

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE ET OPTIQUE

MEMOIRE

Présenté par :

MERZAK Mohamed EL Amine

Pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Instrumentation et métrologie

Application de l'arrêté ministériel n° 1275 du 27.09.2022 portant sur le mécanisme

« Un Diplôme Universitaire, Diplôme Entreprise Economique »

Thème

Étude, conception et réalisation d'une balance électronique à jauge de contrainte

Soutenu le 24 Juin devant la commission d'examen

Dr. BEKKAR Azzedine	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Président
Dr TAHRI Ghrissi	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Examineur
Dr. GOURBI Abdelkader	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Encadreur
Dr. CHAIB Mohammed	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Co-encadreur
Dr. SLIMANE Sid Ahmed	Centre de Développement des Satellites	Co-encadreur

Résumé

Dans les domaines de l'industrie, du commerce et de la recherche scientifique, la mesure précise de la masse ou de la force constitue une exigence essentielle.

En Algérie, l'absence d'une industrie nationale spécialisée dans la conception et la fabrication de balances électroniques, ainsi que la pénurie d'équipements didactiques et de systèmes de mesure adaptés, justifient le développement de solutions locales en instrumentation de mesure.

Ce mémoire a pour objectif de concevoir et de réaliser une balance électronique basée sur la technologie des jauges de contrainte, puis d'évaluer ses performances métrologiques à travers une procédure d'étalonnage réalisée dans FABLAB ISTA à l'aide de masses étalons de référence de la classe M.

Le système développé repose sur l'intégration d'un capteur de charge à jauges de contrainte montées en pont de Wheatstone, associé à un module de conditionnement et d'amplification HX711 piloté par un microcontrôleur ESP32.

Les données acquises sont traitées numériquement et affichées en temps réel sur un écran OLED.

La conception électronique du système a consisté à assembler et à interconnecter les différents composants, notamment la cellule de charge, le module HX711, l'ESP32 et l'écran OLED.

Une attention particulière a été portée à la qualité des connexions et à l'alimentation des différents modules afin d'assurer une mesure stable et un fonctionnement fiable de la balance électronique.

Les essais expérimentaux et les opérations d'étalonnage ont montré que la balance développée fournit des mesures fiables et stables pour les applications visées.

Ce travail démontre la faisabilité de la conception et de la réalisation locale d'un système de pesage électronique performant, à faible coût et à vocation pédagogique.

Il constitue une base intéressante pour le développement de solutions nationales en instrumentation de mesure et ouvre des perspectives d'amélioration et d'industrialisation.

DÉDICACES

MERZAK Mohamed El Amine

« Ce travail est dédié à toute ma famille à mes enseignants et toutes les personnes qui m'ont aidé, conseillé et accompagné durant mon parcours ».

Remerciement

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على أشرف المرسلين خاتم الأنبياء سيدنا وحبيبنا المصطفى صلى الله عليه وسلم، قبل كل شيء نشكر الله عز وجل على توفيقه و تمكينه لنا للإتمام هذا العمل، لولاه لما كان أي من هذا ممكناً.

Tout d’abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Messieurs GOURBI Abdelkader et CHAIB Mohammed**, pour avoir accepté d’encadrer ce travail.

Nous le remercions sincèrement pour sa disponibilité, sa supervision attentive, ainsi que pour ses précieux conseils et orientations qui ont largement contribué à la réalisation de ce projet, Son expérience et son accompagnement tout au long de ce travail nous ont permis d’avancer avec rigueur et confiance.

Nous adressons également nos sincères remerciements à **Monsieur SLIMANE Sid Ahmed** pour leur soutien scientifique et moral, ainsi que pour les conditions favorables qu’ils ont mises en place afin de nous permettre de mener ce travail dans les meilleures circonstances.

Nos remerciements s’adressent également à l’ensemble des **enseignants de l’Institut**, qui nous ont transmis leurs connaissances et leur savoir-faire tout au long de notre parcours universitaire.

Nous adressons également nos sincères remerciements à **Mes collègues FERDI El Abbes et MEHIDI Djamel** pour son assistance technique, à **Monsieur DJEBRA Hocine** pour les informations techniques qu’il nous a fournies concernant ce projet.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à **ma famille et à mes collègues**, pour leur soutien constant, leur patience et leurs encouragements tout au long de notre parcours universitaire.

Leur présence et leur confiance ont été une source de motivation essentielle pour mener à bien ce travail.

