généralement caractérisés par de hautes fréquences (polisseuses à main (200 à 800 Hz) et par des déplacements qui ne dépassent pas quelques mm voire des micromètres. [3]

6. Origines des vibrations

6.1. Le Balourd

Le phénomène de balourd mécanique est lié à une répartition non homogène de la masse autour de l'axe de rotation : L'axe d'inertie de l'arbre n'est pas confondu avec l'axe de rotation. [6]

Différents types de balourd peuvent être identifiés : [6]

- Balourd statique : L'axe d'inertie de l'arbre est parallèle à l'axe de rotation
- Balourd de couple : L'axe d'inertie n'est plus colinéaire à l'axe de rotation, les deux axes formant un angle.
- Balourd dynamique : Il s'agit d'une combinaison des deux premiers et correspond au cas le plus courant.

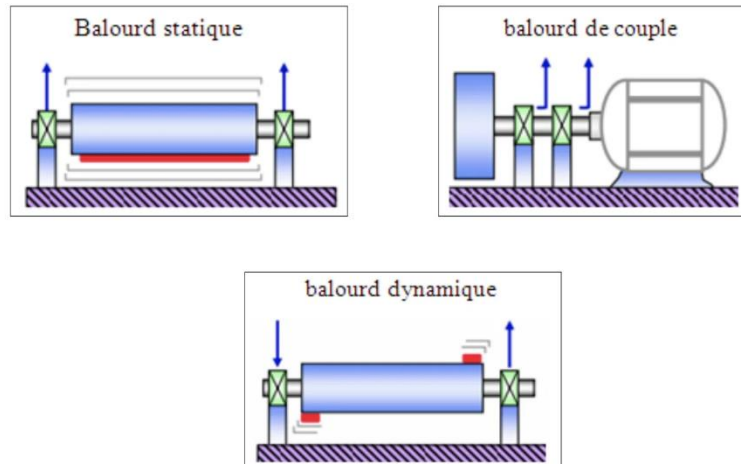


Figure 4: Différents types de balourd [27]

6.2. Le délignage ou défaut de lignage

Le défaut de lignage est dû à la non coïncidence des axes de rotation de 2 machines accouplées. Selon les positions géométriques des deux axes, on distingue 3 types de délignage [6]:

- Délignage parallèle : Défaut de concentricité des deux arbres.
- Délignage angulaire : Défaut de parallélisme des deux arbres.
- Délignage angulaire et parallèle : Combinaison des deux précédents.

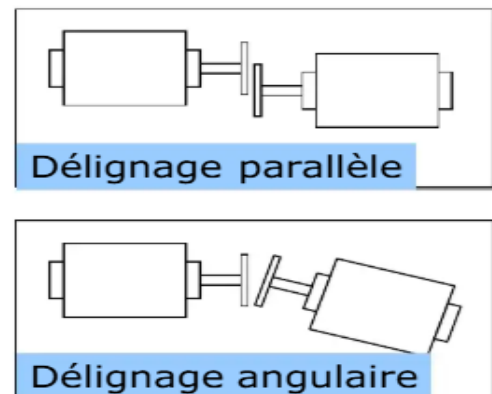


Figure 5: Différents types de délignage [6]

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

Le défaut de lignage crée des contraintes internes au niveau des arbres et des paliers des machines accouplées. La contrainte exercée au niveau du palier génère une non-linéarité de raideur de ce dernier. Le déplacement occasionné par la force excitatrice s'en trouve écrêté, entraînant l'apparition de composantes harmoniques de la fréquence de rotation. [6].

6.3. Chocs périodiques (chocs à la rotation)

Les chocs périodiques peuvent être internes ou externes à la machine [6] :

- Origine des chocs périodiques externes :
 - Défaut de fixation.
 - D'une autre machine (alternative, presse...).
- Origine des chocs périodiques internes :
 - Dégradation de roulement.
 - Dégradation d'engrèvements.
 - Jeux excessifs.

6.4. Les phénomènes magnétiques

Les phénomènes magnétiques sont une source directe de vibrations mécaniques à travers les forces électromagnétiques variables et la magnétostriction. Ils jouent un rôle majeur dans le comportement dynamique des machines électriques et doivent être pris en compte dans la conception des systèmes pour réduire le bruit et améliorer la stabilité.

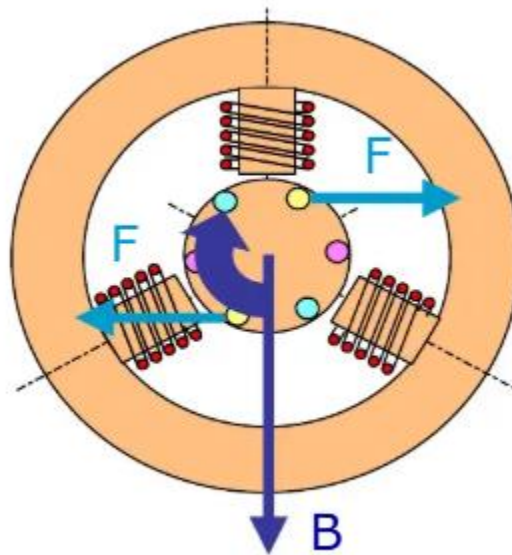


Figure 6: Principe de fonctionnement d'un moteur électrique [6]

6.5. Les engrenages

Les vibrations apparaissent lorsque la transmission du mouvement entre deux roues dentées n'est pas parfaitement régulière. Même dans un engrenage idéal, le contact entre dents est périodique, ce qui génère des excitations mécaniques.

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

Les principales sources de vibrations sont :

- Erreur de pas et défauts de fabrication
- Variation de rigidité d'engrènement
- Choc d'engrènement
- Jeu mécanique
- Désalignement des axes

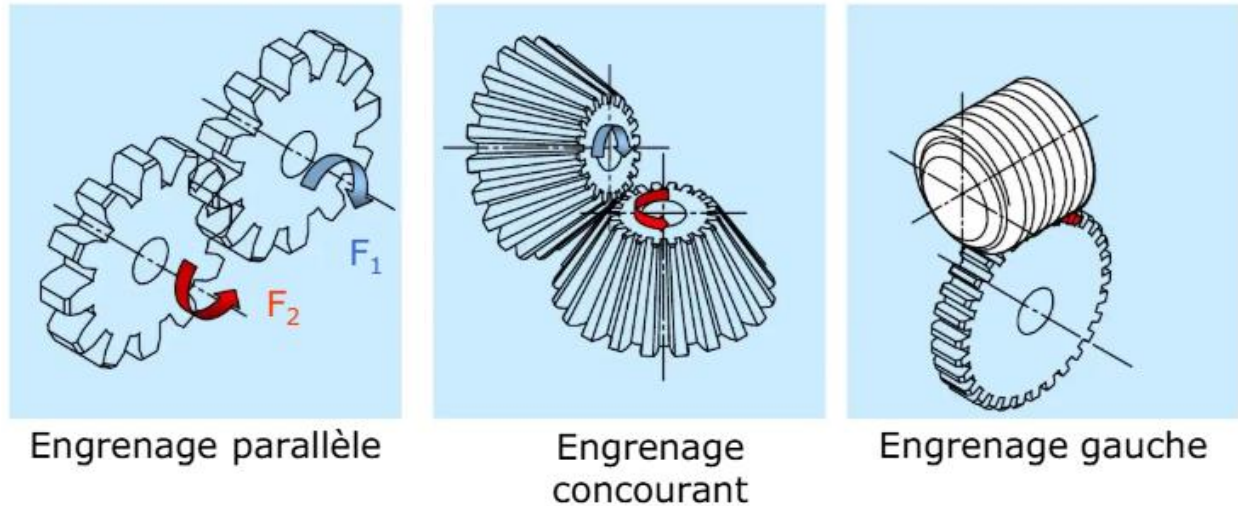


Figure 7: Les différentes classes d'engrenage [6]

6.6. Les transmissions par courroie

Les transmissions par courroie sont des systèmes mécaniques très utilisés pour transmettre un mouvement et une puissance entre deux arbres. Elles constituent aussi une source importante de vibrations, dues à leur nature souple et aux interactions dynamiques entre la courroie et les poulies.

Le glissement mécanique de la courroie sur la poulie est de l'ordre de 2% à 5%. Si le glissement est plus important, une usure prématurée peut survenir.

Un excentrement de poulie peut induire un phénomène vibratoire à la fréquence de rotation.

La tension de la courroie est perceptible sur les niveaux de bruits des paliers équipés de roulements. La quantification du bruit de roulement aide à régler la tension de courroie.

La principale cause d'usure de courroie est le déalignement entre deux poulies. [6]



Figure 8: Technologies poulie courroie

6.7. Les roulements

Les roulements réalisent le positionnement de l'arbre dans les paliers en assurant la transmission des efforts vers la structure. [6]



Figure 9: Les constituants d'un roulement [6]

Les causes de dégradation de roulements sont nombreuses :

- Usure normale.
- Charge.
- Défaut de graissage.
- Défaut de montage.
- Agents extérieurs, ...

La dégradation d'un roulement se traduit généralement par un écaillage des surfaces en contact (bagues et éléments roulants) qui s'étend et évolue dans le temps. La dégradation peut être localisée ou généralisée. [6]

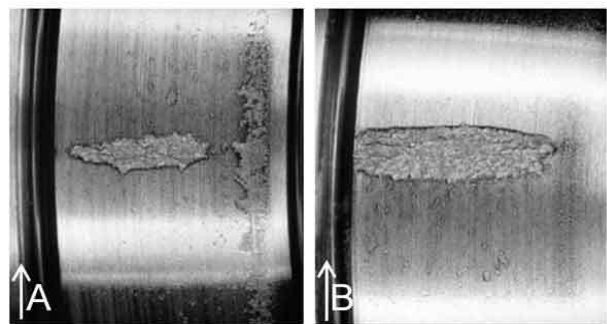


Figure 10: Roulement déformé

6.8. Les paliers lisses hydrodynamique

Dans un tel palier, l'arbre est en équilibre sur le film d'huile entretenu par la rotation. La position d'équilibre est définie par l'angle de calage qui est l'angle formé par la droite des centres et la direction de la charge de l'arbre dans le palier. L'angle de calage dépend de la technologie du palier et a une forte incidence sur la stabilité de la machine. [6]

Des instabilités de l'arbre dans le palier peuvent apparaître sous l'effet de variations de certains paramètres tels que [6]:

- Charge appliquée au rotor
- Vitesse de rotation
- Viscosité de l'huile

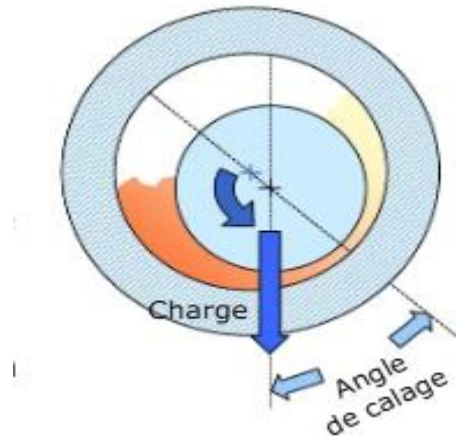


Figure 11: Déséquilibre d'un palier [6]

Les sources de vibrations sont généralement liées aux imperfections de fonctionnement, aux interactions entre composants ou aux phénomènes physiques internes au système. Elles peuvent être provoquées par des déséquilibres de masse, des variations d'effort, des défauts géométriques, des phénomènes de frottement ou encore par des excitations périodiques générées durant le fonctionnement normal de l'équipement.

Les défauts d'assemblage, l'usure progressive des composants, les erreurs d'alignement ainsi que les jeux mécaniques peuvent aussi intensifier les vibrations et modifier leur comportement dans le temps. De plus, les propriétés des matériaux et les caractéristiques structurelles influencent fortement la propagation et l'amplification des vibrations.

7. La surveillance vibratoire

La surveillance vibratoire est depuis longtemps une méthode approuvée pour obtenir des informations critiques sur la santé des machines et prévenir les arrêts non planifiés. Pourtant, elle est encore loin d'être une norme pour toutes les machines tournantes. Dans le haut de gamme, on trouve des systèmes complexes dotés d'une fonctionnalité de protection certifiée SIL, essentielle pour les actifs critiques tels que les grandes turbines à gaz et les compresseurs. Ces solutions sont coûteuses et complexes, mais elles sont nécessaires pour garantir la sécurité et la continuité. [7]

À l'autre extrémité, les appareils de mesure simples et les capteurs sans fil offrent des alternatives abordables. Ils fonctionnent bien pour certaines machines non critiques, mais pour les actifs semi-critiques, ils fournissent des données qui ne sont ni complètes ni suffisamment fiables pour soutenir les stratégies de maintenance prédictive. Entre ces deux extrêmes se trouve un vaste segment de milieu de gamme composé de pompes, de ventilateurs, de turbines plus petites et de systèmes auxiliaires. Nombre de ces machines sont encore surveillées à l'aide d'instruments portatifs. Bien que ces mesures puissent être précises, elles manquent de continuité en raison des longs intervalles entre les relevés, ce qui laisse des lacunes importantes dans les données. [7]

8. Maintenance préventive

La maintenance préventive permet de repérer les dégradations des machines dès leur apparition, facilitant ainsi la planification des intervalles de maintenance et l'optimisation de la durée de vie des composants critiques. Cette approche permet également la détection automatique des vibrations influençant la qualité, contribuant ainsi à éviter les rebuts. [8]

9. Techniques d'analyse vibratoire

9.1. Analyse temporelle

L'analyse temporelle est une méthode d'étude des vibrations basée sur l'observation directe du signal vibratoire en fonction du temps. Elle permet d'évaluer le comportement dynamique d'un système mécanique à partir des variations du déplacement, de la vitesse ou de l'accélération vibratoire.

L'analyse temporelle constitue une étape essentielle dans l'étude des vibrations des matériels roulants. Elle permet de surveiller l'évolution des signaux vibratoires et de détecter rapidement les anomalies mécaniques afin d'améliorer la fiabilité et la maintenance des systèmes industriels.

Quelques normes (ISO 10816) recommandent une comparaison entre les niveaux de vibration globaux sur une large gamme de fréquences. La méthode de mesure globale présente quelques avantages :

- Les données sont faciles à gérer même manuellement.
- En comparant les résultats avec les normes, il est possible de déterminer la gravité du défaut.
- Les appareils de mesure de niveau global sont portatifs et peu chers.
- Cette méthode permet de lever les doutes sur l'apparition d'un défaut.

Malheureusement, elle présente un inconvénient majeur :

- La détection du défaut est tardive. Le défaut est déjà très important lorsque l'accroissement du niveau de vibration devient significatif
- La mesure du niveau global est peu utile pour déterminer la source du problème. [5]

9.2. Analyse spectrale

Dans le signal temporel d'une telle combinaison de vibrations, il est difficile de détecter les composantes vibratoires individuelles. C'est pourquoi une seconde méthode de représentation est utilisée pour déterminer l'amplitude et les fréquences des composantes vibratoires : l'analyse fréquentielle. Cette visualisation affiche l'amplitude des oscillations mesurées en fonction du temps et de la fréquence. Ce type d'analyse est appelé transformation de Fourier ou FFT. [9]

Une analyse en fréquence (analyse spectrale) révèle les fréquences auxquelles se produisent des variations d'amplitude significatives. Celles-ci peuvent généralement être corrélées à un phénomène mécanique particulier (vitesse de rotation d'un arbre (balourd, alignement), fréquences d'engrènement, résonances, vitesse critique d'un arbre, etc., suite à une analyse de la cinématique du mécanisme. [5]

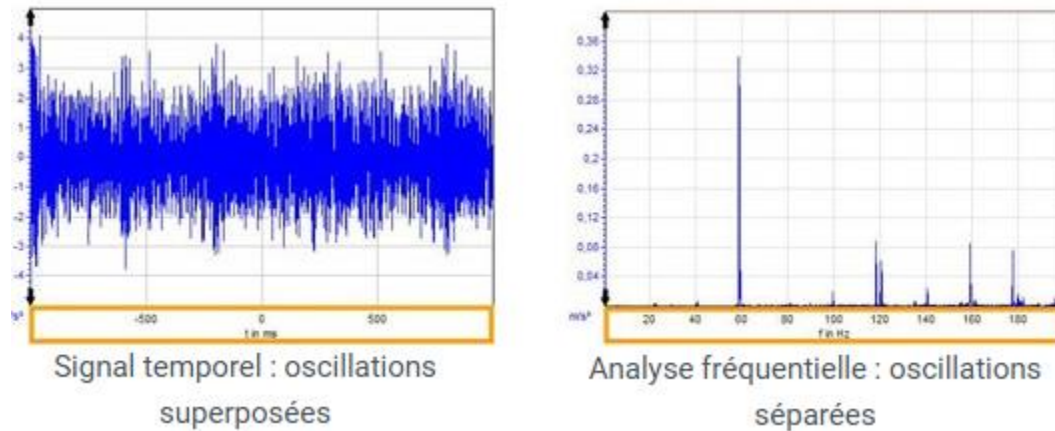


Figure 12: Comparaison entre le signal fréquentiel et le temporel [9]

10. Effets des vibrations

Les vibrations peuvent avoir plusieurs effets selon leur intensité, leur fréquence et leur durée d'exposition. Sur les systèmes mécaniques, elles provoquent une usure prématurée des composants (roulements, engrenages), un desserrage des assemblages, une baisse de précision et parfois des ruptures par fatigue. Elles peuvent également générer du bruit et perturber le bon fonctionnement des machines. Sur le corps humain, une exposition prolongée peut entraîner des troubles musculosquelettiques, de la fatigue, des douleurs lombaires ou des atteintes vasculaires et nerveuses, notamment dans le cas des vibrations main-bras ou corps entier. Ainsi, les vibrations représentent un facteur critique à contrôler en ingénierie et en environnement de travail.



Figure 13: Exemples de pièces déformées

11. La chaîne de mesure

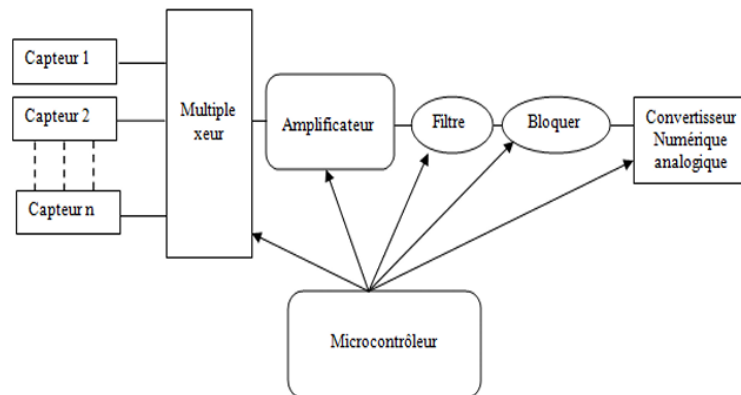


Figure 14: Composants de la chaîne de mesure [10]

- Acquisition : Les capteurs transforment la grandeur physique en signal électrique. S'il y en a plusieurs, un multiplexeur sélectionne la voie à lire.
- Conditionnement : Le signal est amplifié pour être exploitable, puis filtré pour enlever le bruit.
- Numérisation : Le signal est momentanément figé (bloqueur) pour être transformé en données digitales par le convertisseur analogique-numérique.
- Contrôle et Traitement : Le microcontrôleur supervise toutes ces étapes, analyse mathématiquement les données et transmet les résultats pour affichage. [10]

12. Les grandeurs d'influence

Les grandeurs d'influence sont des grandeurs qui peuvent générer des perturbations sur le capteur et causer des erreurs qui agissent sur le signal de sortie. La plupart des grandeurs d'influence sont liées à l'environnement des capteurs tels que [10]:

- La température (la plus importante).
- La pression environnante.
- Les vibrations mécaniques ou acoustiques, les chocs, le temps.
- La position du capteur et sa fixation.
- L'humidité, la projection d'eau, l'immersion.
- Les ambiances corrosives.
- Les perturbations électromagnétiques.
- Les rayonnements nucléaires.
- Les accélérations et la pesanteur.
- L'alimentation électrique du capteur.

13. Capteur et technologie de mesure de vibration

Un capteur de vibration est un dispositif électronique ou mécanique conçu pour détecter, mesurer et analyser les oscillations, les secousses ou les chocs sur une surface ou une machine. [5]

En dynamique, la loi fondamentale est la relation entre l'accélération (A) appliquée à un corps et la force (F), alors on écrit : ($F = m \cdot a$) ; où m est la masse. L'interaction entre la force et l'accélération est réciproque. La plupart des accéléromètres fonctionnent selon ce principe [10].

L'évaluation de l'accélération est faite par la mesure de la force exercée sur un corps d'épreuve ou encore la déformation que ce dernier produit sur une structure. Diverses techniques existent pour estimer le déplacement du corps d'épreuve. [10]

13.1. L'accéléromètre à détection capacitive

Actuellement, les accéléromètres à détection capacitive sont les capteurs les plus utilisés. Leur principe de fonctionnement est illustré dans la Figure 16. La partie du capteur sensible à l'accélération est le corps d'épreuve (est une électrode mobile). Entre le corps d'épreuve et une partie fixe du système, la capacité est formée. Lors de l'accélération, l'éloignement et le rapprochement du corps d'épreuve à l'élément fixe varie la capacité, dans ce cas la détection consiste à évaluer l'accélération. [10]

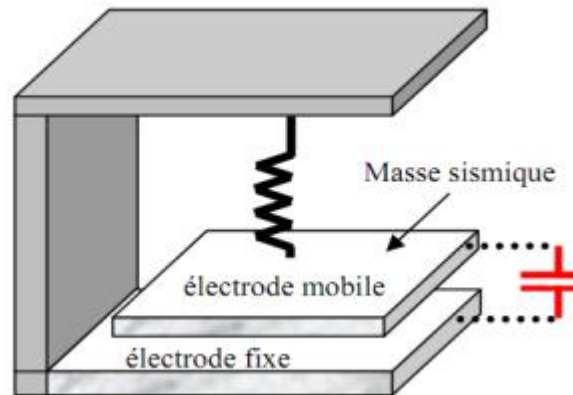


Figure 15: Principe d'accéléromètre capacitif [10]

13.2. L'accéléromètre à détection piézorésistive

Les microsystèmes à détection piézorésistive sont réalisés exclusivement par l'utilisation de procédé de gravure en volume (bulk micromachining). Tirant profit de la philosophie de la technologie de fabrication des capteurs de pression, les accéléromètres à détection piézorésistive micro-usinés en volume ont été développés et sont aujourd'hui en production. Le corps d'épreuve est une poutre ou une masse suspendue, la variation de la résistance d'un élément piézorésistif permet de mesurer la déformation de la structure lors de l'accélération, la figure 16 illustre ce principe. L'intégration de ces capteurs est facile en technologie. [10]

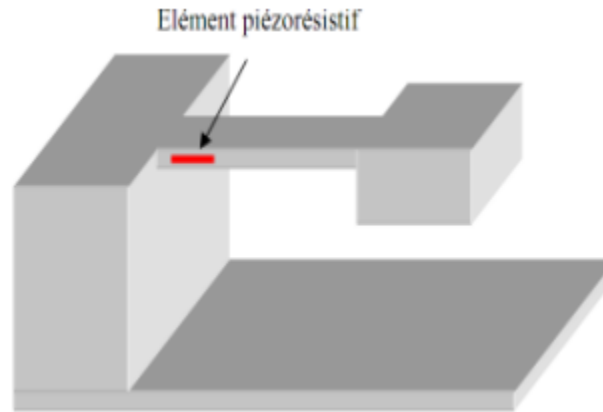


Figure 16: Principe de l'accéléromètre à détection piézorésistive [9]

13.3. L'accéléromètre à détection à base de piezo-jonction de transistor

Dans ce type d'accéléromètre la piézo-sensibilité des transistors bipolaires est utilisée à la place des jauges piézo-résistives pour la mesure du signal. La contrainte exigée entraîne une repopulation des électrons dans le canal du transistor et échange ainsi le mouvement des électrons. Dans ce cas, on utilise un transistor comme un élément sensible qui réduit considérablement la taille de l'élément de transduction à la place de piézo-résistances. Cette approche a l'avantage de diminuer largement la puissance consommée par rapport à la détection piézo-résistive, ce qui représente un atout pour certaines applications [10].