Nous espérons que ce travail, réalisé avec sérieux et sincérité, sera à la hauteur des attentes et contribuera modestement à l’enrichissement des connaissances dans ce domaine, avec l’aide de Dieu.

Liste des abréviations

ADC : Analog to Digital Converter
CAO : Conception Assistée par Ordinateur
DC : Direct Current (Courant Continu)
ESP32 : Espressif 32-bit Microcontroller
HX711 : Module convertisseur pour cellule de charge
IHM : Interface Homme-Machine
INA125 : Amplificateur d'instrumentation
IoT : Internet of Things
g : gramme
LCD : Liquid Crystal Display
Li-ion : Batterie Lithium-Ion
mA : Milliampère
PCB : Printed Circuit Board
PFE : Projet de Fin d'Études
USB : Universal Serial Bus
V : Volt
W : Watt

Table de matières

Résumé	2
DÉDICACES.....	3
Remerciement	4
Liste des abréviations	5
Liste des figures	9
Liste des tableaux.....	11
Introduction générale	12
Chapitre 1 : Etude théoriques et l'art de mesure.....	14
1.1 Introduction	14
1.2 Généralités sur les systèmes de pesage :	14
1.2.1 Notions de systèmes de pesage :	14
1.2.2 Capteur de charge (Load Cell) :	17
1.2.3 Pont de Wheatstone :	18
1.3 Conditionnement du signal :	20
1.3.1 Amplification :	21
1.3.1.1 L'amplificateur d'instrumentation : [16]	22
1.3.1.2 L'amplificateur différentiel :	23
1.3.1.3 Le décalage réglable (réglage du zéro) :	23
1.3.2 Filtrage : Élimine le bruit électrique et les perturbations	25
1.3.3 Conversion analogique-numérique (ADC) :	26
1.4 Métrologie (précision, répétabilité et linéarité) :	27
1.4.1 Définition de la Métrologie (Selon ISO) :	27
1.4.2 Historique :	27
1.4.3 Importance de la métrologie dans les systèmes de pesage :	28
1.4.4 Les différents domaines de la métrologie : [7][8]	28
1.4.5 Précision :	29
1.4.6 Répétabilité :	29
1.4.7 Linéarité :	30
1.4.8 Sensibilité :	30
1.5 Étalonnage (Calibration) :	31
1.6 Application industrielles :	33
1.7 Analyse des grandeurs d'influence :	34
1.9 Conclusion :	37
Chapitre 2 : Description des dispositifs de mesure	38

Tables de matières

2.1 Introduction :	38
2.2 Structure générale du système de mesure :	39
2.3 Description de matériel utilisé :	40
2.3.1 Jauge de contrainte (caractéristique technique) :	40
2.3.3 Module hx711 :	41
2.5.4 Capteur DS18B20 :	44
2.5.5 Carte ESP32 :	47
2.6 Afficheur bleu OLED 128 × 64 :	52
2.6.1 Description :	52
2.6.2 Caractéristiques de l’afficheur OLED :	52
2.6.3 Branchement de l’afficheur OLED :	53
2.7 Dimensionnement du système d’alimentation :	53
2.7.1 Estimation des besoins de l’utilisateur (bilan de puissance) :	53
2.7.2 Système d’alimentation de la balance :	54
2.8 Conclusion	58
	59
Chapitre 3 : Réalisation, conception et analyse des résultats	59
3.1 Introduction :	59
3.2 Conception et réalisation de la Balance :	60
3.2.1 Le retro ingénierie d’une balance :	61
3.2.2 Réalisation de la partie électronique :	62
3.2.3 Réalisation et de Conception de prototype :	66
3.3.1. Fonctionnement de la carte d’acquisition :	68
3.3.2 Essai et validation du capteur de température DS18B20 :	69
3.4 Collage et le soudage Jauges de contrainte :	70
3.4.1 Le matériel utilisé :	70
3.4.2 Soudage et fixation :	70
3.4.3 Opération de soudage des composants électroniques :	74
3.4.4 Tests et résultats prototype :	75
4.5 Influence de la température sur la dérive de mesure :	89
4.5.1 Calcul de la dérive thermique :	90
4.5.2 Tableau des erreurs de mesures :	91
4.5.3 Interprétation :	92
4.6 Conclusion :	94
Chapitre 4 : Étude Économique	95
4.1 Introduction :	95
4.2 Premier axe : Présentation du projet	95
4.2.1 L’idée de projet (la solution proposée) :	95

Tables de matières

4.2.2 Les valeurs suggérées :	96
4.2.3 L'équipe :	96
4.2.4 Les objectifs du projet :	96
4.2.5 Planning de réalisation du projet :	97
4.3 Deuxième axe : Aspects innovants	97
4.3.1. La nature des innovations :	97
4.3.2 Les domaines d'innovation :	98
4.4 Analyse stratégique du marché :	99
4.4.1 Le segment du marché :	99
4.4.2 La mesure de l'intensité de la concurrence :	100
4.4.3 La stratégie marketing :	101
4.5 Plan de production et organisation :	102
4.5.1. Le processus de production :	102
4.5.2 L'approvisionnement :	103
4.5.3 La main d'œuvre :	104
4.5.4 Les principaux partenaires :	104
4.6 Cinquième axe : Plan financier	106
4.6.1 Les charges Variables :	106
4.6.2 Les charges fixes :	107
4.6.3 Equipements et investissement :	108
4.6.4 Marketing :	108
4.6.5 Revenue	109
4.6.6 Bilan final :	109
4.6.7 Prototype Expérimental :	111
4.7 Conclusion :	113
Conclusion générale	114
Bibliographie	115
Annex	117

Liste des figures

Liste des figures

Figure 1: Jauges de contrainte [2].	16
Figure 2 : Structure d'une jauge de contrainte [5].	16
Figure 3 : Capteur de charge (Load Cell) [5].	17
Figure 4 : Fonctionnement de la jauge de contrainte en capteur pesage. [5]	18
Figure 5 : Montage pont de Wheatstone	19
Figure 6 : Différent montages possibles	20
Figure 7 : Montage amplification du signal[16].	21
Figure 8 : Montage de réglage de zéro. [4]	22
Figure 9 : L'amplificateur d'instrumentation.	22
Figure 10 : L'amplificateur différentiel.	23
Figure 11 : Le décalage réglable (Réglage du zéro).	23
Figure 12 : L'amplificateur à gain réglable.	24
Figure 13 : La détection de surcharge. [16]	24
Figure 14 : Montage filtrage du signal[16].	25
Figure 15 : Schéma Conversion analogique-numérique (ADC).	26
Figure 16 : Balance mécanique traditionnelle.	28
Figure 17 : Grandeurs et unités de mesure [8].	29
Figure 18 : Graphique explicatif de linéarité [8].	30
Figure 19 : Étalonnage.	31
Figure 20 : Relation entre force appliquée et signal du capteur [8].	32
Figure 21 : Schéma du Structure générale du système de mesure.	39
Figure 22 : Jauge de contrainte [28].	40
Figure 23 : Capteur de pesage [20].	40
Figure 24 : Module hx711.	41
Figure 25 : Câblage capteur poids avec hx711. [5] [17].	43
Figure 26 : Schéma fonctionnelle de hx711. [5].	43
Figure 27 : Le capteur DS18B20 [13].	45
Figure 28 : Schéma de principe [13].	45
Figure 29 : Branches ESP32. [23].	50
Figure 30 : L'organigramme de code.	51
Figure 31 : Afficheur OLED. [24]	52
Figure 32 : Raccorder un écran OLED à l'ESP32. [25]	53
Figure 33 : Module de charge TP4056. [26].	55
Figure 34 : Convertisseur boost MT3608. [27]	56
Figure 35 : Le retro ingénierie d'une balance.	61
Figure 36 : Testes et essais.	62
Figure 37 : Testes capteur de poids.	62
Figure 38 : Masses étalons Classe M.	63
Figure 39 : Essai à vide.	63
Figure 40 : Essais avec masse étalon 100 g.	64
Figure 41 : Essais avec masse étalon 500 g.	65
Figure 42 : Schéma de conditionnement et d'acquisition du signal de pesage.	65
Figure 43 : Plaque PCB.	65
Figure 44 : Schéma d'alimentation simulation.	66
Figure 45 : Logo logiciel Blinder. [32]	67
Figure 46 : Design 3D de la balance.	67
Figure 47 : Impression 3D.	67