13.4. L'accéléromètre à détection piézoélectrique

Deux types de gravure sont utilisées dans les accéléromètres à détection piézoélectrique, le premier type est bulk-micromachining et le deuxième type est surface-micromachining. Cette méthode de détection n'est pas acceptable avec une fabrication complètement CMOS (full-CMOS), il a besoin de dépôt de films piézoélectriques sur les structures. [10]

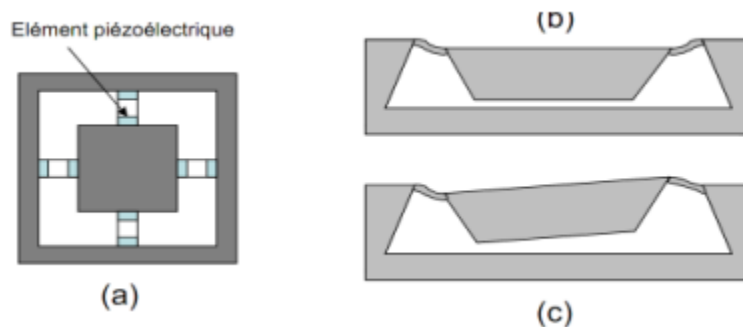


Figure 17: Un accéléromètre piézoélectrique à trois axes [10]

(a) vue de dessus de la structure, (b) accélération verticale, (c) accélération latérale.

13.5. L'accéléromètre à détection à effet tunnel

Ce type d'accéléromètre est développé par les chercheurs du JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena), en se basant sur l'exploitation de l'effet des microscopes à effet tunnel. Pour produire l'effet tunnel, il faut une pénétration d'électrons entre deux électrodes métalliques, cela donne une plus faible barrière isolante entre ces deux électrodes. [10]

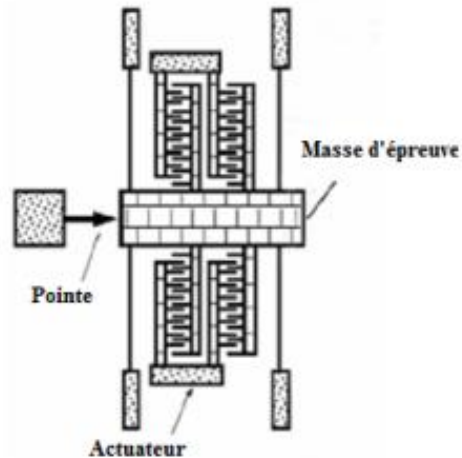


Figure 18: Un accéléromètre à effet tunnel [10]

13.6. L'accéléromètre à détection à structures résonantes

Le principe de cet accéléromètre consiste à évaluer le changement de la fréquence de résonance d'une structure en oscillation.

Ce type de détection a été utilisé dans les premiers accéléromètres en 1990, ces derniers sont micro-usinés dans du quartz. Couramment ces capteurs micro-usinés dans le silicium transfèrent la force inertielle de la masse d'épreuve à une force axiale sur la structure résonante, changeant ainsi sa fréquence de résonance. [10]

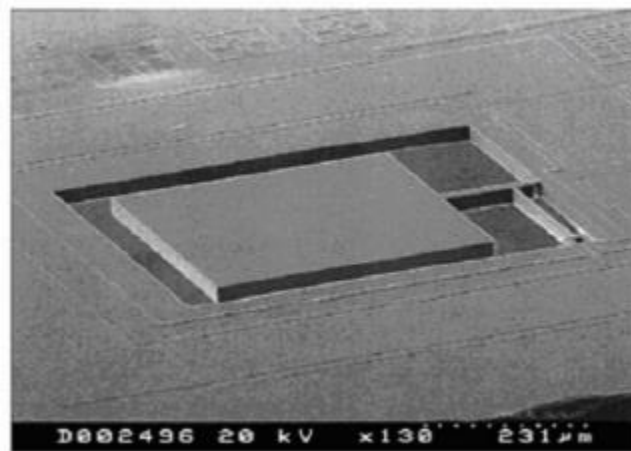


Figure 19: Un accéléromètre résonnant [10]

13.7. L'accéléromètre à détection optique

L'accéléromètre à détection optique est un capteur inertielle qui mesure une accélération ou une vibration en exploitant les propriétés de la lumière plutôt que des signaux électriques.

Son principe repose sur une masse mobile suspendue qui se déplace sous l'effet de l'inertie ; ce déplacement infime vient modifier les caractéristiques d'un faisceau lumineux (comme son intensité, sa phase ou sa longueur d'onde à travers une fibre optique ou un laser).

Un photodétecteur capte ensuite ces variations pour traduire fidèlement le mouvement en signal exploitable, garantissant ainsi une précision extrême et une immunité totale face aux parasites électromagnétiques. [10]

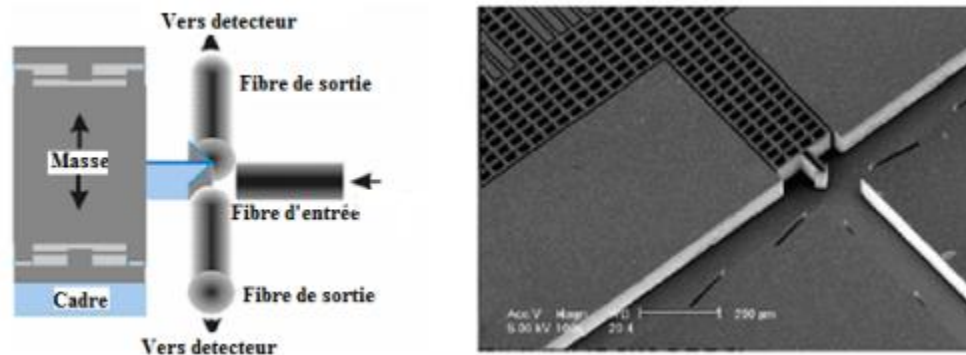


Figure 20: Un accéléromètre optique [10]

Comparaison entre les différents types des capteurs :

Type d'accéléromètre	Avantages	Inconvénients
À détection optique	Très grande précision, excellente immunité aux perturbations électromagnétiques	Complexe, fragile, encombrant
À structures résonantes	Très précis, excellente stabilité à long terme	Fabrication complexe, coût élevé
À effet tunnel	Sensibilité extrêmement élevée	Très instable, technologie complexe, principalement utilisée en recherche
Piézoélectrique	Excellent pour les vibrations et chocs à haute fréquence, robuste	Ne mesure pas les accélérations statiques
À piézo-jonction transistor	Bonne sensibilité, signal amplifié directement	Technologie émergente, stabilité limitée
Piézorésistif	Simple, robuste, faible coût	Dérive thermique, bruit plus élevé

14. Le choix de capteur de vibration

Le **Tableau 2** montre la gamme dynamique et la gamme de fréquences qu'on est capable d'atteindre en fonction du type de capteur utilisé. Aussi, on peut constater que les accéléromètres suffisent pour enregistrer les données sur toute la gamme de fréquences usuelle des machines. [5]

Tableau 2: Gamme d'utilisation de capteur [5]

Capteur	Gamme dynamique	Gamme de fréquence
Déplacement	40 dB	0 – 1000 Hz
Vitesse	60 dB	10 – 1000 Hz
Acceleration	146 dB	0.1 – 10 000 Hz

15. Méthodes de montage d'accéléromètre

Il est très important pour la qualité des mesures que l'accéléromètre soit fixé aussi rigidement que possible sur le spécimen. La courbe de réponse en fréquence donnée sur la fiche d'étalonnage de chaque accéléromètre est tracée pour un montage rigide. [5]

Tout ajout au montage de l'accéléromètre (boulon, cire, colle, aimant, tige) modifie la rigidité de l'accéléromètre et, par conséquent, affecte la gamme d'analyse en fréquence. Le mode de fixation des accéléromètres est régi par la norme ISO 5348. [5]

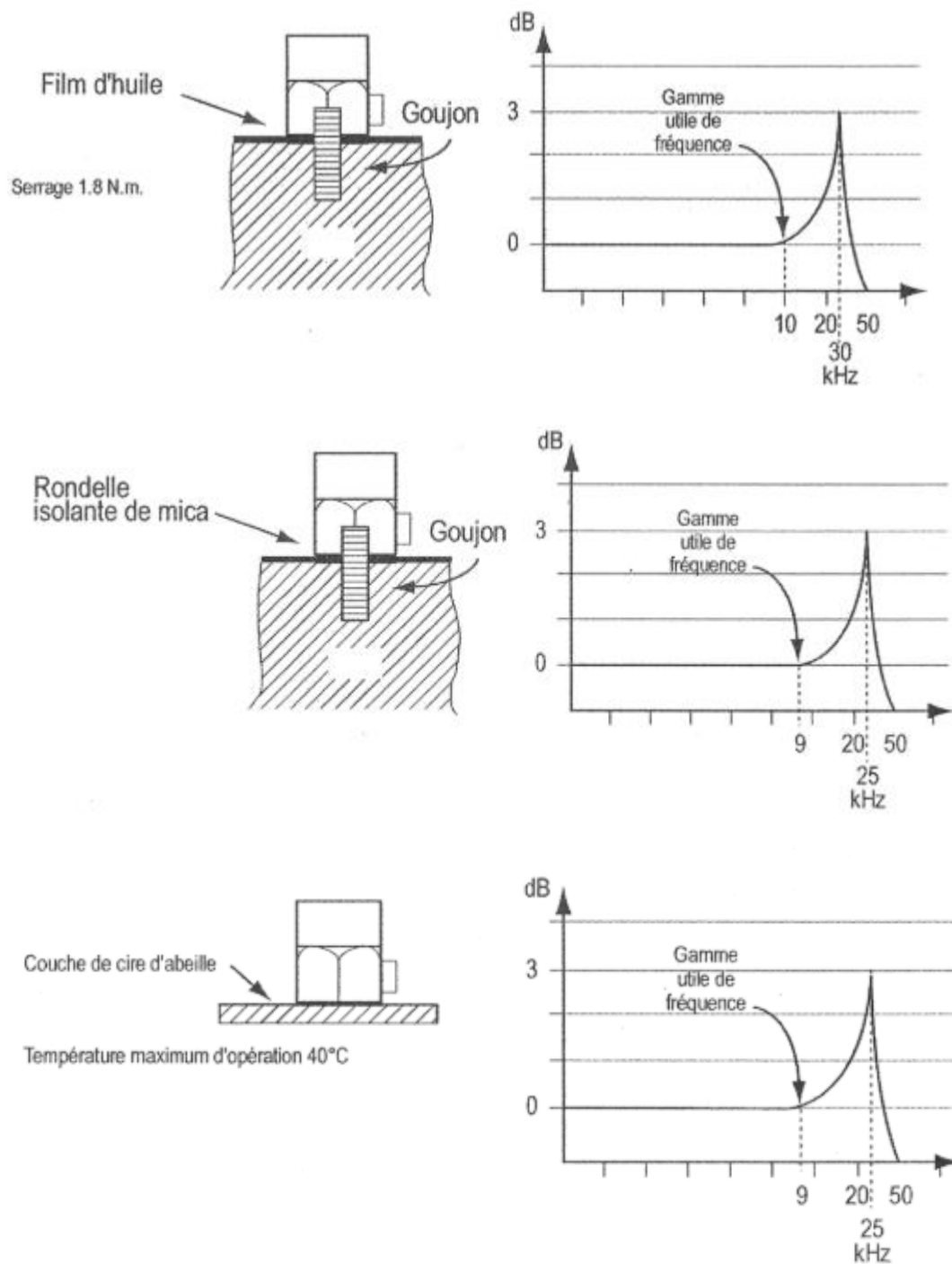


Figure 21: montage d'accéléromètre (goujon, cire d'abeille) selon la norme 5348 [5]

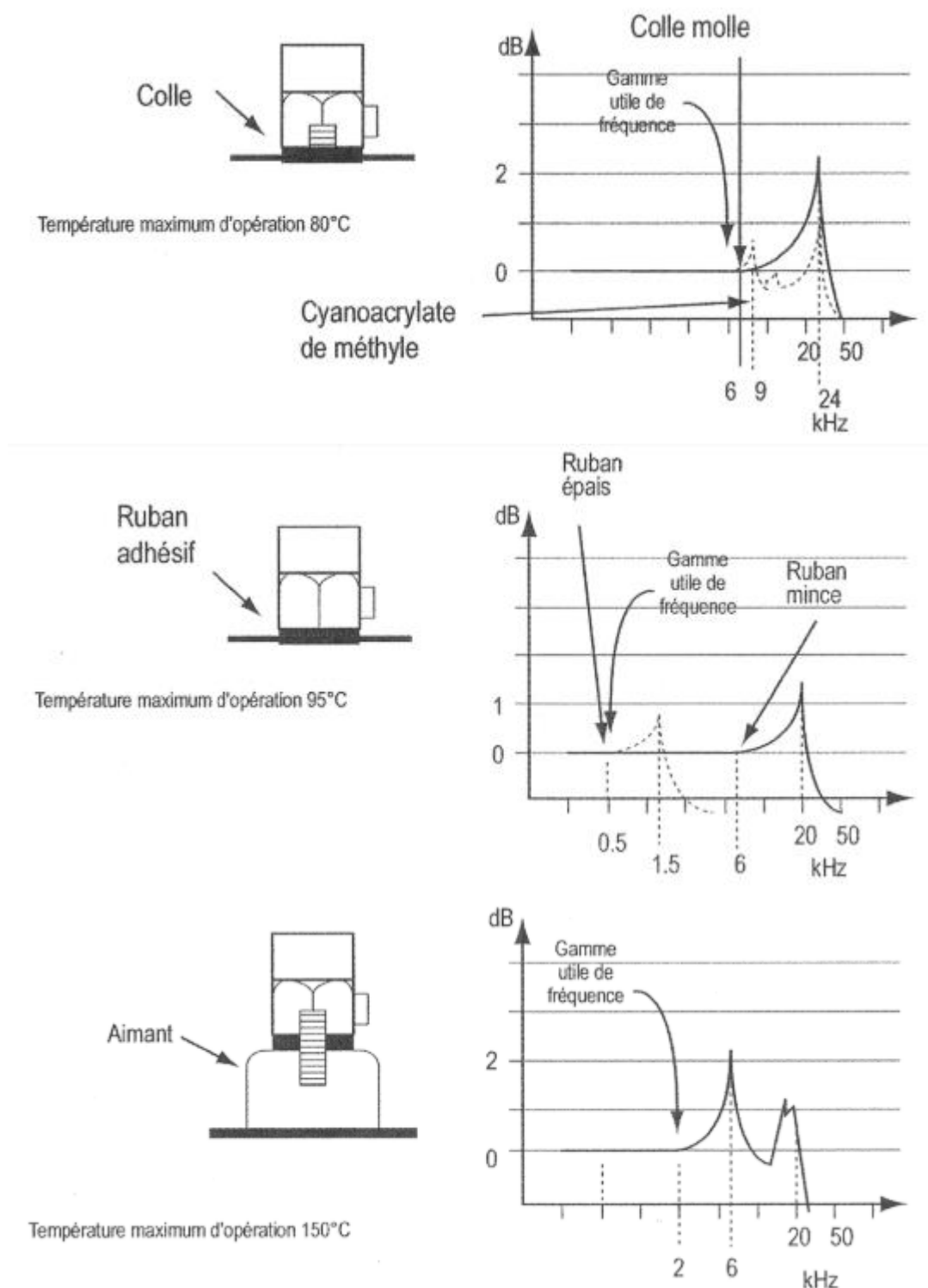


Figure 22: Montage d'accéléromètre (colle, aimant) selon la norme 5348 [5]

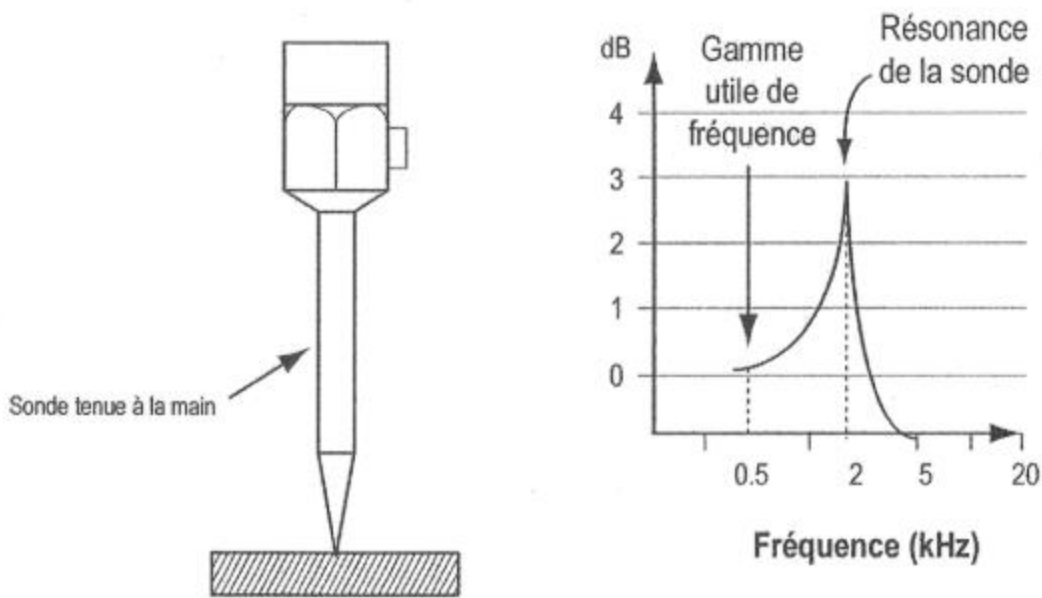


Figure 23: accéléromètre tenu à la main d'après ISO 5348 [5]

16. Les normes internationales sur les mesures de vibrations

Les vibrations des matériels roulants sont régies par plusieurs normes internationales permettant d'assurer la sécurité, la fiabilité et le confort des systèmes industriels et ferroviaires. Ces normes définissent les méthodes de mesure, les limites vibratoires admissibles ainsi que les techniques d'analyse utilisées dans la surveillance vibratoire.

16.1. ISO 10816

La norme ISO 10816 est l'une des références les plus utilisées pour l'évaluation des vibrations mécaniques des machines. Elle classe les niveaux vibratoires selon la vitesse vibratoire RMS afin de déterminer l'état de fonctionnement des équipements industriels et des systèmes roulants.

16.2. ISO 2631

La norme ISO 2631 concerne l'évaluation de l'exposition humaine aux vibrations. Elle est principalement utilisée dans les trains, tramways et véhicules industriels afin d'analyser le confort des passagers et les effets des vibrations sur le corps humain.

16.3. EN 12299

Dans le domaine ferroviaire, la norme européenne EN 12299 est utilisée pour évaluer le confort vibratoire des véhicules ferroviaires. Elle permet de mesurer les accélérations et les vibrations ressenties par les passagers durant le déplacement du matériel roulant.

16.4. UIC 518

Chapitre I : Généralités sur les vibrations mécaniques et les matériels roulants

La norme UIC 518 publiée par l'International Union of Railways définit les essais dynamiques des véhicules ferroviaires. Elle sert à analyser la stabilité, le comportement dynamique et la sécurité des trains pendant leur circulation.



Figure 24: Logo de l'ISO

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les notions de base sur les vibrations. Nous avons présenté les principes fondamentaux des vibrations mécaniques, ainsi que les grandeurs physiques associées telles que le déplacement, la vitesse et l'accélération. Nous avons également présenté les différents types de capteurs utilisés pour les mesures vibratoires, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites. Enfin, cette partie théorique a permis de poser les bases nécessaires pour la conception du système de mesure de vibration dans la suite du mémoire, en orientant le choix des composants et de l'architecture globale du vibromètre.

Chapitre II

Conception et réalisation

Chapitre II: Conception et réalisation

Partie 1 : Choix des composants

Introduction :

Dans ce chapitre pratique, nous aborderons la mise en œuvre concrète du vibromètre présenté dans la partie théorique. L'objectif principal est de transformer les concepts étudiés en un système fonctionnel capable de mesurer et d'analyser les vibrations avec précision. Nous détaillerons la conception matérielle, en présentant les différents composants utilisés ainsi que leur rôle dans l'architecture globale du système. Ensuite, nous aborderons la partie logicielle, incluant l'acquisition, le traitement et l'affichage des données vibratoires. Enfin, ce chapitre permettra de valider les choix techniques effectués et d'évaluer les performances du vibromètre à travers des tests expérimentaux.

1. Cahier de charge

Objectif principal :

Concevoir et réaliser un système embarqué capable de mesurer, enregistrer et analyser les vibrations des matériels roulants en temps réel afin d'améliorer la surveillance de leur état mécanique et de contribuer à la maintenance prédictive.

Tableau 3: Tableau des fonctions et ces exigences

Fonction	Exigence
Mesure vibratoire	Acquisition sur 3 axes (X, Y, Z)
Paramètres calculés	g, g RMS, g Pic, FFT
Affichage	Écran TFT couleur
Stockage	Carte SD + Webstocker
Communication	WiFi
Alimentation	Batterie rechargeable
Traitement	Temps reel
Portabilité	Système compact et embarqué
Coût	Faible coût de réalisation

2. Le capteur de vibration (ADXL345)

L'ADXL345 est un accéléromètre triaxial ultra-basse consommation fabriquée par Analog Devices. Il mesure des accélérations statiques et dynamiques sur trois axes.



Figure 25: ADXL345 [12]

Caractéristiques Techniques :

- Plage de mesure : $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$, $\pm 16g$
- Résolution : 13 bits (permet de détecter des variations d'inclinaison $< 1.0^\circ$)
- Tension d'alimentation : 2V à 3.6V
- Consommation : Ultra-faible (23 μ A)
- Interface de communication : I2C (Adresse par défaut : 0x53) et SPI. [11]

Chapitre II: Conception et réalisation

Description des pins de l'ADXL345 :

- VCC : La broche d'alimentation se connecte dans la plage de 3 à 5,5 V CC.
- GND : À connecter à la masse d'alimentation.
- CS (Sélection de puce) : Broche de sélection de puce.
- INT1 (Interruption 1) : Broche de sortie de l'interruption 1
- INT2 (Interruption 2) : Broche de sortie de l'interruption 2
- SDO (Sortie de données série) : Sortie de données série (SPI 4 fils) / Sélection d'adresse I2C alternative (I2C).
- SDA (Serial Data) : Données série (I2C) / Entrée de données série (SPI 4 fils) / Entrée et sortie de données série (SPI 3 fils).
- SCL (horloge série) : horloge de communication série. SCL est l'horloge pour I2C et SCLK est l'horloge pour SPI. [12]

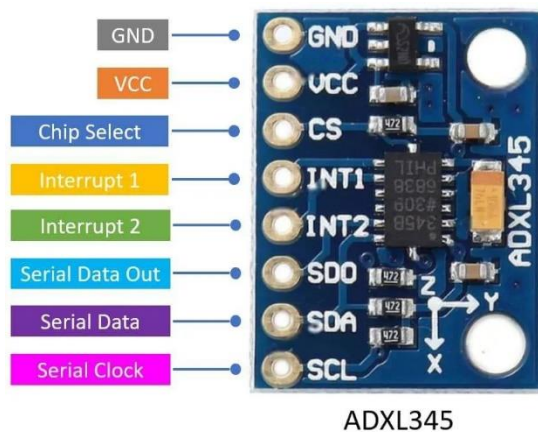


Figure 27: Brochage du module ADXL345 [12]

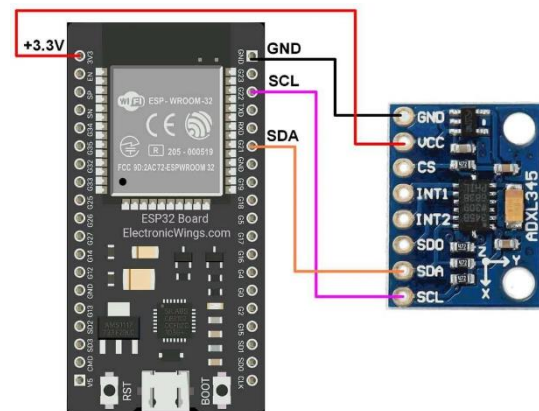


Figure 26: Connexion matérielle ADXL345 avec ESP32 [12]

3. Le microcontrôleur (ESP32 – WROOM)

L'ESP32-WROOM est un module (ou carte) tout-en-un développé par Espressif. Il intègre un microcontrôleur puissant avec des connexions Wi-Fi et Bluetooth, ainsi que tout le nécessaire (mémoire flash, quartz, circuit d'antenne) dans un petit boîtier compact. [13]



Figure 28: ESP32 - WROOM

Chapitre II: Conception et réalisation

Caractéristiques Techniques [13]:

Processeur et mémoire intégrés :

- ESP32-D0WDQ6 embarqué, microprocesseur Xtensa double cœur 32 bits LX6, jusqu'à 240 MHz
- 448 KB ROM
- 520 KB SRAM
- 8 KB SRAM dans RTC

Wi-Fi:

- 802.11b/g/n
- Débit binaire : 802.11n jusqu'à 150 Mbits/s
- Agrégation A-MPDU et A-MSDU
- Prise en charge d'un intervalle de garde de 0,4 μ s
- Plage de fréquences centrales du canal de fonctionnement : 2 412 à 2 484 MHz

Bluetooth:

- Spécifications Bluetooth V4.2 BR/EDR et Bluetooth LE
- Émetteur class-1, class-2 et class-3
- AFH
- CVSD et SBC

Composants intégrés au Module:

- 40 MHz oscillateur cristal
- 4 MB SPI flash

Conditions opératoires:

- Voltage/Power supply: 3.0 ~ 3.6 V
- Temperature: -40 ~ 85 °C

4. Interface d'affichage

4.1. Ecran TFT

TFT écran LCD de 2,4 de 240 x 320 pixels, avec un affichage clair grâce à sa capacité à reproduire 262 000 nuances de couleurs. Il est équipé d'un rétroéclairage à 4 LED blanches, et d'un écran tactile résistif à 4 fils pour une interaction intuitive. [14] [15] [16]



Figure 29 : Ecran TFT

Chapitre II: Conception et réalisation

Caractéristiques Techniques [14]:

- Circuit intégré du contrôleur : ILI9341
- Taille de l'écran : 2.4 pouces
- Technologie d'affichage : TFT LCD couleur
- Résolution : 240 x 320 pixels
- Interface de communication : SPI / 8-bit / 16-bit parallèle
- Tension de fonctionnement : 3.3V – 5.0V
- Type de tactile : Résistif (fonctionne avec le stylet ou le doigt)
- Angle de vision : Large pour une meilleure lisibilité
- Couleurs prises en charge : 65K couleurs (16-bit)

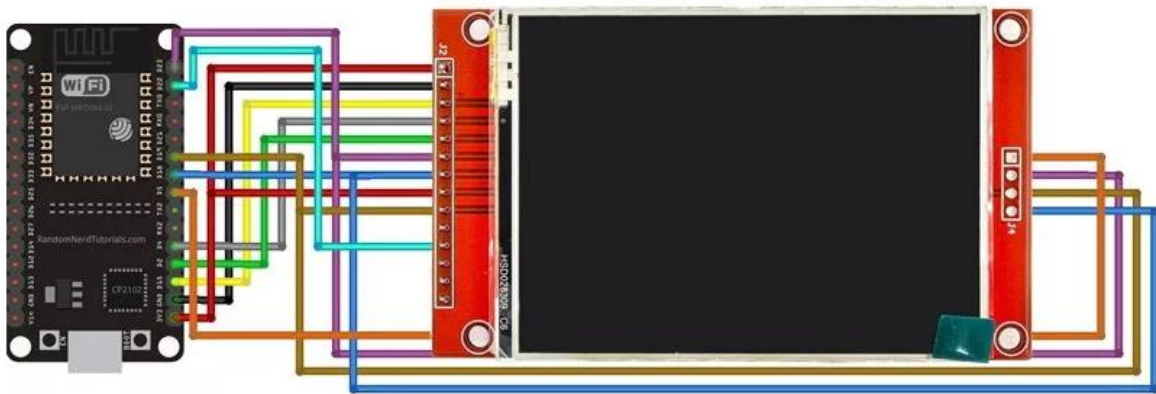


Figure 31: connexion matérielle de l'écran TFT avec l'esp 32 (écran + circuit tactile + module SD carte) [41]

4.2.Interface Web

L'interface web permet d'afficher et stocker tous les paramètres vibratoires ainsi que les données mesurées et calculées par le microcontrôleur en temps réel, aussi la permission d'affichage des graphes de FFT et vibration en temps réel.

Cette interface donne l'accès aux fichiers enregistrés dans la carte SD, le téléchargement et la suppression des fichiers souhaités, et le formatage de cette dernière.

L'interface utilise le webstocket comme un serveur. Ce dernier permet d'enregistrer les données dans le web avec une fonction permet d'enregistrer un fichier au format .csv dans le pc chaque 10 minutes. De plus, le serveur donne la main pour le téléchargement manuel.

5. Stockage des données dans la carte SD

Le module de la carte SD est intégré dans le support de l'afficheur TFT (figure 29, figure 32), et via le protocole de communication SPI, on peut enregistrer et lire fichiers enregistrés.

La carte SD doit posséder une capacité de stockage d'environ 16 GB pour permettre un long temps d'enregistrement des données.

6. Horloge DS3231

Le DS3231 est un module d'horloge temps réel (RTC) de haute précision, largement utilisé dans les projets d'électronique pour maintenir l'heure exacte même lorsque l'appareil principal est hors tension.

Caractéristiques Principales

- Précision extrême : Intègre un capteur de température pour compenser les variations du quartz (TCXO).
- Alimentation de secours : Emplacement pour pile bouton maintenant l'heure durant plusieurs années sans alimentation externe.
- Interface simple : Communication via le protocole I2C (broches SDA et SCL).
- Mémoire intégrée : Comprend souvent une puce EEPROM AT24C32 additionnelle pour stocker des données [17] [18]

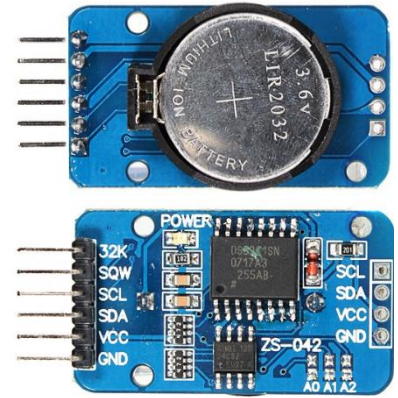


Figure 32: RTC DS3231 [17]

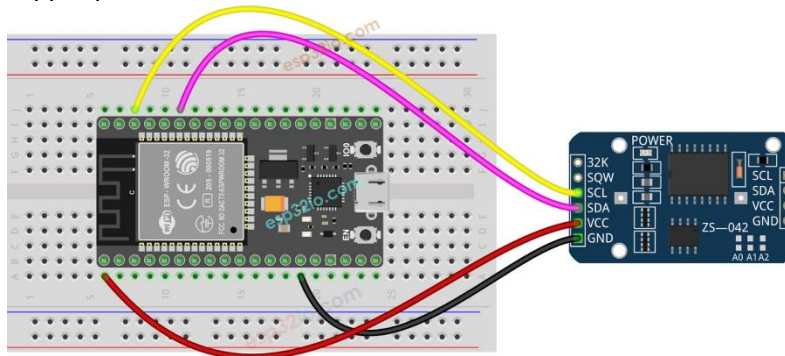


Figure 33: Connexion matériel entre le DS3231 et le ESP32 [40]

7. Alimentation du système

Tableau 4: La consommation d'énergie de chaque composant

COMPOSANTS	Consommation d'énergie
ESP32	Entre 80 et 240 mA (utilisation de WiFi/BT)
ADXL345	140 μ A (Mesure continue)
DS3231	200 μ A (En communication I2C)
Circuit tactile	10 mA
Carte SD	50 mA à 100 mA (Pendant l'écriture ou la lecture)

Chapitre II: Conception et réalisation

Screen	Entre 60 et 100 mA
--------	--------------------

En combinant tous ces éléments, le système aura une consommation de :

- Moyenne en fonctionnement actif : environ 220 mA à 350 mA
- Pics de consommation : Jusqu'à 450 mA

Le meilleur choix de batteries est deux cellules de 3.7 volts avec une capacité de 3000 mAh pour chaque batterie, liée en parallèle (3.7 V et 6000 mAh).

Selon l'équation d'autonomie :

$$\text{Autonomie (heures)} = \frac{\text{Capacité de batterie (mAh)}}{\text{Consommation de circuit (mA)}} = \frac{6000}{300} = 20 \text{ heures}$$

Donc les batteries donnant une alimentation suffisant pour 20 heures de fonctionnement sans s'arrêter quand le système fonctionne avec une consommation moyenne (environ 300 mA).

Si on ajoute une fonction de time out pour l'écran, la consommation d'énergie du système va être environ 220 mA. Donc la durée d'autonomie du système sera d'environ 27 heures.

- Le circuit de charge TP4056 :

Le module TP4056 est un chargeur linéaire complet conçu pour les batteries Lithium-Ion ou Lithium-Polymère (Li-Po) à cellule unique (3,7V). Il régule automatiquement le courant et la tension pour recharger les cellules en toute sécurité via une alimentation de 5V.



Figure 34: Circuit de charge TP4056

- Le circuit booster MT3608 :

Le module MT3608 est un convertisseur élévateur de tension (Boost Converter) DC-DC miniature très populaire, capable de hausser une faible tension d'entrée (de 2V à 24V) vers une tension de sortie supérieure réglable (de 5V à 28V) avec un courant maximal théorique de 2A. C'est une solution économique idéale pour alimenter des circuits de 5V, 9V ou 12V à partir d'une simple batterie Lithium-Ion (3,7V).

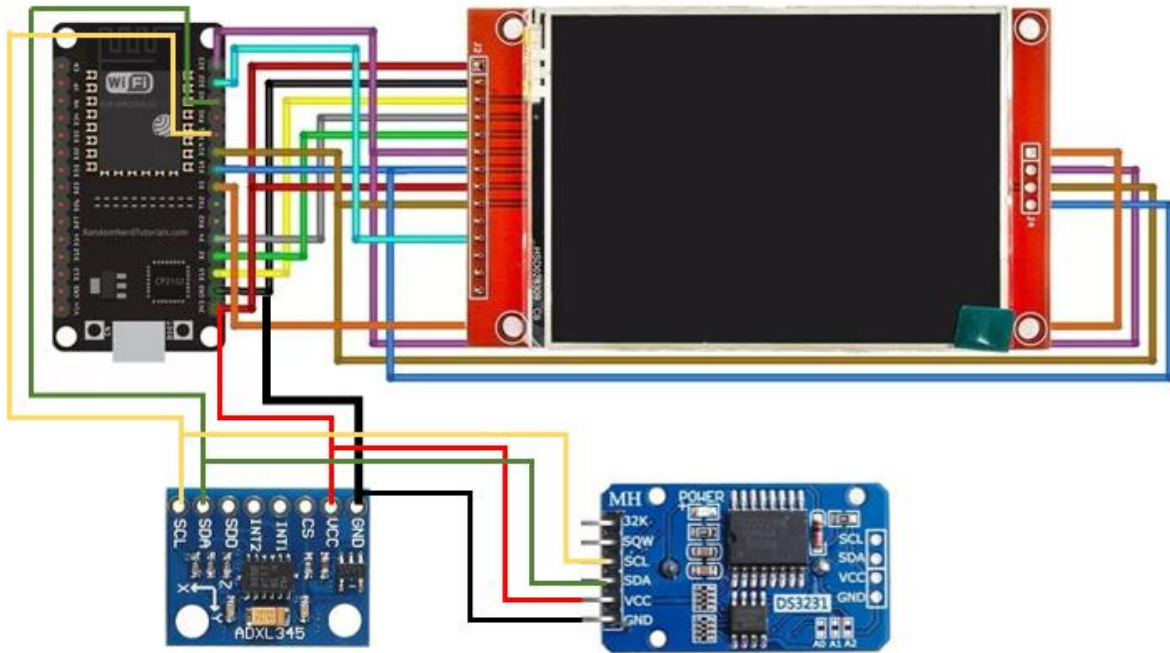
Ce module est utilisé pour assurer une alimentation de stable de 5V.



Figure 35: Circuite booster MT3608

Partie 2 : Réalisation du système de mesure vibratoire

1. Conception électronique



1.1. Tests sur une plaque d'essai

La première étape est de tester chaque composant avec un code de test fourni avec la bibliothèque de composant (voir Annex n°03).

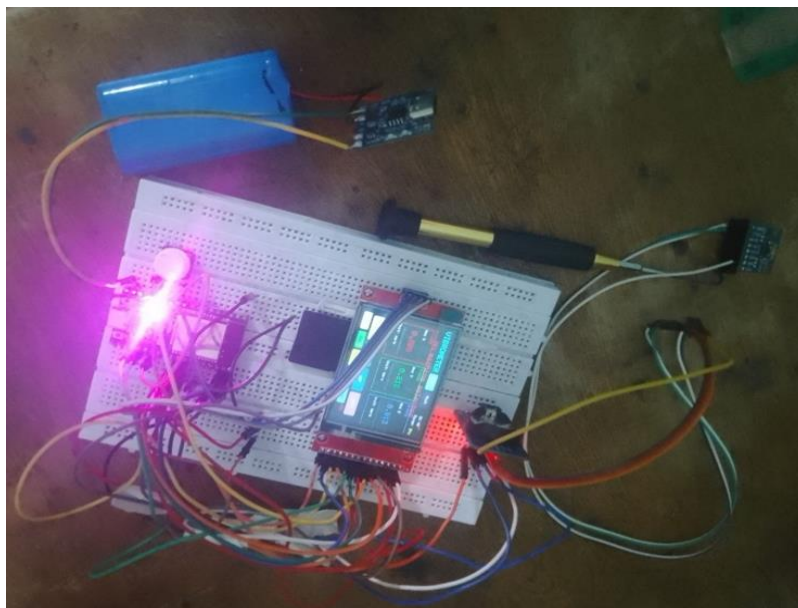


Figure 36: Le test de système dans une plaque d'essai

Chapitre II: Conception et réalisation

1.2. Carte PCB

Après les tests des composants et la validation du système on passe à la conception de la carte PCB (voir Annex n° 01).

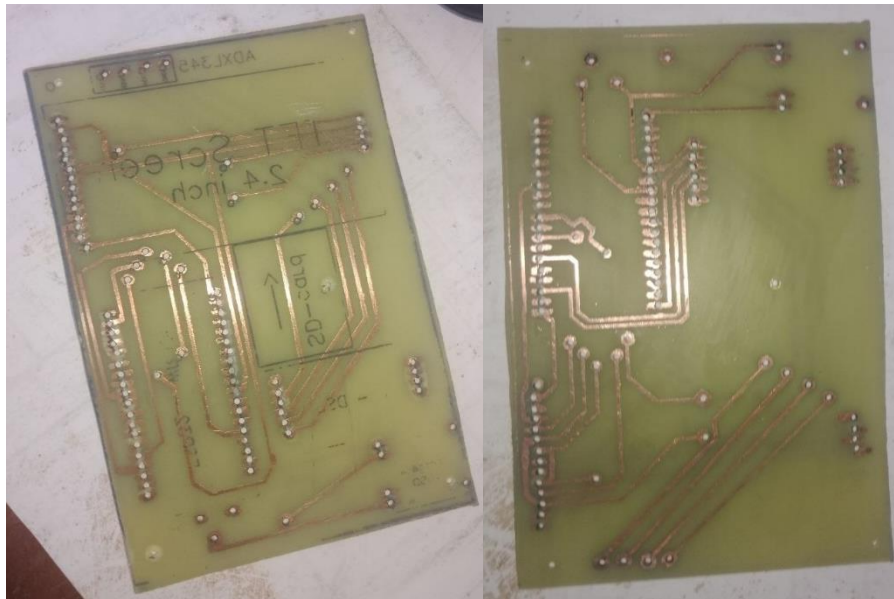


Figure 37: Plaque PCB fabriqué par le traitement avec le chlorure de fer

2. Développement logiciel

2.1. Espace de développement (Arduino IDE)

L'Arduino IDE (Environnement de Développement Intégré) est le logiciel officiel open-source qui permet de rédiger, compiler et téléverser du code sur les cartes électroniques Arduino.



Figure 38: Logo de l'Arduino IDE

Algorithme de système

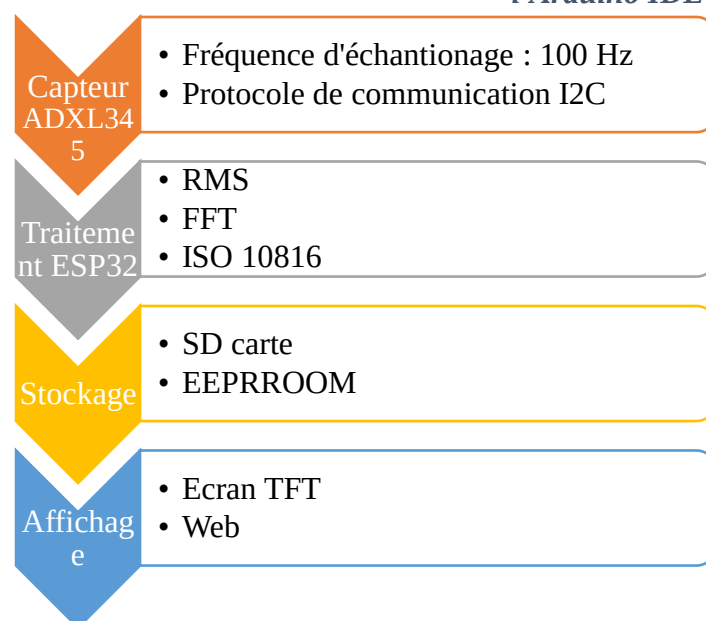


Figure 39: Résumé de l'algorithme de fonctionnement de système

Chapitre II: Conception et réalisation

Ce schéma montre un résumé de système commençant par la mesure pris par l'ADXL345 passant par le traitement de cette mesure par l'ESP32 vers le stockage et l'affichage. **Tâches périodiques :**

- 10 ms: Lecture capteur + FFT buffer
- 100 ms: Calculs RMS + Pic + Pic-Pic
- 200 ms : WebSocket broadcast
- 1 s : Sauvegarde SD + Mise à jour horaire
- 5 s: Flush cache SD
- 1 h: Sync RTC NTP

2.1.1. Algorithme principal

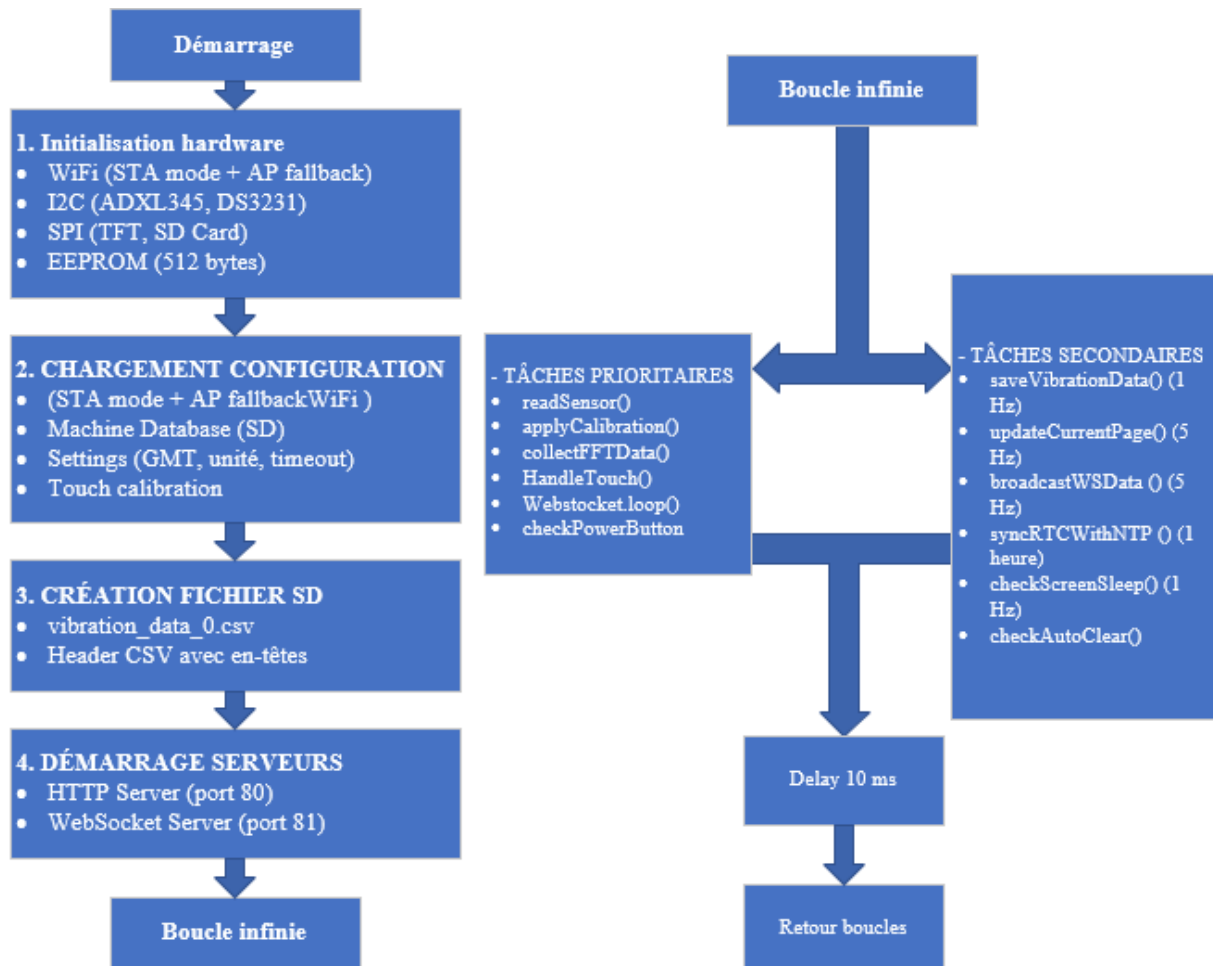


Figure 40: algorithme principal de système

Après le démarrage de système, la carte ESP32 recherche la présence des composant, si un composant est absent, un message d'erreur est envoyé.