Liste des figures

Figure 48 : La carte d'acquisition.	68
Figure 49 : Essai et validation du capteur de température DS18B20.	69
Figure 50 : Soudage Capteur DS18B20.	70
Figure 51 : Le matériel utilisé.	70
Figure 52 : Soudage et fixation.	71
Figure 53 : Testes et essais des jauges.	71
Figure 54 : Réalisation de pont de Wheatstone.	72
Figure 55 : Test de déformation des jauges de contrainte.	72
Figure 56 : Test de déformation des jauges de contrainte récupéré.	73
Figure 57 : Test d'intégration.	74
Figure 58 : Soudage.	75
Figure 59 : Essai à vide.	75
Figure 60 : Petite masses étalons.	76
Figure 61 : Essai avec masse étalon 50g.	77
Figure 62 : Essai avec masse étalon 100g.	78
Figure 63 : Essai avec masse étalon 200g.	79
Figure 64 : Essai avec masse étalon 300g.	80
Figure 65 : Essai avec masse étalon 500g.	81
Figure 66 : Essai avec masse étalon 800g.	82
Figure 67 : Option TARE.	84
Figure 68 : Teste de fidélité	86
Figure 69 : Brut d'étalonnage.	87
Figure 70 : Brut d'étalonnage fichier Excel.	88
Figure 71 : Résultat de mesures contrôle de justesse.	88
Figure 72 : Résultats de mesures contrôle de fidélité	89
Figure 73 : Δ Poids en fonction de T.	91
Figure 74 : graphique d'erreur relative (%) en fonction de la masse appliquée.	92
Figure 75 : 1ère opération de collage.	118
Figure 76 : 2ème opération de collage.	119
Figure 77 : 3ème opération de collage.	119
Figure 78 : 4ème opération de collage.	120
Figure 79 : 5ème opération de collage.	120
Figure 80 : 6ème opération de collage.	121
Figure 81 : 7ème opération de collage.	121
Figure 82 : 8ème opération de collage.	121
Figure 83 : 8ème opération de collage.	122
Figure 84 : 9ème opération de collage.	122
Figure 85 : 10ème opération de collage.	122
Figure 86 : 11ème opération de collage.	123

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de répétabilité pour une masse de 500 g [8]	29
Tableau 2: Exemple d'étalonnage [8].....	32
Tableau 3: Exemple de calibration [8]	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 4 : Branchement BS18B20 avec ESP32. [13]	46
Tableau 5 : Caractéristiques de l'ESP32. [18]	48
Tableau 6 : Connexions de l'ESP32. [23]	49
Tableau 7: Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique. [31].....	54
Tableau 8 : répétabilité essai à vide.....	76
Tableau 9: répétabilité essai avec étalon de 50 g	77
Tableau 10 : répétabilité essai avec étalon de 100 g	79
Tableau 11 : répétabilité essai avec étalon de 200 g	80
Tableau 12 : répétabilité essai avec étalon de 300 g	81
Tableau 13 : répétabilité essai avec étalon de 500 g	82
Tableau 14 : répétabilité essai avec étalon de 800 g	83
Tableau 15 : Control de justesse	83
Tableau 16 : Calcul de la dérive thermique	90
Tableau 17 : Essais de comparaison masse étalon 100g lorsque la température augmente ..	90
Tableau 18 : Les erreurs de mesures	91
Tableau 19 : Les valeurs suggérées	96
Tableau 20 : L'équipe	96
Tableau 21 : Planning de réalisation du projet	97
Tableau 22 : La solution proposée	100
Tableau 23 : Les principaux composants	103
Tableau 24 : La main d'œuvre	104

Introduction générale

Aborder les domaines de la métrologie industrielle et scientifique, la quantification précise des grandeurs physiques est le garant de l'intégrité, de la sécurité et de la performance des infrastructures industrielles.

La mesure de la masse et de la force, en particulier, revêt une importance capitale à travers une multitude de secteurs allant de l'agroalimentaire à la logistique, en passant par les laboratoires de recherche et les unités de production automatisées.

Qu'il s'agisse de contrôler les flux d'entrée et de sortie dans la gestion des stocks ou d'assurer la conformité rigoureuse des dosages en milieu pharmaceutique, la précision du pesage est indissociable de la maîtrise de la qualité et de l'optimisation des ressources.

Sous l'impulsion des innovations électroniques et numériques, les dispositifs de mesure ont connu une mutation profonde : les systèmes mécaniques conventionnels ont cédé la place à des balances électroniques performantes, caractérisées par une acquisition de données instantanée et une interopérabilité accrue avec les systèmes informatisés.

Au cœur de cette évolution, les capteurs à jauges de contrainte se sont imposés comme la technologie de référence, offrant une fiabilité et une précision optimales pour la quantification de la force et de la masse.

Les jauges de contrainte, ou jauges extenso métriques, reposent sur le principe de la variation géométrique de la résistance électrique : une sollicitation mécanique induit une déformation structurelle entraînant une variation proportionnelle de la résistance électrique du matériau.