Chapitre II: Conception et réalisation

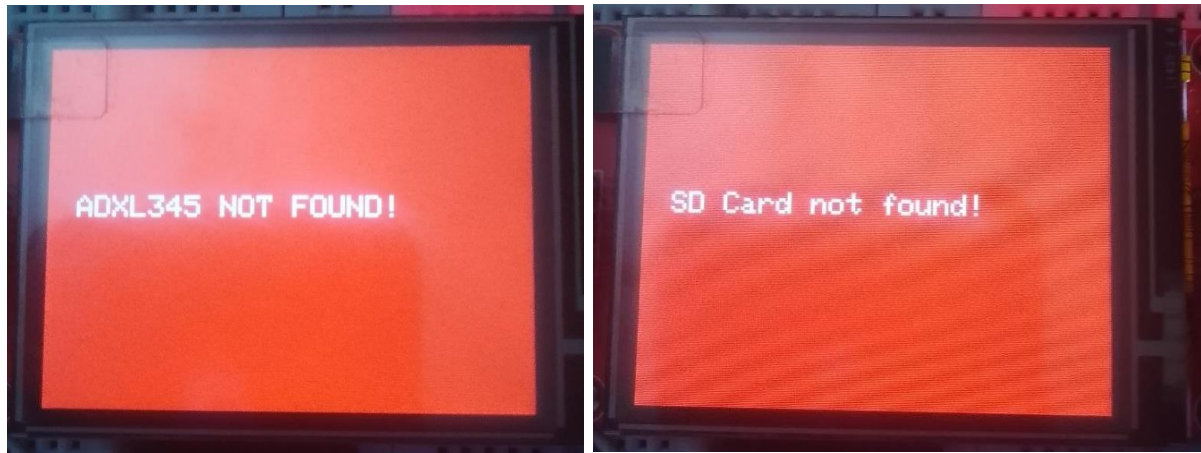


Figure 41: exemple d'affichage d'erreur (absence de composant)

Après l'initialisation des composants, le système charge ces configurations commençant par la connexion au WiFi présent, dans le cas de l'absence de WiFi, la carte ESP32 crée son propre point d'accès.

Après, les données de Machines_DataSet qui existe dans la carte SD sont chargées. En même temps, le système charge les paramètres enregistrés dans l'EEPROM (mémoire de l'ESP32) : GMT, unité, time out, screen touche calibration.

Un nouveau fichier CSV sera créé dès que le système commence à nouveau, ainsi que le démarrage de serveur dans le websocket.

Les tâches prioritaires :

- Read Sensor : prend une mesure d'accélération selon x, y, z chaque 10 ms.
- Apply Calibration : ajuste les mesures selon l'équation $y = a x + b$, où x est la mesure prise.
- Collect FFT Data : collection de 128 mesures et applique la transformée de Fourier.
- Handle Touch : vérifier si l'écran est touché.
- websocket.loop : pour se connecter au serveur web.
- Check Power Button : pour allumer ou éteindre le système.

Les tâches secondaires :

- saveVibrationData : sauvegarder les données mesurées et calculer.
- updateCurrentPage : pour basculer entre les pages de l'écran (calibration_page, Data_page ...)
- syncRTCWithNTP : ajuster l'heure avec le réseau pour chaque heure pour éviter les variations.
- checkScreenSleep : vérifier si l'écran est allumé, si oui calculer le temps pour l'éteindre.
- checkAutoClear : pour effacer le cache chaque période.

2.1.2. Sous-Algorithmes 1 : Acquisition et Calibration

À chaque cycle d'acquisition, le système interroge l'accéléromètre pour obtenir les trois valeurs d'accélération brute sur les axes X, Y et Z.

Chapitre II: Conception et réalisation

Immédiatement après la lecture, l'algorithme applique l'équation de calibration :

$$\text{Acc_calibrée} = A \times \text{Valeur_brute} + B$$

Où A représenté le gain et B l'offset, coefficients préalablement déterminés lors de la procédure de calibration.

2.1.3. Sous-Algorithm 2 : Calcul des paramètres vibratoires

Cet algorithme, exécuté toutes les 100 millisecondes, calcule l'ensemble des indicateurs vibratoires standards que tout analyseur professionnel doit fournir : la valeur efficace (RMS), l'amplitude crête (Pic) et l'amplitude crête à crête (Pic-to-Pic) pour chacun des trois axes, ainsi que la synthèse vectorielle sur les trois axes.

Equations :

- RMS : $\text{RMS} = \sqrt{(\sum x_i^2 / N)}$
- Amplitudes crête et crête-à-crête : $\text{pic} = \max(|x_i|)$, $\text{PicPic} = \max(x) - \min(x)$
- Synthèse trois axes : $\text{RMS_total} = \sqrt{(\text{RMS_x}^2 + \text{RMS_y}^2 + \text{RMS_z}^2)}$

2.1.4. Sous-Algorithm 3 : FFT

La FFT (Fast Fourier Transform) est l'algorithme le plus sophistiqué du système. Elle transforme le signal temporel (accélération en fonction du temps) en signal fréquentiel (amplitude en fonction de la fréquence), permettant d'identifier les fréquences de vibration dominantes qui sont autant de signatures des défauts mécaniques.

2.1.5. Sous-Algorithm 4 : conversion vitesse et ISO 10816

La conversion d'accélération a une vitesse fait par l'équation : $v = a / (2\pi f)$.

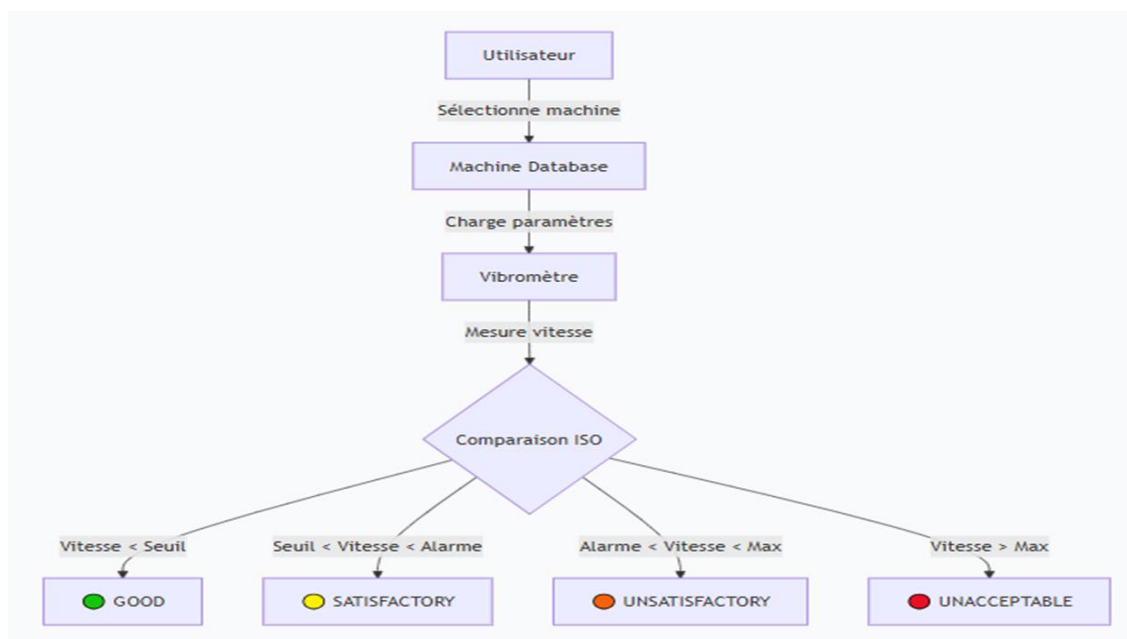


Figure 42: Schéma de fonctionnement d'évaluation ISO 10816

Chapitre II: Conception et réalisation

L'évaluation ISO 10816-3 repose sur quatre classes de machines (Groupes I à IV) définies par leur puissance et leur type de montage.

L'algorithme récupère son groupe et compare la vitesse RMS mesurée à quatre seuils : Good, Satisfactory, Unsatisfactory et Unacceptable.

2.1.6. Sous-Algorithme 5 : Stockage sur la carte SD

Chaque 50 ms la carte ESP32 stocke des données, celles-ci sont d'abord stockées par paquets de 10 résultats.

Chaque point contient 22 champs : timestamp Unix, heure formatée, 3 accélérations, 3 RMS, 3 pic, 3 pic-pic, 3 fréquences dominantes, 3 amplitudes et la plage de mesure.

Soit environ 22×4 octets = 88 octets par point, et 880 octets pour le tampon complet.

Quand le fichier atteint 10 000 lignes des mesures, le système crée un nouveau fichier pour éviter les problèmes d'enregistrement.

2.1.7. Sous-Algorithme 6 : Websocket

Le WebSocket est un protocole de communication bidirectionnel qui maintient une connexion permanente entre le serveur ESP32 et les clients web.

Contrairement au HTTP classique où le client doit interroger périodiquement le serveur (polling), le WebSocket permet au serveur d'envoyer spontanément des données dès qu'elles sont disponibles, réduisant ainsi la latence de 500 ms à moins de 50 ms.

2.1.8. Sous-Algorithme 7 : Affichage et interface tactile

L'algorithme d'affichage suit une architecture de type Modèle-Vue-Contrôleur adaptée à l'embarqué.

Le "Modèle" est constitué des variables globales contenant les données mesurées (rmsX, dominantFreq, etc.).

La "Vue" est l'ensemble des fonctions drawPage() qui dessinent l'interface graphique sur le TFT.

Le "Contrôleur" est la fonction handleTouch() qui traite les interactions utilisateur.

Gestion des pages :

- La page principale

La page principale contient un ensemble de données, elle affiche les accélérations (ou les vitesses si on change l'unité dans les paramètres) selon les 3 axes, cette page aussi donne l'heure et la plage de mesure sélectionnée ainsi que la machine sous test de mesure.

Elle contient aussi un ensemble des boutons qui permet la navigation entre les pages :

- Set (bouton des paramètres),
- Mach (base de données des machines),

Chapitre II: Conception et réalisation

- Acc (l'accélération de chaque axes),
- RMS (le rms de chaque axe),
- AMP (l'amplitude de chaque axe),
- Total (pour la synthèse des 3 axes : amplitude total, rms total, fréquence total),
- Mean (pour la page principal),
- Cal (pour la page de calibrage),
- Range (pour changer le calibre de la mesure),
- Graph (pour visualiser les graphes),
- Data (pour visualiser les données et enregistrer dans la carte SD).

Et accoté de bouton data il y a la situation de la carte SD (Ok : carte SD présente, ERR : carte SD absente). Les figures 43 et 44 résument toutes ces fonctions.

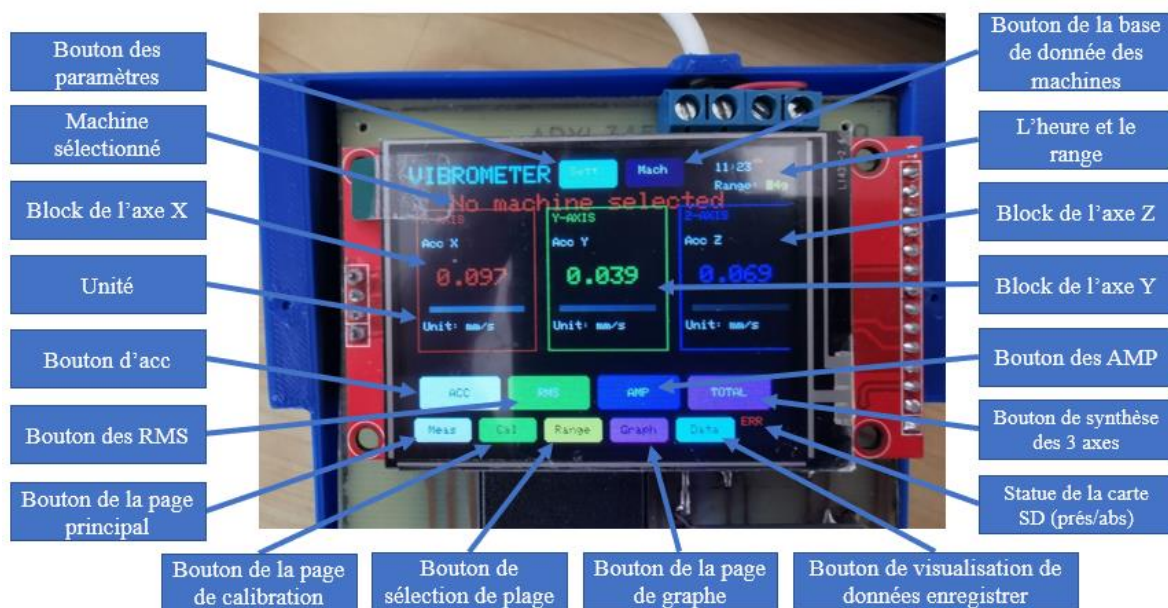


Figure 43:page principale (Acc - TFT screen)



Figure 44: ACC et RMS data_page

Chapitre II: Conception et réalisation

- Synthèse des 3 axes



Figure 45: synthèse des 3 axes (évaluation iso)

La synthèse des 3 axes consiste aussi à l'évaluation ISO – 10816 selon la machine sélectionnée. L'unité de mesure doit être en mm/s, sinon l'écran affiche « pour l'évaluation ISO – 10816, change l'unité a mm/s » au lieu de l'évaluation.

- Page de calibration



Figure 46: page de calibration

Cette étape effectue la vérification de calibration du système, elle affiche la référence de calibration qui peut être changée avec le bouton « ref ».

Les boutons « X », « Y », « Z » servent à basculer entre les axes pour les calibrer (chaque axe doit être calibré séparément).

Le bouton « Mesurer repo » pour prendre la mesure dans l'état de repos.

Chapitre II: Conception et réalisation

Le bouton « Mesure Excite » pour prendre la mesure par a port a la référence.

Le bouton de « Save & Calc » est pour calculer et sauvegarder les coefficients de calibration (A et B).

- Page de calibre 'range'



Figure 47: Page des plages

Cette page affiche les quatre calibres du capteur qui peuvent être utilisés.

- Page des graphs

Comme montré sur la figure 50, la page de graphe affiche deux types des graphs :

- Graphe FFT : Ce graphe affiche les FFT des 3 axes après qu'il prenne 128 échantillons.
- Le graphe temporel : ce graphe affiche l'accélération en temps réel.

On peut basculer entre ces graphs par les boutons « FFT » et « temporel ».

Le bouton « refresh » permet de rafraichir les graphs.

Chapitre II: Conception et réalisation

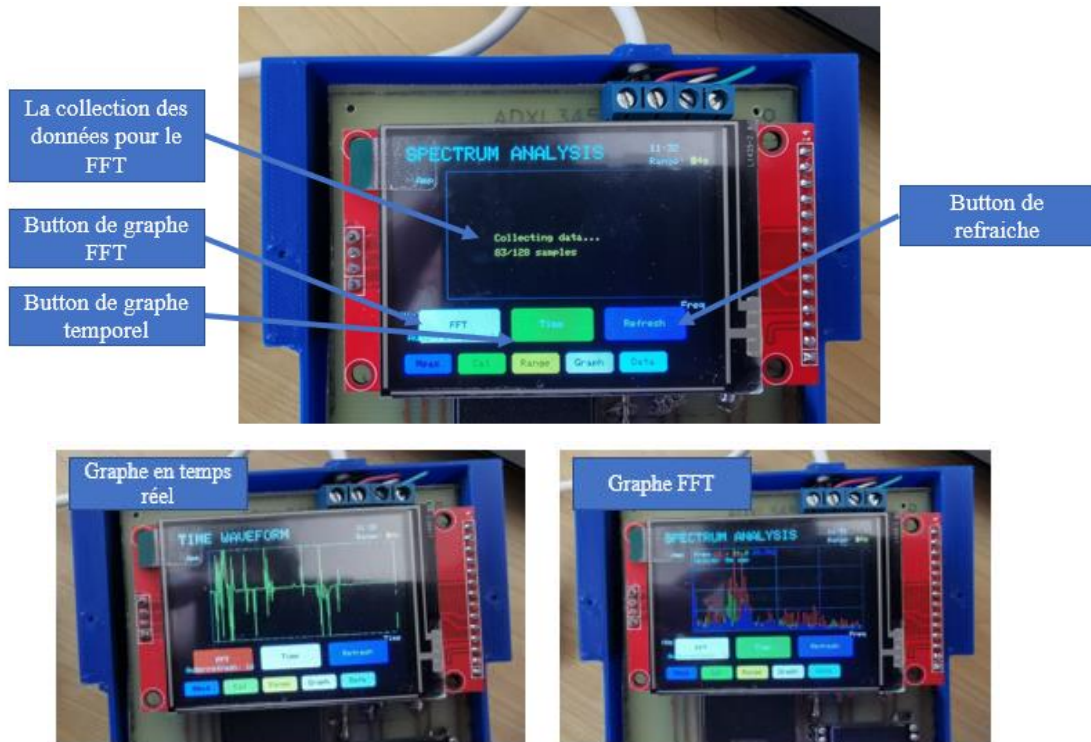


Figure 48: Menu de présentation des graphes

- Page de sauvegarde des données

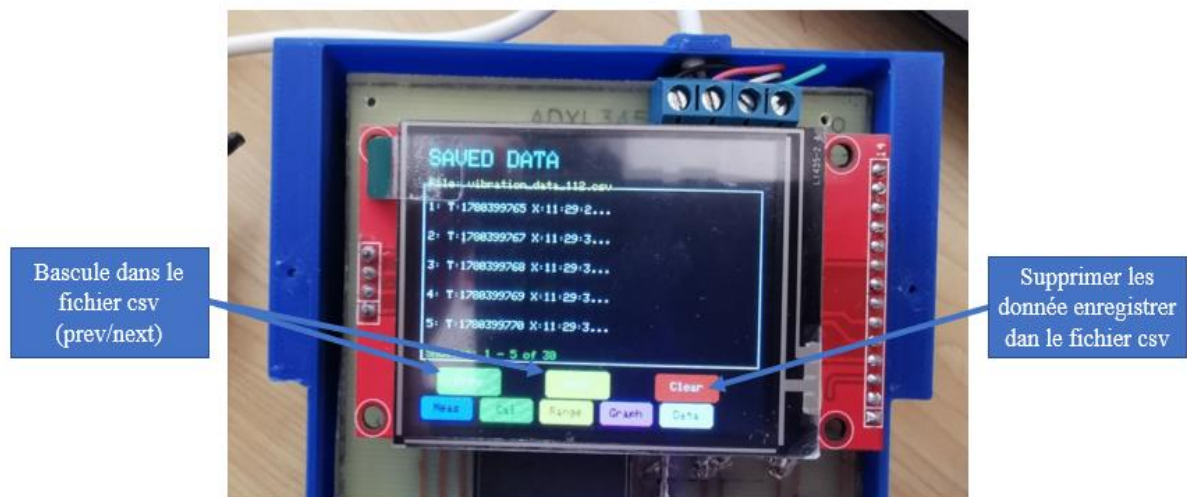


Figure 49: Page d'enregistrement des données dans la carte SD

Cette page affiche les données enregistrées dans la carte SD, elle contient trois boutons pour basculer dans le fichier ou supprimer les données.

Elle affiche aussi le fichier entrant et permet d'écrire sur ce dernier.

Chapitre II: Conception et réalisation

- Page de machine 'dataset'

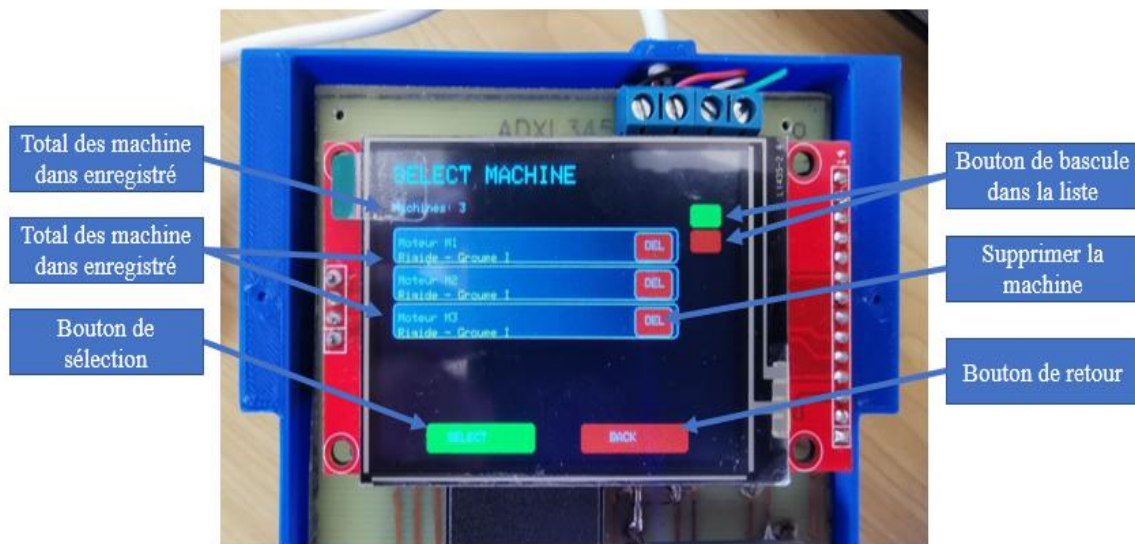


Figure 50: Sélection d'une machine à partir de la base de données selon la norme ISO 10816



Figure 51: Pages d'ajoute d'une nouvelle machine

La page de machine menu contient deux boutons, un pour ajouter une nouvelle machine, et l'autre pour sélectionner une machine enregistrée.

Pour ajouter une nouvelle machine, il faut passer par 3 étapes :

1. Sélectionner le nom de la machine depuis une liste prédéfini (moteur M1, moteur M2, pompe P1 ...).
2. Sélectionner le type d'accouplement
3. Sélectionner le groupe ISO

Chapitre II: Conception et réalisation

La page « select machine » permet de choisir une machine enregistrée, supprimer une machine, et le nombre des machines à enregistrer.

- Page des paramètres



Figure 52: Page des paramètre

La page des paramètres permet de modifier :

- L'heure GMT (de -12 jusqu'au +12),
- Le 'screen time out' (de 30 sec jusqu'à 5 min, ou le désactiver carrément),
- Le changement d'unité (g RMS, g Pic, mm/s², m/s², mm/s),
- L''auto clear cache' (de 5 min jusqu'à 60 min, ou le désactiver carrément).

Cette page donne l'autorisation de sauvegarder les facteurs de calibration et le formatage de la carte SD.

2.1.9. Affichage dans la page web

Pour accéder à la page web on doit prendre l'adresse IP affichée dans la page des paramètre (TFT screen), aussi il faut que l'ESP32 et le navigateur soient connectés au même réseau.

- La page principale

La page principale affiche les paramètres vibratoires, les accélérations des trois axes, la situation de l'ESP32 (connecté/déconnecté) et le niveau vibratoire par axe.

Chapitre II: Conception et réalisation



Figure 53: Page principale de l'affichage web

- Page d'évaluation ISO – 10816

Cette page affiche les coordonnées de la machine à vérifier, la table d'ISO – 10816 et le graphe d'évolution de la vitesse vibratoire.

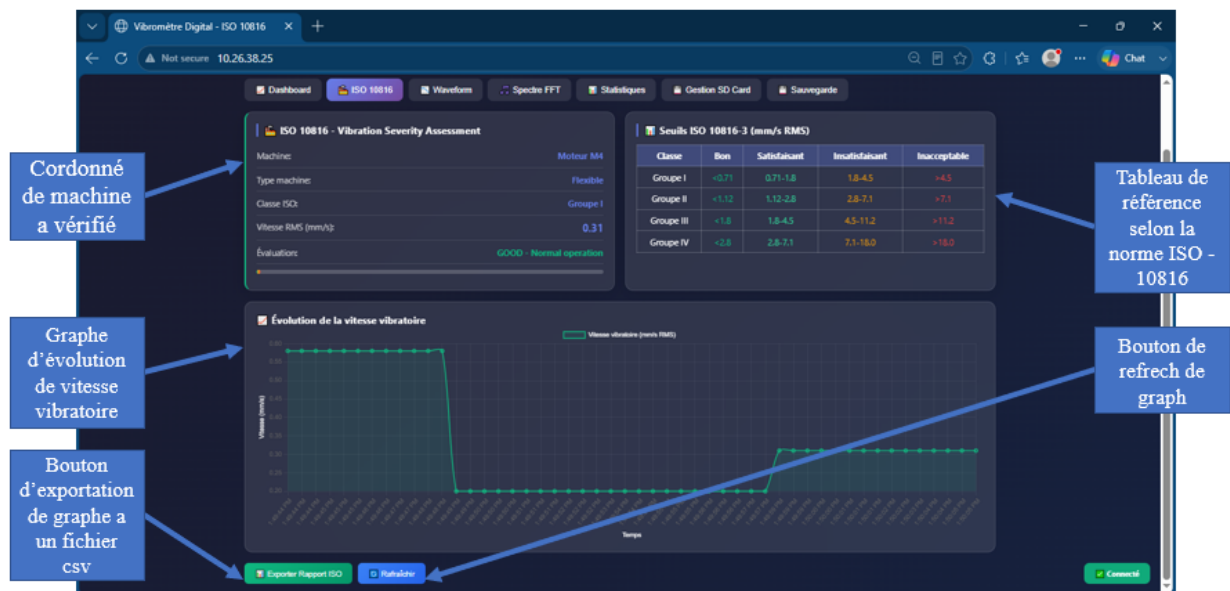


Figure 54: Page d'affichage web des caractéristiques de la machine selon l'ISO - 10816

Chapitre II: Conception et réalisation

- Page de graphe temporel

Cette page visualise le graphe temporel des accélérations selon les trois axes (x, y, et z).

Elle permet aussi de télécharger les données de graphe en format csv.



Figure 55: Graphe temporel web

- Page de graphe FFT

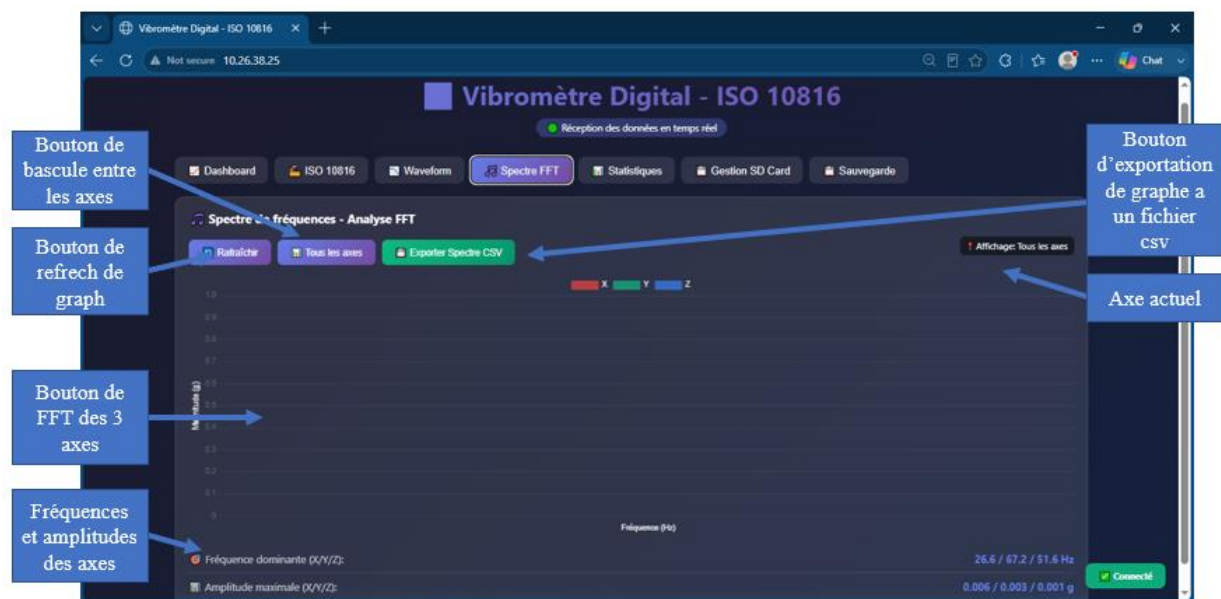


Figure 56: Graphe FFT web

Chapitre II: Conception et réalisation

Cette page visualise le graphe FFT des accélérations selon les trois axes (x, y, et z). Elle permet de basculer entre les axes, et la conversion des données de graphe en csv.

Elle affiche aussi les fréquences et les amplitudes de chaque axe.

- Page des statistiques

Cette page permet l'affichage des résultats des moyennes des mesures, l'écart type, le point maximal et minimal pour chaque axe.

Elle permet aussi de visualiser la distribution de chaque axe dans un graphe.

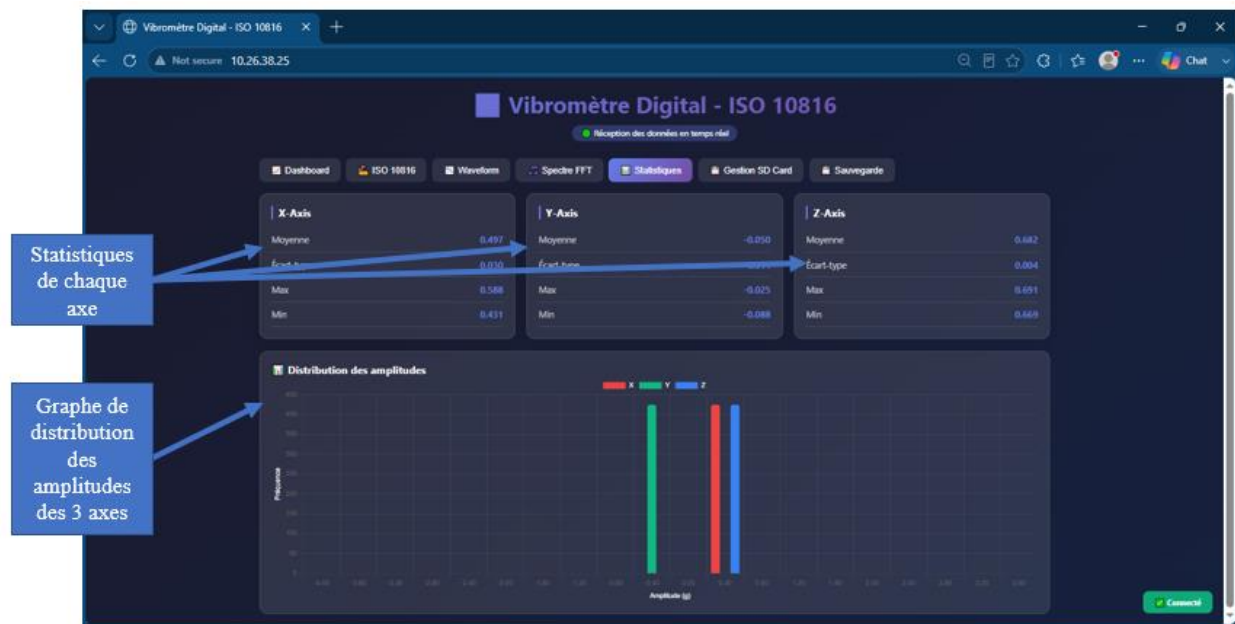


Figure 57: Page des statistiques web

- Gestion de la carte SD

Cette page permet la gestion de la carte SD à distance sans avoir besoin de manipuler le boîtier de notre prototype. Elle permet aussi de lire les fichiers csv enregistrés dans la carte SD, télécharger ou supprimer ces fichiers, ainsi que le formatage de la carte SD.

La fonction « tous télécharger » permet de télécharger tous les fichiers à la fois.

Cette page donne aussi l'accès à la base de données des machines enregistrées dans la carte SD, par contre il n'est pas possible d'accéder au fichier des facteurs de calibration. Elle fournit aussi les informations de la carte SD : sa taille, espace occupé, espace libre et son état.

Chapitre II: Conception et réalisation

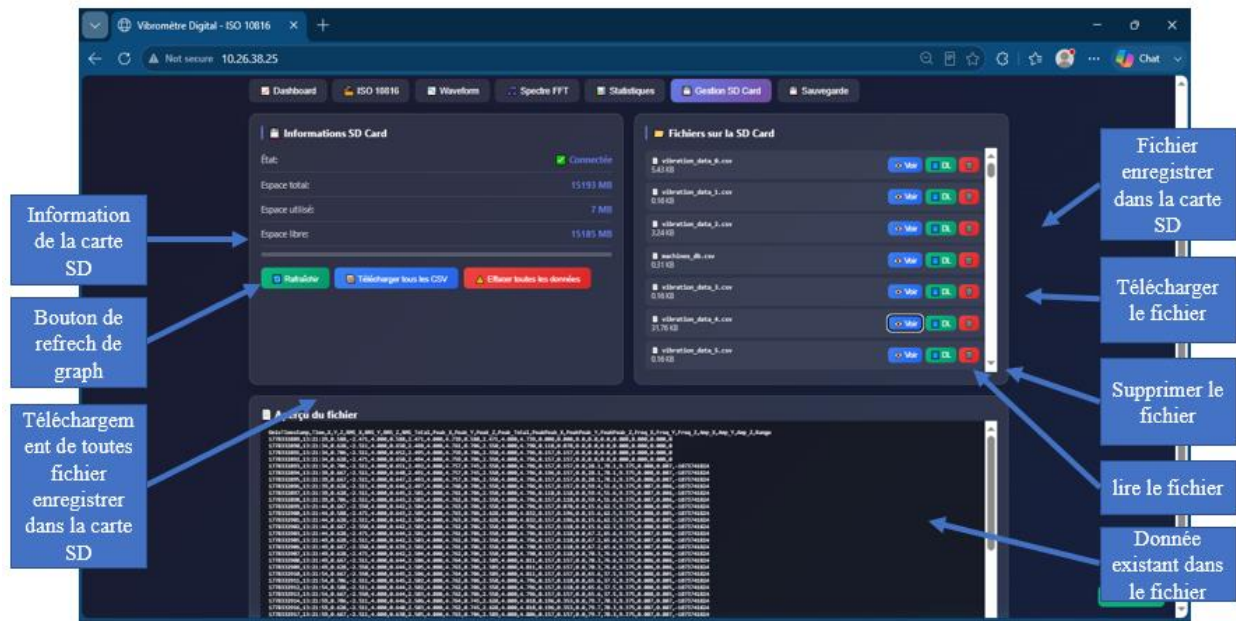


Figure 58: Gestion de la carte SD web

- Sauvegarde automatique dans le web

Cette page est utilisée pour télécharger les données enregistrées dans le web, la sauvegarde automatique se fait chaque 10 min, mais on peut sauvegarder ou effacer les données par des boutons sur cette page. Il est possible de désactiver cette fonction aussi. Elle affiche aussi l'historique de tous les téléchargements faits dans le web.

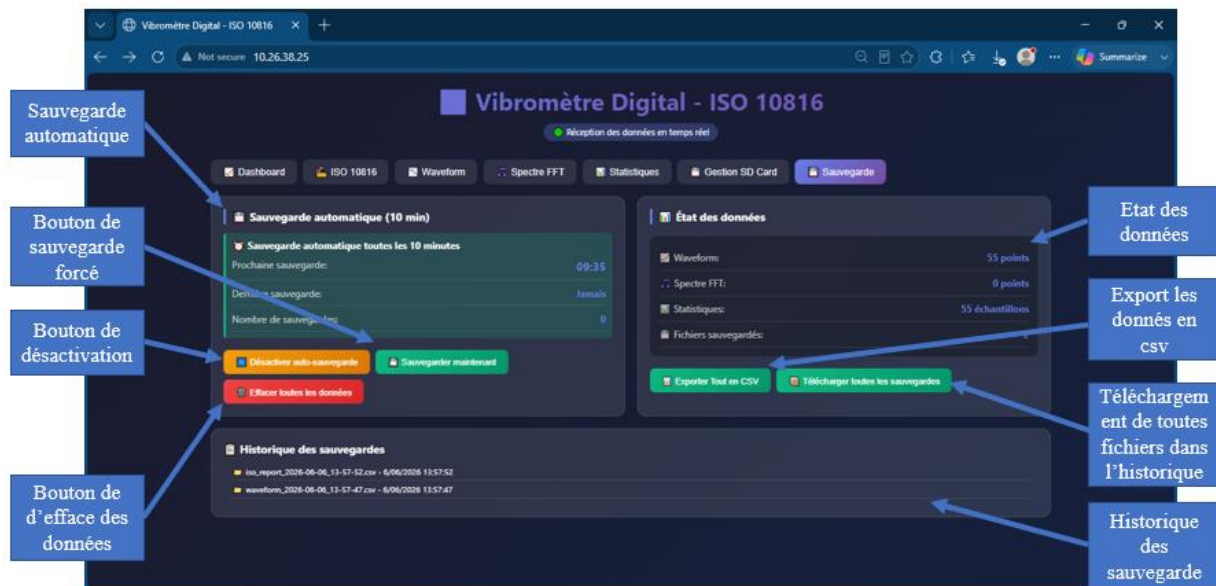


Figure 59: Sauvegarde automatique dans le web

Chapitre II: Conception et réalisation

3. Calibration de système

3.1. Le calibrateur

Le calibrage de système été fait par un calibrateur de vibration portable modèle 9110D (fabriqué par The Modal Shop et distribué par le groupe PCB Piezotronics / IMI Sensors).

C'est un calibrateur industriel pour la vérification, l'étalonnage sur site et la traçabilité des capteurs de vibration.

Caractéristiques techniques principales :

- Plage de fréquence élargie : Réglable de 5 Hz à 10 kHz (ou 300 à 600 000 cycles par minute CPM).
- Amplitude maximale : Jusqu'à 20 g pk (196 m/s²), 20 ips (500 mm/s) ou 150 miles (3,8 mm crête à crête) à vide.
- Charge maximale acceptée : Capable de supporter des capteurs lourds pesant jusqu'à 800 grammes.
- Précision de lecture : Généralement de $\pm 3\%$ sur l'accélération (10 Hz à 10 kHz) et la vitesse (10 Hz à 1 000 Hz).
- Autonomie de la batterie : Jusqu'à 18 heures en fonctionnement standard, idéal pour de longues journées d'intervention sur site. [19]



Figure 60: Calibrateur de vibrations portable (modèle 9110D)

3.2. Algorithme de calibrage

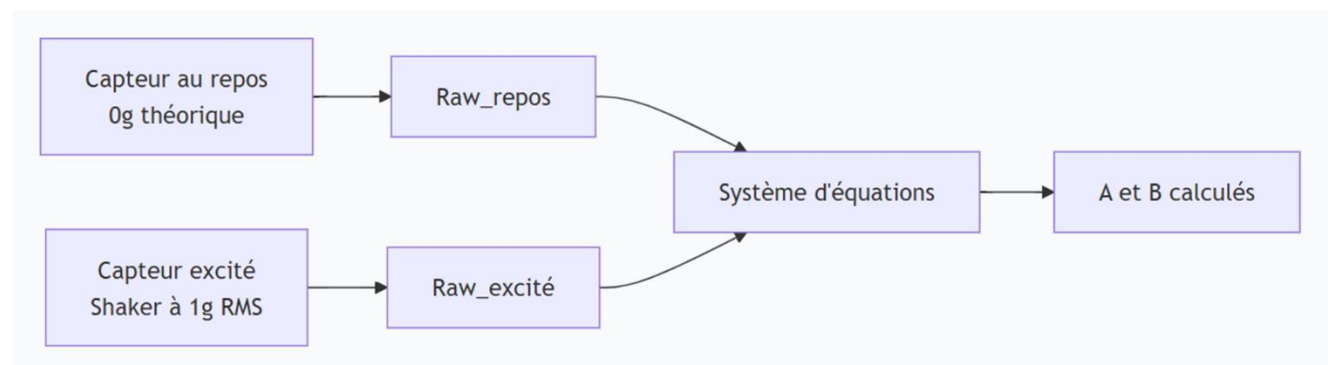


Figure 61: Algorithme de calibrage de système

Où :

- A (Gain) : Sensibilité du capteur (g/LSB) ;
- B (Offset) : Décalage à 0 (g).

Chapitre II: Conception et réalisation

3.3. Mode opératoire :

Après la préparation de calibrateur et l'espace de travail, on commence le calibrage suivant chacun des axes du capteur :

1. Positionner le capteur avec une façon ou l'axe Z perpendiculaire avec le calibrateur (Figure 63).
2. On passe à la page des paramètres dans l'afficheur de système (Figure 57) et on active le bouton « UNLOCK » pour autoriser la sauvegarde des nouveaux facteurs de calibration (A et B)
3. On passe à la page de calibration (Figure 46), on choisit la référence de calibrage (le système intègre 4 valeur de référence : 0.5 g RMS, 1 g RMS, 2 g RMS, 5 g RMS) utilisant le bouton « ref ».
4. Choisir l'axe Z par le bouton « Z » (bouton « X » pour l'axe X et bouton « Y » pour l'axe Y)
5. Après la vérification de statue de système (doit être affiche « Ready »), on prend la mesure au point de repos.
6. Une fois cette étape est terminée, on passe à notre calibreur et on augmente l'amplitude jusqu'à atteindre la référence prise dans la troisième étape, et on fixe la fréquence à 159.15 Hz (Le choix de la fréquence de 159,15 Hz en étalonnage de vibrations s'explique par une simplification mathématique cruciale qui lie l'accélération, la vitesse et le déplacement).
7. Maintenant on peut prendre une mesure par rapport à la référence.
8. La dernière étape est de calculer et sauvegarder les facteurs A et B.



Figure 62: Essai de calibration du capteur ADXL345

Chapitre II: Conception et réalisation



Figure 63: positionnement de capteur de calibré l'axe Z

On répète les mêmes étapes pour les axes X et Y.

3.4. Test de système :

A la fin d'opération de calibrage, on passe au test de mesure. On garde le montage et on varie les amplitudes dans le calibrateur et comparé avec le graphe dans le web (test sur l'axe Z (Figure 63)).

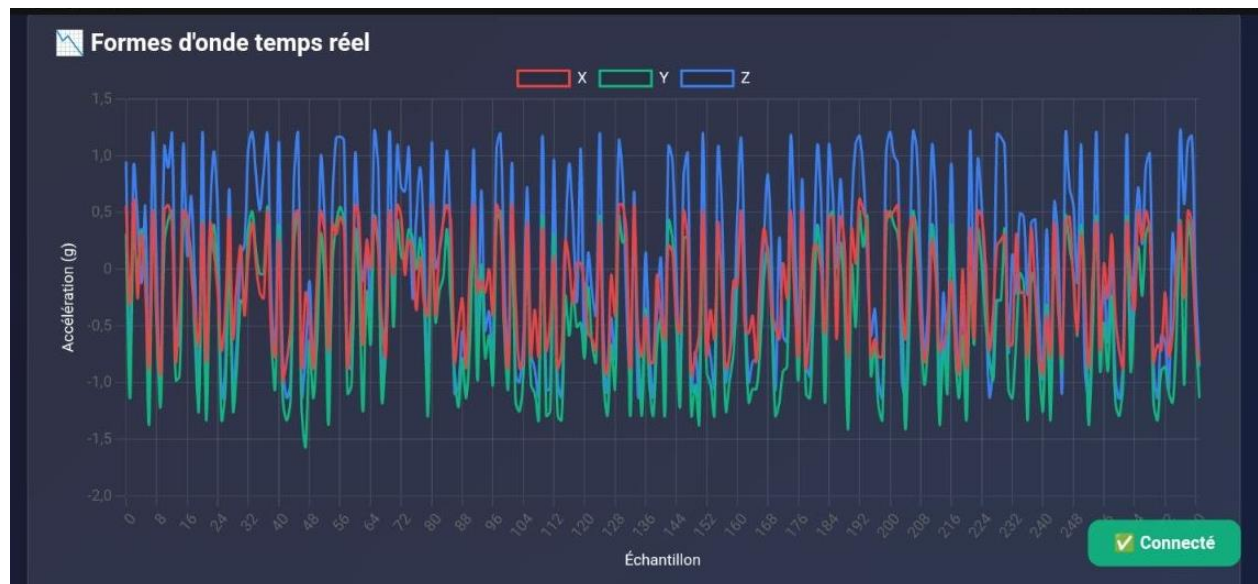


Figure 64: Test de mesure sur l'axe Z avec la réf 1g RMS (1.41 g Pic)

Chapitre II: Conception et réalisation

On observe dans que la vibration sur l'axe Z (en bleu) varie entre -1.2 et 1.2 (pas de précession).

Pour calculer l'erreur exacte on récupère le fichier csv enregistré dans la carte SD et on calcule la moyenne des mesures pris dans une période de temps.

La moyenne calculée donne 0.844923 g Pic (quand la référence est 1 g Pic).

Une erreur de 0.155077 g Pic est détecté (16 %).

3.5. Essais de correction de l'erreur

- Range :

Vue que l'erreur est très élevée on suppose que le problème été avec le choix de range, donc on répète le calibrage avec le range ± 2 g, ± 4 g, ± 8 g et ± 16 g.

Le résultat : l'erreur reste 16 % dans toutes les range.

A cet effet, le bon fonctionnement du capteur a été remis en cause, nous avons ainsi procédé au calibrage d'un autre capteur du même type et les mêmes références et refait les mêmes essais de calibrage. Le même résultat d'erreur 16 % a été relevé.

3.6. Erreur du capteur fournie par le fabricant

- Tolérance d'usine sur la sensibilité (Gain) :

La valeur nominale théorique fournie est : 3,9 mg/LSB (soit une sensibilité de 256 LSB/g).

Plage constructeur minimale / maximale : La datasheet indique que la sensibilité d'usine réelle peut varier de 3,5 mg/LSB à 4,3 mg/LSB (soit de 230 à 282 LSB/g).

Le calcul de l'erreur maximale donne :

$$\frac{4.3 - 3.9}{3.9} \approx 10.3\%$$

Le constructeur admet donc lui-même une variation d'usine pouvant aller jusqu'à 10 % d'erreur de gain brute.

- Tolérance d'usine sur le décalage (0-g Offset) :

La datasheet du capteur spécifie que le décalage initial par rapport à l'idéal peut aller de -250 mg à +250 mg (± 0.25 g d'erreur).

Chapitre II: Conception et réalisation

4. Tests et essais

4.1. Pompe à eau

Afin de valider les performances du système développé, des essais expérimentaux ont été réalisés sur une pompe à eau en fonctionnement.

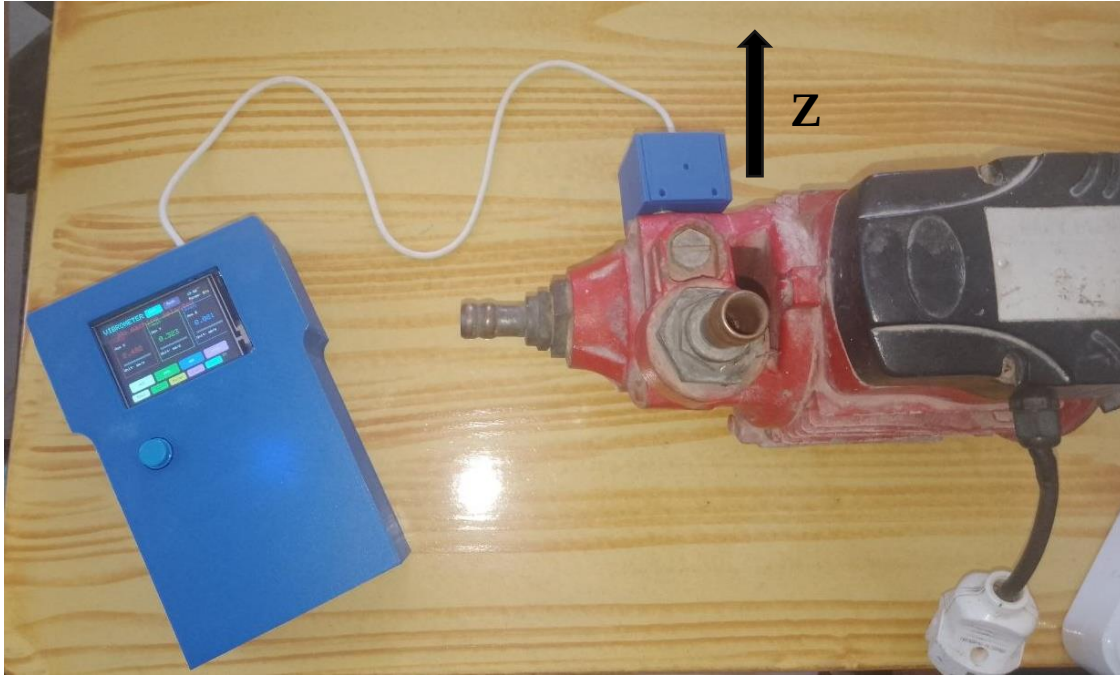


Figure 65 : Essai sur une pompe à eau

La pompe utilisée lors des essais est une pompe centrifuge de surface destinée au transfert et à l'alimentation en eau. Ce type de pompe transforme l'énergie mécanique fournie par le moteur électrique en énergie hydraulique afin d'assurer le déplacement du fluide. Le principe de fonctionnement repose sur la rotation d'une roue (turbine) qui communique une vitesse au liquide, générant ainsi une augmentation de pression et un écoulement continu de l'eau.

La pompe utilisée pour les essais expérimentaux est une pompe centrifuge de surface d'une puissance nominale de 370 W. Conformément à la norme ISO 10816, cette machine est assimilée à une machine de Classe I, correspondant aux petites machines électriques de puissance inférieure à 15 kW.

Le graphe ci-dessous représente les amplitudes d'accélération par rapport au temps (*Figure 66*).

L'essai ayant été réalisé principalement sur l'axe Z (bleu), on observe que le signal reste relativement stable autour de la valeur moyenne avec une amplitude faible, généralement comprise entre -0,3 g et +0,5 g.

Le fichier CSV récupéré depuis la carte SD montre une moyenne de Z_{RMS} environ **0.2 g**, qui montre que cette pompe fonctionne bien comme il faut, selon la norme ISO 10816



Figure 66 : Amplitudes des accélérations par apport au temps

Chapitre II: Conception et réalisation

5. Discussion des résultats

Les résultats obtenus lors de l'étalonnage de l'ADXL345 à l'aide du calibreur montrent une erreur maximale d'environ 16 %, ce qui indique une précision modérée du capteur dans les conditions de mesure utilisées. Cette valeur reste cohérente avec les caractéristiques des accéléromètres MEMS de type grand public, qui ne sont pas initialement conçus pour des applications de métrologie de haute précision.

Cette erreur peut s'expliquer par plusieurs facteurs. D'une part, l'offset et la dérive thermique du capteur peuvent influencer les mesures, surtout si une calibration préalable (zéro-g) n'a pas été parfaitement réalisée. D'autre part, les vibrations parasites du montage mécanique, le mauvais alignement entre le capteur et l'axe du calibreur, ainsi que le bruit électronique de l'acquisition peuvent également contribuer à l'écart observé. Il faut aussi noter que l'ADXL345 présente une sensibilité nominale avec une tolérance de fabrication qui peut atteindre plusieurs pourcents, ce qui s'ajoute à l'erreur globale.

Une erreur de 16 % peut être acceptable pour une application de surveillance ou de détection de tendance vibratoire, mais elle reste insuffisante pour des mesures de précision métrologique. Cela justifie l'intérêt d'un étalonnage plus rigoureux, voire l'utilisation de filtres numériques (filtre passe-bas, moyenne glissante) et d'une calibration multi-points pour réduire l'erreur systématique.

Enfin, ces résultats confirment que l'ADXL345 est adapté pour un prototype de vibromètre à faible coût, mais qu'il est nécessaire d'optimiser la chaîne de mesure (montage mécanique, acquisition et traitement des données) afin d'améliorer la fiabilité globale du système.

Chapitre II: Conception et réalisation

Partie 3 : Réalisation du système mesure vibratoire basé sur un capteur industriel

1. Matériel utilisé

1.1. Microcontrôleur ESP32 (page 28)

1.2. Capteur de vibration

Le capteur d'accélération Brüel & Kjær Vibro AS-062 est un accéléromètre industriel piézoélectrique haute performance. Il convertit les vibrations mécaniques des machines tournantes en un signal électrique pour surveiller leur état de santé. (VIBRO)

Application : Surveillance continue des turbines, pompes, compresseurs et générateurs.

Sensibilité : Sortie standard de 100 mV/g.

Plage de fréquence : De 1,5 Hz à 13 kHz (± 3 dB).

Température : Fonctionne de -50 °C à +125 °C.



Figure 67 : AS - 062

1.3. Acquisition des données

L'acquisition des données se fait à distance via le Wi-Fi. L'interface web permet la visualisation des mesures en g RMS, g Peak et l'accélération instantanée.

Il visualise aussi un signal vibratoire en temps réel. Il donne aussi l'accès au téléchargement des mesures pris en format csv.



Figure 68 : Interface web d'acquisition des données mesurées pour le capteur AS - 062

Chapitre II: Conception et réalisation

1.4. Convertisseur Analogique / Numérique

Le ADS1220 est un convertisseur analogique-numérique (CAN/ADC) de précision 24 bits à faible consommation conçu par Texas Instruments. Il intègre de nombreuses fonctionnalités permettant de mesurer avec une grande précision les signaux très faibles provenant de divers capteurs, tout en réduisant le nombre de composants externes nécessaires sur un circuit.

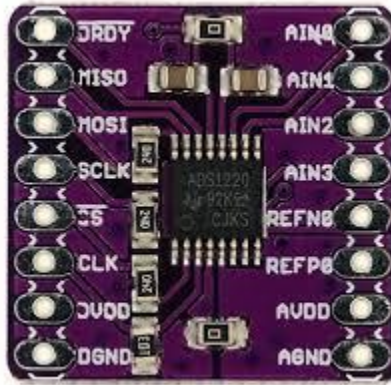


Figure 69 : Le convertisseur analogique-numérique (CAN/ADC) ADS1220

1.5. Circuit d'isolation

On a utilisé un circuit d'isolation amplifiant HCPL7840 (voir annexe 04).

2. Schéma de montage

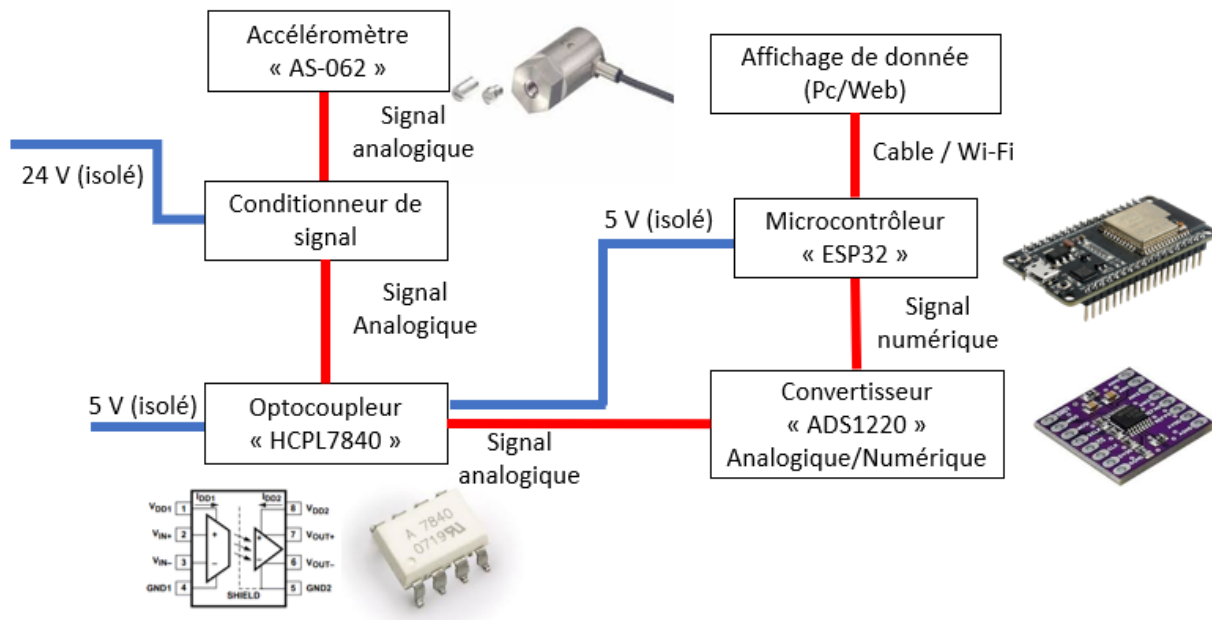


Figure 70 : Schéma de montage de capteur AS - 062 avec le ESP32

Chapitre II: Conception et réalisation

La sortie analogique de capteur AS-62 est d'abord traitée par un conditionneur de signal, qui délivre un signal analogique adapté. Ce signal est ensuite transmis à un optocoupleur « HCPL-7840 » assurant une isolation galvanique avec une alimentation isolée de 5 V. Après isolation, le signal analogique est converti en numérique par un convertisseur analogique-numérique « ADS1220 » (24 bits). Le signal numérique obtenu est alors exploité par un microcontrôleur « ESP32 », qui communique les données vers un système d'affichage (PC ou interface web).



Figure 71 : Montage du circuit avec le capteur AS - 062

3. Résultat

L'accélération instantanée : affichée autour de -0,258 g puis -0,212 g (états de repos).

Valeur RMS : environ 0,244 g et 0,242 g, reflétant l'énergie vibratoire efficace sur la période d'intégration.

Pic d'accélération maximale (P.C. MAX) : constant à 5,500 g, valeur remarquable (suite à un choc donné).

Le système, conforme au schéma de principe, a initialement fonctionné de manière nominale en affichant en temps réel les accélérations instantanées. Cependant, lors de l'application d'une vibration forcée, l'optocoupleur HCPL-7840 a été endommagé (brûlé). Ce dysfonctionnement suggère une sensibilité du composant aux contraintes mécaniques sévères, ou éventuellement une rupture d'isolation due à des transitoires électriques induits par les vibrations. Des investigations complémentaires sont nécessaires pour identifier la cause précise de cette défaillance.

Ces résultats démontrent le fonctionnement correct de la chaîne d'acquisition (capteur, conditionneur, isolation, CAN, microcontrôleur) pour des vibrations modérées. Cependant, la

Chapitre II: Conception et réalisation

valeur de tension brute nulle et le pic mémorisé élevé devraient être vérifiés pour s'assurer de l'absence de saturation ou de dérive du capteur.

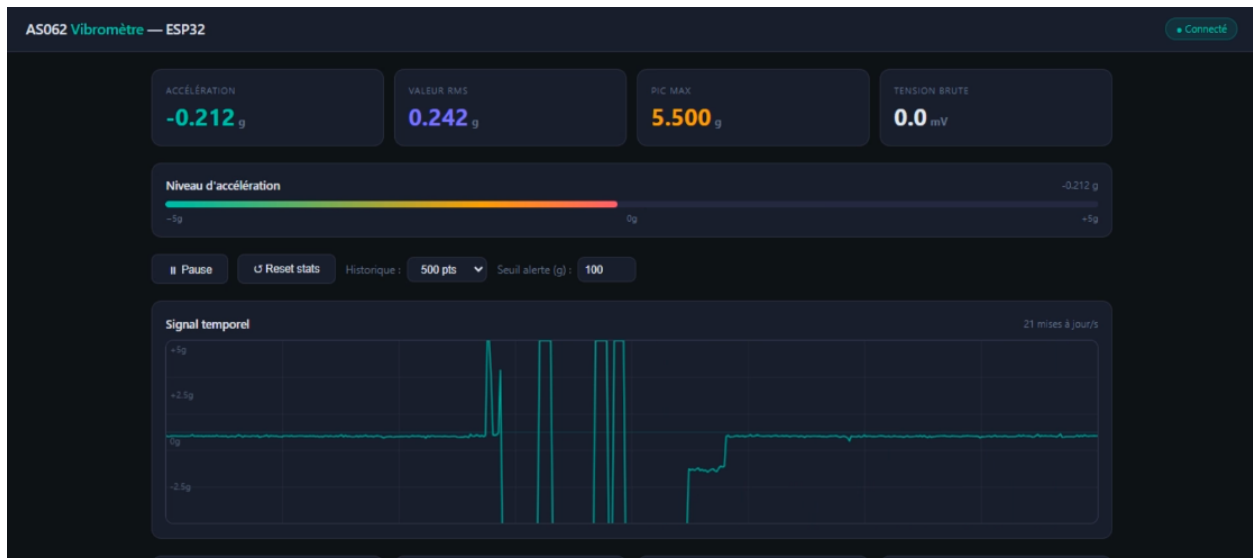
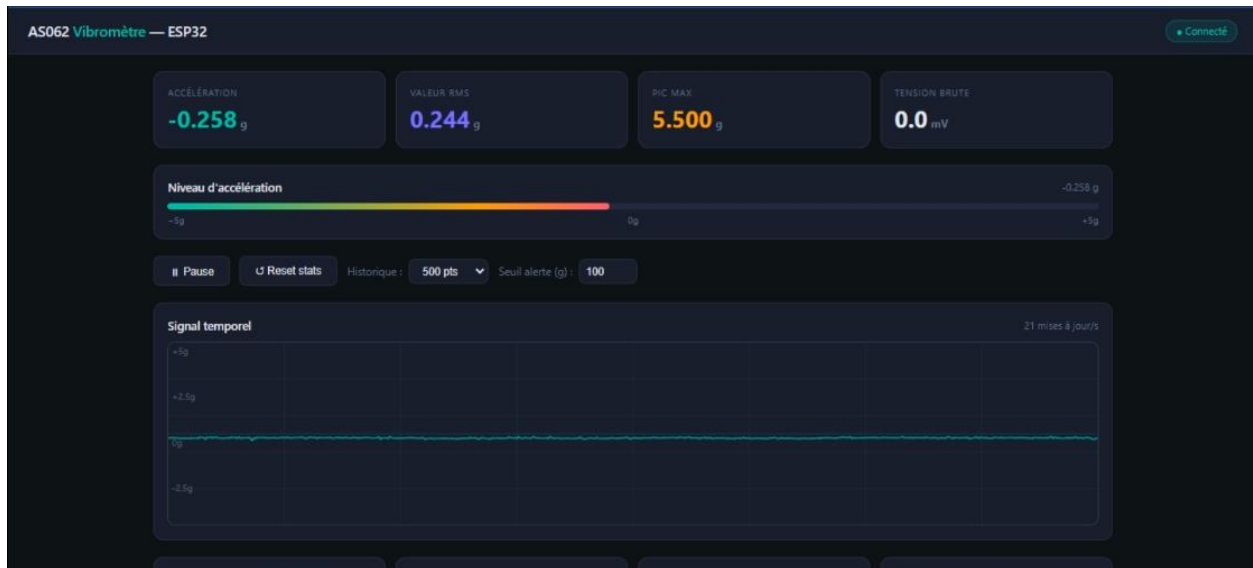


Figure 72 : Capture d'écran des mesures affichées sur la page web

Conclusion

Conclusion

Au terme de ce travail, deux systèmes de mesure et d'analyse vibratoire ont été conçus et réalisés afin de répondre aux besoins de surveillance de l'état des machines et de la maintenance conditionnelle. Ces deux approches, bien que différentes dans leur architecture, sont complémentaires et permettent d'explorer à la fois une solution embarquée à faible coût et intelligente, ainsi qu'une solution industrielle de mesure plus précise.

Le premier système est basé sur un capteur MEMS ADXL345 couplé à une plateforme ESP32. Il permet la mesure des vibrations sur trois axes et leur traitement en temps réel. Plusieurs fonctionnalités ont été intégrées, notamment le calcul de la valeur efficace (RMS), l'analyse fréquentielle par FFT, l'évaluation selon la norme ISO 10816, le stockage des données sur carte SD, l'affichage sur écran TFT et la supervision à distance via une interface web. Les résultats expérimentaux ont montré des performances satisfaisantes pour une solution portable et économique, malgré les limitations liées à la précision intrinsèque du capteur utilisé.

Le second système repose sur un accéléromètre industriel AS-062 intégré dans une chaîne complète d'acquisition comprenant un conditionneur de signal, un dispositif d'isolation galvanique, un convertisseur analogique-numérique ADS1220 et un microcontrôleur ESP32. Ce système a permis d'assurer une acquisition fiable des vibrations, en particulier pour les faibles amplitudes, avec une visualisation en temps réel des données (valeurs instantanées, RMS et pics) via une interface web. Toutefois, les essais ont mis en évidence certaines limites, notamment la fragilité de l'isolation galvanique sous fortes vibrations ainsi que la nécessité d'un étalonnage plus rigoureux pour garantir la cohérence des mesures.

Dans l'ensemble, ces deux dispositifs vibratoires réalisés ont démontré la faisabilité de systèmes de surveillance vibratoire basés sur des technologies embarquées, adaptés aussi bien aux applications éducatives qu'industrielles. Elles ont également mis en évidence l'importance de la qualité de la chaîne de mesure, de la robustesse matérielle et de la précision des capteurs dans la performance globale des systèmes.

En perspectives, l'amélioration de ces travaux pourrait passer par l'utilisation de capteurs industriels plus précis, le renforcement de la robustesse des circuits d'isolation, l'optimisation des algorithmes de traitement du signal, ainsi que l'intégration de techniques d'intelligence artificielle pour le diagnostic automatique des défauts. Le développement d'une plateforme cloud pour le stockage et l'analyse des données vibratoires constituerait également une évolution intéressante vers des systèmes de maintenance prédictive connectée.

Ainsi, ce travail a permis de développer des compétences solides en instrumentation, électronique embarquée, traitement du signal et conception de systèmes intelligents dédiés à la surveillance et à la maintenance des équipements industriels.

Perspectives

Perspectives

Afin d'améliorer les performances et les fonctionnalités du système développé, plusieurs perspectives peuvent être envisagées :

- Remplacer le capteur ADXL345 par un accéléromètre industriel de haute précision afin d'obtenir des mesures plus fiables et adaptées aux applications professionnelles.
- Augmenter la fréquence d'échantillonnage pour permettre l'analyse de vibrations de plus haute fréquence.
- Intégrer des algorithmes avancés de traitement du signal pour améliorer la détection et l'identification des défauts mécaniques.
- Développer une application mobile permettant la consultation des données en temps réel via smartphone.
- Mettre en place une plateforme Cloud pour le stockage, la sauvegarde et l'analyse à distance des données vibratoires.
- Ajouter un système d'alarme automatique en cas de dépassement des seuils admissibles de vibration.
- Intégrer des techniques d'intelligence artificielle et d'apprentissage automatique pour la détection automatique des défauts et la maintenance prédictive.
- Réaliser une alimentation optimisée afin d'augmenter davantage l'autonomie du système embarqué.
- Étendre le système à d'autres paramètres de surveillance tels que la température, l'humidité ou le bruit afin de disposer d'un outil complet de diagnostic des matériels roulants.
- Concevoir une version industrielle plus robuste capable de fonctionner dans des environnements sévères et soumis à de fortes contraintes mécaniques.

Chapitre 04

Etude technico-économique

Chapitre 04 Etude technico-économique

1. Premier axe : Présentation du projet

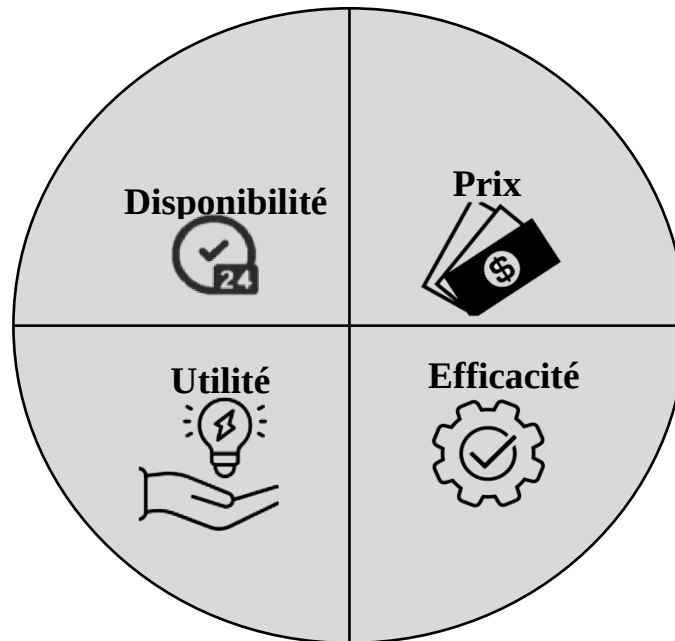
1.1. L'idée de projet

L'idée du projet consiste à concevoir et réaliser un système intelligent de surveillance des vibrations capable de mesurer, afficher, enregistrer et transmettre les données en temps réel. Ce système est basé sur un capteur ADXL345 associé à un microcontrôleur ESP32, permettant l'acquisition des vibrations sur trois axes et leur traitement.

Les données sont affichées localement sur un écran TFT, sauvegardées sur une carte SD avec horodatage, et consultables à distance via une interface web. L'objectif principal est de proposer une solution de maintenance prédictive simple, connectée et à faible coût, destinée aux machines industrielles.

Ce projet vise à répondre au besoin croissant de surveillance des équipements mécaniques dans les secteurs industriels et académiques, tout en offrant une alternative économique aux systèmes professionnels coûteux.

1.2. Les valeurs suggérées



- **Disponibilité** : assurée grâce à l'utilisation de composants facilement accessibles sur le marché, comme le capteur ADXL345 et le microcontrôleur ESP32, ce qui facilite la reproduction du système.

Chapitre 04 Etude technico-économique

- Prix : est proposé à un prix estimatif de 50000 DA (environ 200 €), soit un tarif hautement compétitif face aux produits étrangers dont les prix dépassent 1200 €. Il offre une technologie locale de bonne qualité à un coût accessible pour les entreprises algériennes.
- Utilité : réside dans sa capacité à surveiller les vibrations, prévenir les pannes et améliorer la maintenance des machines industrielles.
- Efficacité : assurée par la mesure en temps réel, l’affichage instantané et la possibilité de stockage et de consultation des données via une interface web.

1.3. L’équipe

- Les étudiantes

FERDI El abbes : étudiante en 2^{ème} Année Master Instrumentation et Métrologie.

- L’encadrant

P^r ILES Nadia

1.4. Les objectifs du projet

Développer un système intelligent de surveillance vibratoire capable de mesurer, afficher, enregistrer et transmettre les données en temps réel afin d’assurer la maintenance prédictive des équipements industriels.

1.5. Le planning de réalisation du projet

- Etude du projet (2 à 3 mois)

L’étude du projet concerne plusieurs parties primordiales dans nos décisions ; elle a concerné l’étude économique et l’étude scientifique :

- Effectuer des recherches scientifiques sur notre projet pour recueillir le maximum d’informations et commencer sur de bonnes bases.
- Quantifier la présence de concurrence sur le marché algérien et identifier leurs points clés.
- Chercher les meilleurs matériaux, et identifier des fournisseurs.
- Identifier nos clients cibles.
- Faire le tour d’un segment de clientèle pour un avis sur le projet.

- Lancement de l’activité (6 mois)

- Choix du local d’activité et équipements.
- Contact direct avec les fournisseurs et validations des matériaux et techniques de travaux.
- Installations des équipements.

Chapitre 04 Etude technico-économique

- Commencer le coté conception assistée par ordinateur du projet.
- Finalisation des produits (1 mois)
- Choix du design final.
- Choix de l'emballage.
- Facturation totale.
- Lancement des campagnes publicitaire et des stratégies marketing étudié précédemment.

2. Deuxième axe: Aspects innovants

2.1. La nature des innovations

- Notre projet présente deux dimensions innovantes majeures :

Innovation marchée : Le projet propose une solution innovante de surveillance vibratoire à faible coût, basée sur ADXL345 et ESP32. Il se distingue par l'intégration de l'IoT, permettant la mesure, l'affichage, le stockage et la consultation des données en temps réel via une interface web. Cette solution rend la maintenance prédictive plus accessible aux universités, PME et laboratoires, contrairement aux systèmes industriels classiques coûteux et complexes.

Innovation Scientifique : Le projet propose une innovation scientifique basée sur l'intégration d'un capteur ADXL345 et d'un microcontrôleur ESP32 pour la mesure et le traitement des vibrations en temps réel. Il combine l'instrumentation embarquée et l'IoT afin d'assurer la collecte, le stockage et la transmission des données via une interface web, avec une perspective d'évolution vers l'analyse avancée et la maintenance prédictive.

2.2. Les domaines d'innovation

Le projet s'inscrit dans plusieurs domaines d'innovation, notamment l'Internet des Objets (IoT) grâce à ESP32, l'instrumentation et la métrologie avec ADXL345, ainsi que la maintenance prédictive. Il combine également les systèmes embarqués et la digitalisation industrielle pour offrir une solution de surveillance vibratoire connectée, simple et intelligente.

3. Troisième axe : Analyse stratégique du marché

3.1. Le segment du marché

- Clients cibles

Les clients ciblés sont les universités et écoles d'ingénieurs, les laboratoires de recherche en instrumentation et métrologie, ainsi que les petites et moyennes industries utilisant des machines tournantes comme les moteurs, pompes et compresseurs. Les sociétés de maintenance

Chapitre 04 Etude technico-économique

industrielle constituent également un client important, car elles interviennent directement sur les équipements nécessitant un diagnostic vibratoire.

- **Marché cibles**

Le marché cible est celui des solutions de surveillance vibratoire à faible coût et connectées, destinées aux pays en développement comme l'Algérie, où les systèmes industriels professionnels restent coûteux. Ce marché inclut également les solutions éducatives et de prototypage en instrumentation, basées sur des systèmes embarqués comme ADXL345 et ESP32.

3.2. La mesure de l'intensité de la concurrence

La concurrence est forte au niveau international avec des entreprises comme SKF, Fluke et Brüel & Kjær, qui proposent des solutions très avancées mais coûteuses. En Algérie, la concurrence est plus faible car ces systèmes sont peu accessibles, ce qui crée une opportunité pour une solution locale à bas coût basée sur ADXL345 et ESP32.

Caractéristiques	Notre entreprise	Concurrent 1	Concurrent 2	Concurrent 3
Qualité du produit	Satisfaisant	Très haute qualité	haute qualité	haute qualité
Prix	Faible	Élevé à très élevé.	Élevé	Élevé
Temps de livraison	Rapide localement (composants disponibles en Algérie). Assemblage et déploiement rapides.	Long (importation, formalités, configuration), parfois plusieurs semaines.	Long (importation, formalités, configuration), parfois plusieurs semaines.	Long (importation, formalités, configuration), parfois plusieurs semaines.
Nom de la marque		Brüel & Kjær	SKF	Fluck
Besoin /Clients	Ciblé pour petites, moyennes, et	Machines industrielles	Machines industrielles	Machines industrielles

Chapitre 04 Etude technico-économique

	grandes machines (ISO10816)			
--	--------------------------------	--	--	--

3.3. La stratégies marketing

- Définir clairement notre public cible : Identifier les segments de marché les plus pertinents pour notre produit.
- Créer une présence en ligne forte : Développer un site web professionnel et bien référencé (SEO), présentant notre technologie, ses avantages, ses résultats, ainsi que des démonstrations vidéo. Créer des profils actifs sur les réseaux sociaux (Facebook, LinkedIn, YouTube, etc.).
- Offrir du contenu informatif : Partager régulièrement des contenus éducatifs et visuels (articles, vidéos, infographies) sur les vibrations et ses effets.
- Solliciter des avis et des témoignages : Encourager les premiers utilisateurs à partager leurs témoignages et expériences via nos plateformes digitales afin de renforcer notre crédibilité et la confiance du marché dans notre solution.
- Marketing d'influence : Identifier des experts et influenceurs dans le domaine (professeurs, expert, YouTubers spécialisés, etc.) et collaborer avec eux pour valoriser notre solution auprès de leur audience.

Mesures promotionnelles

1. Publicité : Le produit est promu via les réseaux sociaux et des vidéos de démonstration pour montrer son fonctionnement.
2. Démonstration : Des tests sur machines réelles permettent de prouver l'efficacité du système.
3. Marketing digital : Une interface web et des publications en ligne assurent la visibilité du projet.
4. Partenariats : Des collaborations avec les laboratoires et universités facilitent la validation et la diffusion du système.

Chapitre 04 Etude technico-économique

Stratégie Marketing

- **Définir clairement le public cible** : Identifier les segments les plus pertinents tels que les universités techniques, les laboratoires de recherche en instrumentation, les PME industrielles, les sociétés de maintenance et les industries utilisant des machines tournantes (moteurs, pompes, compresseurs).
- **Créer une présence en ligne forte** : Développer une plateforme web présentant le système de surveillance vibratoire, ses fonctionnalités (temps réel, stockage SD, interface web) et ses avantages. Créer également des pages sur les réseaux sociaux professionnels comme LinkedIn, YouTube et Facebook pour montrer les démonstrations du prototype.
- **Offrir du contenu informatif** : Publier des vidéos, articles et schémas expliquant la mesure vibratoire, la maintenance prédictive et l'utilisation du système basé sur ADXL345 et ESP32. Cela permet de positionner le projet comme une solution pédagogique et technique.
- **Solliciter des avis et des témoignages** : Tester le système sur des machines réelles dans des universités ou entreprises et recueillir les avis des utilisateurs. Les témoignages et retours d'expérience renforcent la crédibilité et la confiance dans le produit.

4. Quatrième axe : Plan de production et organisation

4.1. Processus de production

La production de notre prototype passe par des étapes cruciales :

- Conception du boîtier 3D.
- Réception et vérification des composants (esp32, adxl345, etc.).
- Impression 3D du boîtier étanche.
- Conception de PCB
- Assemblage et câblage des éléments électroniques.
- Tests fonctionnels en conditions simulées.
- Habillage final et vérification de l'étanchéité.
- Livraison du produit avec guide d'utilisation et assistance technique.

4.2. L'approvisionnement

L'approvisionnement se fait principalement auprès de fournisseurs locaux afin de garantir des délais rapides et de soutenir l'économie nationale. En cas d'indisponibilité de certains composants,

Chapitre 04 Etude technico-économique

nous nous tournons vers le marché international pour assurer la qualité et la continuité de la production.

4.3. La main d'œuvre

On est sur une production a bas échelle dans on essaye de minimiser le nombre d'employer au début, on aura donc besoin de :

- Un informaticien.
- Un instrumentiste.
- Un manager et responsable marketing.
- Un Administrateur.

4.4. Principaux partenaires :

Nos partenaires clés sont les fournisseurs de composants, les ingénieurs en conception et développement, ainsi que les distributeurs. Leur expertise et leur fiabilité constituent la base essentielle de notre chaîne de production et de la réussite de notre produit.

5. Cinquième axe : Plan financier

5.1. Les coûts et les charges :

Désignation		Valeur (DA)
Location 100 m ²		100000
Peinture		100000
Décoration		50000
Travaux divers		50000
Installations	Electricité	300000
	Eau	50000
	Internet	50000
	Autres	50000

Tableau 5 : Coûts du local et installation

Désignation	Valeur unitaire	Quantité	Valeur total DA
Bureau	20000	5	100000

Chapitre 04 Etude technico-économique

Chaise	4000	15	60000
Imprimante Multi Fonction	80000	2	160000
Imprimante 3D	200000	1	200000
Table pour assemblage	50000	2	100000
ordinateur (i7 Associée avec imprimante 3D)	200000	1	200000
Armoire de stockage	20000	2	40000
Ordinateur (i3)	30000	3	90000
Station de soudeur	40000	2	80000

Tableau 6 : Coûts d'équipements

Matières	Quantité	Prix DA\An
Filament impression 3D	100	4080000
Système électrique	150	540000
Encre imprimante	40	768000
Totale	390	5388000

Tableau 7 : Coûts de matériels

Frais & Services divers	Nombre	Montant Mensuel (DA/An)	Montant Annuel (DA/An)
Abonnement internet	1	5000	60000
Abonnement electricite	1	18000	216000
Nettoyage	1	10000	120000
Licence Logiciel Microsoft	5	1500	90000
Licence Logiciel Antivirus	5	1000	60000
Licence Logiciel Développement	1	1000	12000
Licence Logiciel Design	1	1000	12000
Maintenance	1	1500	18000
Total services	16	39000	588000

Tableau 8 : Coûts des frais et services divers

Chapitre 04 Etude technico-économique

Poste	Nombre	Salaire Mensuel (DA/An)	Salaire Brut (DA/An)
ingénieur en informatique	1	80000	960000
technicien en instrumentation	1	70000	840000
Responsable marketing	1	80000	960000
Administrateur	1	70000	840000
Total masse salariale	4	220000	2640000

Tableau 9 : Coûts des salaires

	Mois												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Budget mensuel (×1000 DA)	60	40	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	290

Tableau 10 : Budget de marketing

	Formule	Montant (DA)
A	Cout unitaire initial (DA)	12040.00
B	Charges fixes unitaire (DA)	22760.87
C	Dotation à l'amortissement unitaire (Sur 5 ans)	1119.57
D	Dotation aux investissements unitaire (Sur 10 ans)	407.61
E	Cout Unitaire final (DA)	A+B+C+D
F	Capacité de production (unités/an)	184

Chapitre 04 Etude technico-économique

G	Budget Marketing (DA/an)		290000.00
H	Cout du projet annuel (DA)	(E*F)+G	6974360.20
I	Chiffre d'affaires annuel (DA)		9040000.00
J	Bénéfice annuel (DA)	I-H	2065639.8
K	Marge bénéficiaire (%)	J*100/I	22.85 %

Tableau 11 : Bilan final

6. Sixième axe : Business model canvas

BUSINESS MODEL CANVAS		Conçu par : FERDI El abbes		Version : 01
Partenaires clés Universités et centres de recherche en instrumentation et métrologie Fournisseurs de composants électroniques (ESP32, capteurs, modules IoT) Entreprises de maintenance industrielle Intégrateurs en automatisation et systèmes embarqués Laboratoires de test et validation	Activités Clés Conception et développement du système de mesure vibratoire Programmation embarquée et développement IoT Intégration des modules (affichage, stockage, web) Tests et validation sur machines réelles Amélioration continue du prototype selon les retours utilisateurs	Propositions de valeur - Système low-cost et accessible - Solution connectée (IoT) avec interface web - Mesure et affichage des vibrations en temps réel - Alternative économique aux systèmes industriels coûteux - Solution	Relation Client - Support technique et assistance utilisateur - Formation à l'utilisation du système - Mise à jour logicielle et amélioration continue - Retour d'expérience des utilisateurs pour optimisation	Clients - Universités et écoles d'ingénieurs - Laboratoires de recherche en instrumentation - PME industrielles - Sociétés de maintenance industrielle - Industries utilisant des machines tournantes (pompes, moteurs, compresseurs)

Chapitre 04 Etude technico-économique

	Ressources clés - Capteur ADXL345 - Microcontrôleur ESP32 - Compétences en programmation embarquée et IoT - Connaissances en vibration et instrumentation - Interface web et système de stockage des données	adaptée aux universités, PME et laboratoires - Maintenance prédictive simplifiée	Canaux - Vente directe B2B - Présentations dans les universités et laboratoires - Réseaux sociaux (LinkedIn, YouTube, Facebook) - Démonstrations techniques sur site - Site web du projet et portfolio technique	
Couts - Recherche et développement - Matériels et matières premières - Marketing. - Charges du local et maintien de l'équipement. Cout du projet annuel : 9040000.00DA Charges Fixe : 3228000 DA Charges Variable : 125810 DA		Revenus - Vente - Maintenance		
Incubateur de Oran 1 Université – Ahmed Ben Bella				

Références

Références

- [1] F. L. Marc Thomas, Simulation des vibrations mécaniques par Matlab, Simulink et Ansys, P. d. l. d. Quebec, Éd., Canada, 2007.
- [2] S. Aoulmit, Chapitre 1: Concepts fondamentaux sur les vibrations, Mila: e-learning université Mila.
- [3] W. BENHASSINE, Les vibrations mécaniques - Polycopé, BATNA : UNIVERSITE MOSTEFA BENBOULAI BATNA 2 , 07/10/2017.
- [4] ISO-10816-1, 1995.
- [5] M. Thomas, Fiabilité, maintenance prédictive et vibration des machines, Québec: Presses de l'Université du Québec, 2012.
- [6] 01db, «Formation: Origine des vibrations des machines tournantes,» 08 Juin 2020. [En ligne]. Available: <https://fr.scribd.com/document/468436876/03-fr-Origin-Vibrations>.
- [7] istec, «Surveillance des vibrations accessible à toutes les machines et à tous les ingénieurs,» 26 01 2026. [En ligne]. Available: <https://www.istec.com/fr/surveillance-des-vibrations-accessible/>.
- [8] ifm, «Analyse vibratoire des machines tournantes : anticipez la casse et améliorez le process,» [En ligne]. Available: <https://www.ifm40.fr/analyse-vibratoire-machines-tournantes/#:~:text=La%20surveillance%20vibratoire%20consiste%20%C3%A0,%C3%A9lectrique%20qui%20peut%20%C3%AAtre%20exploit%C3%A9..>
- [9] idsinnomic, «Analyse de fréquence,» [En ligne]. Available: <https://www.innomic.com/en/knowledge/frequency-analysis/>.
- [10] bgghasscl699, «Chapitre II : Le capteur de vibration,» [En ligne]. Available: <http://www.mcours.net/cours/pdf/hascl4/bgghasscl699.pdf>.
- [11] Analog device - Data Sheet ADXL345, Analog device .
- [12] electronicwings, «ADXL345 Accelerometer Interfacing with ESP32,» 2024. [En ligne]. Available: <https://www.electronicwings.com/esp32/adxl345-accelerometer-interfacing-with-esp32>.
- [13] espressif, «ESP32-WROOM-32,» [En ligne]. Available: https://documentation.espressif.com/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf.

Références

- [14] moussasoft, «TFT écran lcd tactile couleur 2.4 inch,» [En ligne]. Available: <https://www.moussasoft.com/produit/tft-ecran-lcd-tactile-couleur-2-4-inch/>.
- [15] 2.4" TFT LCD ILI9341 TOUCH DISPLAY. [Film]. 2020.
- [16] Utiliser un ECRAN TFT LCD ILI9341 2.4" sur un ESP32 | #39. [Film]. 2025.
- [17] a2itronic, «DS3231 at24c32 IIC Horloge temps réel RTC,» [En ligne]. Available: <https://a2itronic.ma/product/ds3231-at24c32-iic-horloge-temps-reel-compatible-arduino-raspberry-2/>.
- [18] A. Device, DS3231 - Extremely Accurate I2C-Integrated (DATASHEET), Analog Device.
- [19] dollenmeier, «Calibrateur de vibrations portable (modèle 9110D),» [En ligne]. Available: <https://www.dollenmeier.ch/fr/marteaux-et-secoueurs-a-impulsion/1168-calibrateur-de-vibrations-portable-modele-9110d.html>.
- [20] D. Habood, «Conception de PCB : le guide ultime pour débiter,» 26 Janvier 2018. [En ligne]. Available: <https://resources.altium.com/fr/p/getting-started-pcb-design>.
- [21] «arduino-pc817-optocouler,» 2020. [En ligne]. Available: <https://github.com/makertut/arduino-pc817-optocouler/blame/main/README.md>.
- [22] AnalogDevice, Dual-Channel Digital Isolators - ADuM1200/ADuM1201 - DataSheet, AnalogDevice.
- [23] T. Instruments, Fully-Differential Isolation Amplifier for Energy Metering - AMC1100 - DataSheet, Texas Instruments.
- [24] H. PACKARD, Analog Isolation Amplifier - Technical Data, HEWLETT PACKARD.
- [25] Adafruit, «Adafruit Unified Sensor,» [En ligne]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_Sensor.
- [26] «Bearing Fault Detection Vibration Analysis,» [En ligne]. Available: https://ncd.io/blog/bearing-fault-detection-vibration-analysis/?utm_source=chatgpt.com.
- [27] «Analyse Vibratoire Balourd,» 16 Novembre 2023. [En ligne]. Available: <https://www.amplification-vibratoire.fr/analyse-vibratoire-balourd/>.
- [28] X. T. D. Z. F. G. a. A. B. Gaballa M Abdalla, MISALIGNMENT DIAGNOSIS OF A PLANETARY GEARBOX BASED ON VIBRATION ANALYSIS, Beijing/China: Researchgate, 2014.

Références

- [29] S. Hanly, «The Ultimate Guide to Vibration Analysis,» 12 November 2018. [En ligne]. Available: https://www.designworldonline.com/the-ultimate-guide-to-vibration-analysis/?utm_source=chatgpt.com.
- [30] H. Hadi, «Single Plane Unbalance pada Vibration Analysis,» [En ligne]. Available: https://extreme-maintenance.com/articles/show/single-plane-unbalance-pada-vibration-analysis?utm_source=chatgpt.com.
- [31] é. d. imv, «Chapitre4 - Technique du guide des vibrations,» [En ligne]. Available: <https://we-are-imv.com/fr/support/library/vibration-measuring/vibration-measuring-04/>.
- [32] «Machinery Vibration Analysis and Maintenance,» [En ligne]. Available: <https://fr.slideshare.net/slideshow/machinery-vibration-analysis-and-maintenance-35770202/35770202>.
- [33] «vibration-diagnostic-chart,» [En ligne]. Available: <https://fr.slideshare.net/slideshow/vibrationdiagnosticchartpdf/257424727>.
- [34] «Misalignment Vibration-Spectra,» [En ligne]. Available: <https://fr.slideshare.net/slideshow/misalignment-vibrationspectra/59212502>.
- [35] S. Choudhury, «Vibration analysis at thermal power plants,» [En ligne]. Available: <https://fr.slideshare.net/slideshow/vibration-analysis-at-thermal-power-plants/11099553>.
- [36] «Vibration analysis - commonly used terms and definitions,» 4 May 2021. [En ligne]. Available: <https://www.valmet.com/insights/articles/up-and-running/reliability/VibrationGlossary>.
- [37] YUMI-LAB, «How to Test the MPU-6050 and ADXL345 Sensors on Smart Pi One (Python and C),» [En ligne]. Available: https://wiki.yumi-lab.com/SmartPI/Sensors%26Modules/SmartPi_MPU-6050-ADXL345/?utm_source=chatgpt.com.
- [38] Datasheet - ADXL345, Analog Devices.
- [39] dimas, «Adafruit_ADXL345,» 14 11 2023. [En ligne]. Available: https://github.com/adafruit/Adafruit_ADXL345.
- [40] esp32io, «ESP32 - RTC,» [En ligne]. Available: <https://esp32io.com/tutorials/esp32-rtc>.
- [41] Wendy, «Comment créer des interfaces utilisateur exceptionnelles avec des écrans LCD TFT ESP32 ?,» 02 11 2024. [En ligne]. Available: <https://www.reshine-display.com/it/how-can-you-create-stunning-user-interfaces-with-esp32-tft-lcd-displays.html>.

Références

- [42] C. A. H. H. F. Widyaningrum Indrasari, «DEVELOPMENT OF RS-WZ3 SENSOR IN IOT BASED VIBRATION MONITORING SYSTEM,» *Jurnal Neutrino Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, October 2024.

Annexes

Annexe n° 01 Conception de la plaque PCB

Pour conception une carte PCB il faut d'abord passer par une série d'étapes permettant de transférer l'idée de circuit électronique à une réalisation physique.

La première étape consiste à analyser le besoin, elle concerne la définition de :

- Les fonctionnalités du système électronique : Acquisition Accéléromètre 3 axes, Calibration de système (2 points), Calcul RMS, FFT, Détection Fréquence Dominante, Conversion accélération a une vitesse, Évaluation ISO 10816, Sauvegarde sur SD Card, Interface Web HTML/JS, Base de Données Machines, Gestion Plages de Mesure, Interface Tactile Pages, Gestion Énergie / Deep Sleep, Rotation Automatique Fichiers, Affichage Graphique Temps Réel / FFT.
- Les composants nécessaires : capteur de vibration ADXL345, afficheur TFT 2.4 inch (qui intègre un module carte SD), horloge DS3231, carte SD, carte de développement esp32 wroom 38 pins, batteries, circuitede charge.
- Les contraintes d'alimentation : batterie de 4.2 volts 4000 mA.
- Les dimensions du circuit : 80 * 130 mm.

Après, une réalisation du schéma électronique doit être faite par l'ordinateur. Cette étape permet de représenter les composants électroniques et leurs connexions électriques ainsi que la vérification de fonctionnement théorique du circuit.

Chaque composant du schéma est associé à une empreinte physique correspondant à ses dimensions réelles et à son mode de montage sur la carte électronique.

L'emplacement des composants dans la carte dépend de plusieurs critères :

- Facilité de routage,
- Dissipation thermique
- Réduction des interférences électromagnétiques...

Le routage consiste à tracer les connexions électriques entre les composants. Les largeurs des pistes sont choisies selon le courant transporté et les contraintes de fabrication. [20]

Avant l'envoi de vos fichiers de conception, nous vous prions de vérifier attentivement les règles de conception (DRC – Design Rule Check) de votre circuit imprimé (PCB).

Cette vérification est indispensable afin d'éviter tout risque d'erreur, de non-conformité :

- Largeur minimale des pistes et espacement entre pistes > 0,3 mm.
- Dimensions et perçages des Vias et trous métallisés (PTH / NPTH). > 0,6 mm.
- Dimensions des pastilles (pads) et empreintes des composants > 1,3 mm.
- Espacement entre le plan de masse et pastille, vias, pistes...(Isolats) > 0,4 mm.
- Vérification des couches (cuivre, sérigraphie, masque de soudure, perçage).

Tout fichier ne respectant pas les règles DRC par défaut pourra entraîner :

- Un surcoût
- Nécessite des corrections avant validation

Figure 73: les contraintes de fabrication de almitech electronics engeneering

Annexes

Le logiciel EasyEDA (EasyEDA est un outil complet d'automatisation de conception électronique (EDA) gratuit et basé sur le cloud. Il permet aux ingénieurs, étudiants et 'makers' de concevoir, simuler et partager des circuits imprimés (PCB) directement depuis un navigateur web ou via une application dédiée) vérifie automatiquement le respect des règles de conception :

- Espacement minimum entre pistes ;
- Largeur minimale des pistes ;
- Absence de court-circuit ;
- Respect des contraintes du fabricant.

Afin de réaliser la conception du circuit électronique, on génère les fichiers de fabrication (fichier gerber et perçage pour les machines CNC, des fichiers PDF à imprimer pour la conception avec le chlorure de fer ...).



Figure 74: Logo EasyEDA

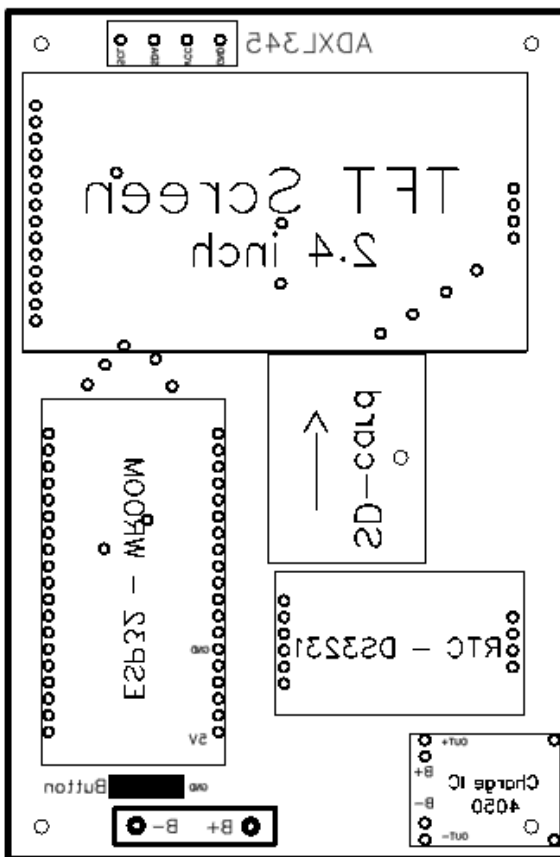


Figure 76: Top silk layer (miroir effet)

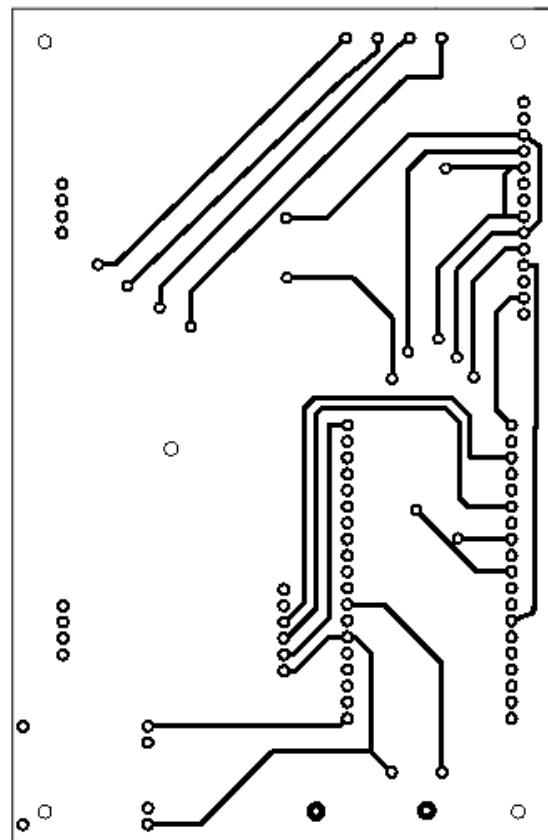


Figure 75: Top layer (miroir effet)

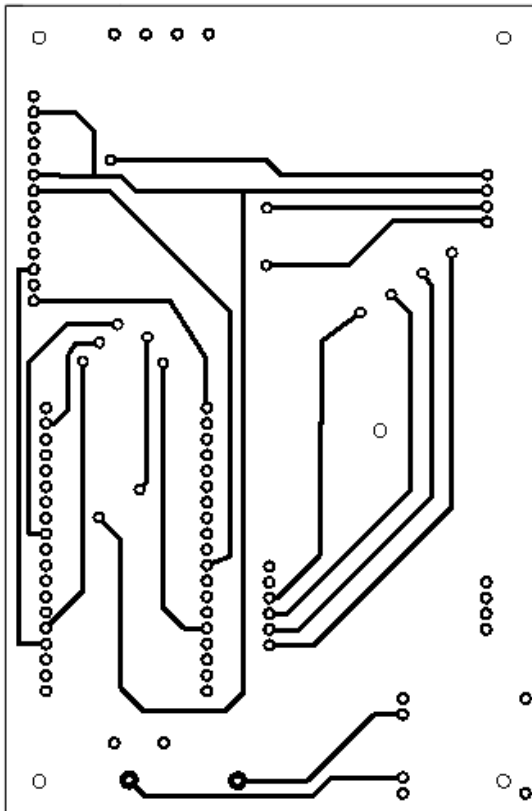


Figure 78: Bottom layer

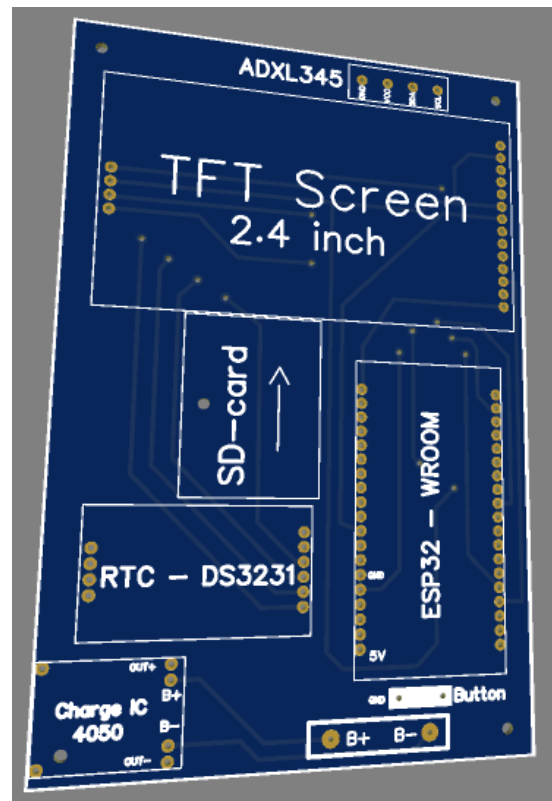


Figure 77: Plaque PCB en 3D
conceptionné par EasyEDA

Après l'impression des fichiers PDF avec une imprimant toner et du papier de transfert, on passe à la préparation de la plaque cuivrée :

- Découper la plaque cuivrée aux dimensions souhaitées.
- Nettoyer soigneusement la surface en cuivre avec du papier abrasif fin ou de la laine d'acier.
- Dégraisser avec de l'alcool ou de l'acétone.



Figure 80: Plaque PCB

Transfert thermique :

- Positionner le typon imprimé (côté toner contre le cuivre) sur la plaque.
- Chauffer à l'aide d'un fer à repasser ou d'une plastifieuse pendant plusieurs minutes.
- Le toner se transfère sur le cuivre et protège les futures pistes.



Figure 79: Typon transféré

Annexes

Gravure au chlorure de fer :

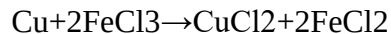
- Préparer une solution de chlorure de fer dans un récipient en plastique.
- Immerger la plaque dans la solution.
- Agiter doucement pour accélérer la réaction.
- Attendre jusqu'à ce que tout le cuivre non protégé soit dissous.



Figure 81: Immerger la plaque dans le chlorure de fer

Lors de la gravure d'un PCB avec du chlorure ferrique (FeCl_3), le cuivre non protégé de la plaque est dissous par une réaction d'oxydoréduction. Le chlorure ferrique agit comme un agent oxydant et attaque le cuivre métallique.

L'équation chimique simplifiée de la réaction est :



où :

- Cu : cuivre de la plaque PCB ;
- FeCl_3 : chlorure ferrique ;
- CuCl_2 : chlorure cuivreux (ou chlorure de cuivre II) formé en solution ;
- FeCl_2 : chlorure ferreux produit par la réduction du fer.

Le principe est que les zones protégées par le toner ou le vernis résistent à l'attaque chimique, tandis que le cuivre exposé réagit avec le chlorure ferrique et est progressivement dissous. À la fin de la gravure, seules les pistes protégées restent sur la plaque.

Annexes

Rinçage et nettoyage :

- Retirer la plaque de la solution.
- Rincer abondamment à l'eau.
- Enlever le toner avec de l'acétone afin de faire apparaître les pistes en cuivre.

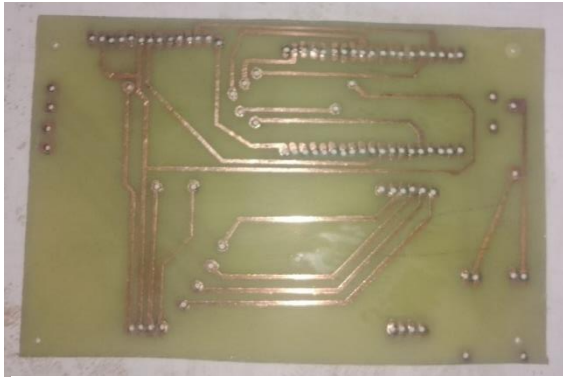


Figure 83: La PCB après le nettoyage

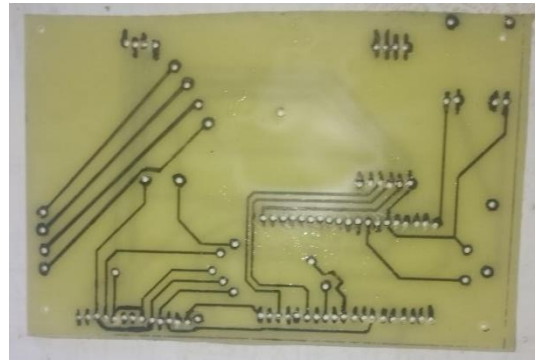


Figure 82: La PCB avant l'utilisation de l'acétone

Après on répète l'étape de transfert thermique pour identifier les noms des composants.

La dernière étape est de tester la continuité de la carte PCB et le soudage des composants dans la carte et le remplissage des 'Vias' par l'éthane.



Figure 84: Plaque PCB soudé et positionné dans le boîtier

Annexe n° 02

Conception de boîtier en 3D

La conception 3D d'un boîtier débute par l'analyse des besoins et la détermination des dimensions des composants à intégrer. Une modélisation est ensuite réalisée à l'aide d'un logiciel de CAO afin de créer la structure du boîtier et d'y ajouter les éléments fonctionnels tels que les supports de fixation, les ouvertures pour les connecteurs et les systèmes d'assemblage. Après la vérification des dimensions et l'optimisation du modèle pour garantir sa robustesse et son ergonomie, le fichier est exporté pour la fabrication d'un prototype, généralement par impression 3D. Enfin, des tests sont effectués afin de valider le design avant la réalisation de la version finale du boîtier.

La conception c'est fait par Blender : Blender est un logiciel libre de modélisation, d'animation par ordinateur et de rendu en 3D, créé en 1994. Il est actuellement développé par la Fondation Blender. Depuis 2019, le logiciel Blender est de plus en plus reconnu par les entreprises du secteur de l'animation 3D, comme Epic Games, Ubisoft et Nvidia.



Figure 85: Logo Blender

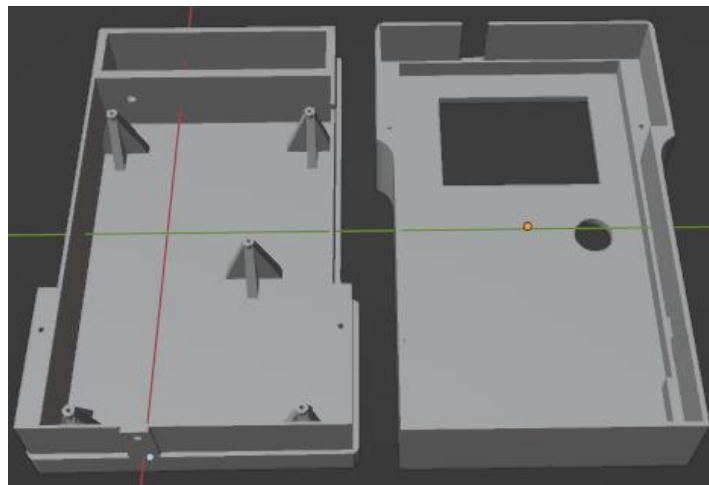


Figure 86: Boîtier principal

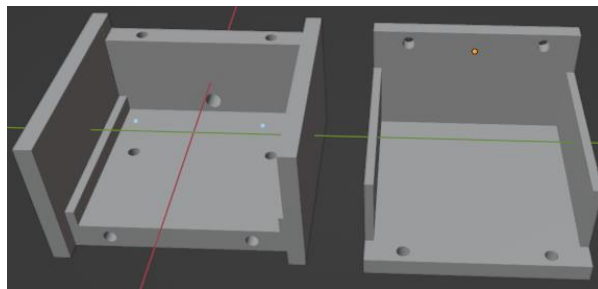


Figure 87: Boîtier de capteur

Annexe n° 03**Liste des Bibliothèque utilisé dans la programmation**

Bibliothèque	Définition
1. WiFi.h	Permet de connecter l'ESP32 à un réseau Wi-Fi en mode station ou point d'accès.
2. Wire.h	Gère la communication I2C (bus 2 fils) pour interfacier des capteurs et périphériques.
3. Adafruit_Sensor.h	Fournit une interface unifiée et des structures de données pour les capteurs compatibles Adafruit.
4. Adafruit_ADXL345_U.h	Pilote spécifique pour l'accéléromètre numérique ADXL345 via I2C/SPI.
5. WebSocketsServer.h	Implémente un serveur WebSocket pour une communication bidirectionnelle en temps réel avec un navigateur.
6. TFT_eSPI.h	Bibliothèque graphique optimisée pour écrans TFT, avec support Sprite et polices personnalisées.
7. SPI.h	Gère le bus SPI (Serial Peripheral Interface) pour les périphériques rapides.
8. EEPROM.h	Permet de lire/écrire des données persistantes dans la mémoire non volatile (EEPROM virtuelle).
9. math.h	Fournit des fonctions mathématiques standard (sin, cos, sqrt, atan2, etc.).
10. SD.h	Interface pour lire/écrire des fichiers sur une carte SD via SPI.
11. FS.h	Système de fichiers abstrait pour ESP32 (SPIFFS, LittleFS, etc.) gérant les dossiers et fichiers.
12. RTCLib.h	Pilote pour modules RTC (Real Time Clock) comme DS3231, DS1307 via I2C.
13. NTPClient.h	Récupère l'heure précise depuis des serveurs NTP (Network Time Protocol) via Wi-Fi.
14. WiFiUdp.h	Gère la communication UDP (User Datagram Protocol) sans connexion, utilisée pour NTP et DNS.

Annexe n° 04 L'isolation galvanique

Pour éviter les boucles de masse, les différences de potentiel et les effets de galvanisation/courants parasites entre la machine et l'ESP32, alors une isolation galvanique est effectivement recommandée.

4.1. Utilisation d'un optocoupleur

L'ESP32 et le capteur n'ont aucune connexion électrique directe.

Exemples d'optocoupleurs :

- PC817 : pour un signal TOR (0 V / 24 V) (mauvais choix car le signal de notre accéléromètre est un signal analogique), il est bon pour les simples opérations (présence de métal par exemple). [21]
- HCPL-7840 / HCNR200 / ISO124 / AMC1100 : Ces circuits transmettent la valeur analogique tout en gardant les masses séparées.

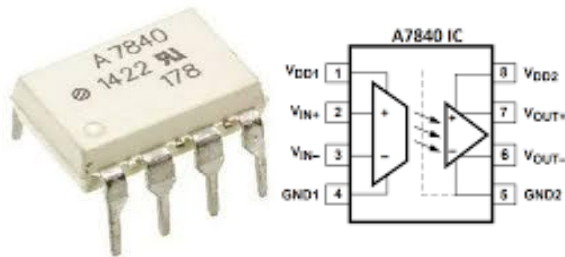


Figure 88: optocoupleur HCPL-7840 (A-7840)

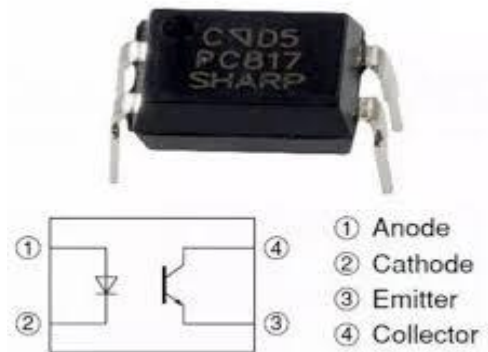


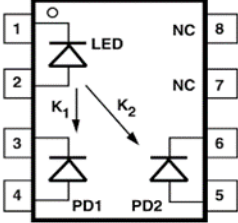
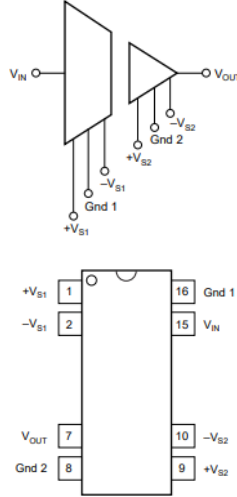
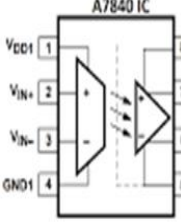
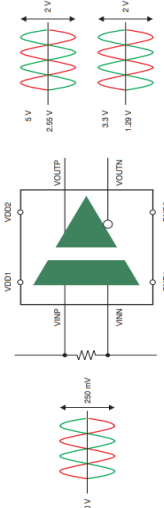
Figure 89: optocoupleur PC-817



Figure 90: optocoupleur ISO-124

Annexes

Tableau 5: Table comparatif entre les optocoupleurs à signal analogique [22] [23] [24]

Caractéristique	HCMR200	ISO124	HCPL7840	AMC1100
Technologie d'isolation	Optique (Double photodiode)	Capacitive (Modulation PWM)	Optique (Modulateur Sigma-Delta)	Capacitive (Modulateur Sigma-Delta)
Type d'Entrée	Courant (LED infrarouge)	Tension (Asymétrique ± 10 V)	Tension (Différentielle ± 200 mV)	Tension (Différentielle ± 250 mV)
Type de Sortie	Courant (Photodiode retour)	Tension (Asymétrique ± 10 V)	Tension (Différentielle)	Tension (Différentielle)
Tension d'isolation	5 V _{RMS}	2.4 V _{RMS}	3.75 V _{RMS}	4.25 V _{RMS}
Bande passante	~ 9 MHz (circuit dépendant)	50 kHz	100 kHz	100 kHz
Non-linéarité max	0.01 % (Excellente)	0.01 % (Excellente)	0.4 % (Moyenne)	0.075 % (Très bonne)
Alimentation requise	Aucune côté entrée (circuit passif)	Double ($\pm 4,5$ V à ± 18 V)	Simple 5 V des deux côtés	Simple 5 V des deux côtés
Schéma	 Pinout diagram of HCMR200: 1 (LED), 2 (LED), 3 (PD1), 4 (PD2), 5 (GND), 6 (GND), 7 (NC), 8 (NC).	 Pinout diagram of ISO124: 1 (V_{IN}), 2 (Gnd 1), 3 (+V_{S1}), 4 (-V_{S1}), 5 (Gnd 2), 6 (+V_{S2}), 7 (-V_{S2}), 8 (V_{OUT}).	 Pinout diagram of HCPL7840: 1 (V_{DD1}), 2 (V_{IN+}), 3 (V_{IN-}), 4 (GND1), 5 (GND2), 6 (V_{OUT-}), 7 (V_{OUT+}), 8 (V_{DD2}).	 Pinout diagram of AMC1100: 1 (V_{DD1}), 2 (V_{IN+}), 3 (V_{IN-}), 4 (GND1), 5 (GND2), 6 (V_{OUT-}), 7 (V_{OUT+}), 8 (V_{DD2}).

Annexes

4.2. Convertisseur DC-DC

Les convertisseur DC - DC aussi peuvent être une solution pour l'isolation comme le B0505S et le B1205S.



Figure 91: convertisseur DC - DC B1205S