Pour garantir une précision optimale et minimiser les dérives thermiques, ces jauges sont généralement intégrées au sein d'un pont de Wheatstone, une configuration de circuit permettant de détecter des variations de résistance extrêmement faibles.

Étant donné que les signaux générés sont de l'ordre du millivolt, l'implémentation de circuits de conditionnement de signal — comprenant l'amplification, le filtrage et la conversion analogique-numérique — est impérative pour transformer ces mesures brutes en données numériques exploitables par les systèmes de contrôle.

L'émergence de modules spécialisés, notamment les convertisseurs analogique-numérique à haute résolution, a radicalement simplifié l'intégration des capteurs de force dans les architectures électroniques contemporaines.

L'adoption de microcontrôleurs programmables, tels que la plateforme Arduino IDE, permet désormais de concevoir des systèmes de mesure capables d'assurer le traitement, l'affichage et l'archivage sécurisé des données avec une grande efficacité.

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un système de pesage électronique basé sur des jauges de contrainte.

Le dispositif développé associe un capteur de charge, le module HX711 pour l'amplification et la conversion analogique-numérique, ainsi qu'un microcontrôleur ESP32 pour le traitement des données.

Une attention particulière est accordée à la compensation des effets de la température grâce à l'intégration d'un capteur DS18B20 permettant de corriger la dérive thermique et d'améliorer la précision des mesures.

Ce projet met en œuvre des compétences en mécanique, électronique analogique et programmation embarquée, tout en démontrant la possibilité de concevoir localement un instrument de mesure fiable, précis et à faible coût.

Le présent travail est organisé en trois chapitres principaux :

Chapitre 1 : Étude théorique et l'art de mesure

Dans un premier temps, une étude des principes théoriques a été réalisée afin de comprendre le fonctionnement des balances électroniques utilisant des jauges de contrainte.

Chapitre 2 : Description des systèmes de mesure.

Description détaillée de l'architecture matérielle (capteur de charge, module HX711, ESP32) et de l'interface utilisateur.

Chapitre 3 : Réalisation et analyse de résultat.

Présentation des étapes d'assemblage, de la programmation logicielle, des procédures d'étalonnage et de l'analyse critique des performances métrologiques.

À travers ce travail, nous cherchons à montrer que l'intégration de capteurs à jauges de contrainte aux technologies électroniques modernes permet de concevoir des systèmes de pesage **précis, fiables et accessibles**.

Chapitre 1 : Etude théoriques et l'art de mesure

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les principes essentiels permettant de comprendre comment fonctionnent les balances électroniques à jauges de contrainte.

L'analyse s'attache en priorité à trois axes complémentaires : la mécanique des matériaux, le principe de fonctionnement des jauges de contrainte, ainsi que les méthodes de mesure et de traitement des signaux issus du capteur.

En outre, ce chapitre met en évidence les notions essentielles de métrologie appliquées au contexte des balances électroniques.

Il s'agit notamment de l'étalonnage, de la précision et de la fiabilité, qui conditionnent directement les performances globales du système de mesure et permettent d'assurer la qualité des résultats expérimentaux.

Ces éléments constituent le fondement théorique indispensable pour la conception et la réalisation pratique de la balance électronique développée dans ce projet.

1.2 Généralités sur les systèmes de pesage :

1.2.1 Notions de systèmes de pesage :

1.2.1.1. Définition d'une balance :

Une balance est un instrument de mesure conçu pour déterminer la masse d'un objet. Lorsqu'on charge le plateau, cette masse se traduit par une sollicitation mécanique : elle engendre une force transmise à un élément sensible, dont la réponse permet ensuite d'en déduire la valeur de la masse [1].

Sous l'effet de cette force, l'élément se déforme, ce qui modifie localement ses caractéristiques mécaniques.

Dans une balance électronique à jauges de contrainte, cette déformation est alors convertie en une variation de signal électrique au niveau du capteur.

Le traitement du signal permet enfin d'établir une lecture numérique de la masse, en s'appuyant sur des procédures d'étalonnage.

Ainsi, la précision de l'instrument repose directement sur la qualité de la conversion de la force mécanique en signal électrique, étape essentielle pour analyser la déformation des matériaux. [1]

1.2.1.2 Principe de la mesure de masse :

La masse m est liée à la force F par la relation fondamentale de la gravité :

$$F = m \cdot g \dots\dots\dots (01)$$

Où g est l'accélération due à la gravité ($\sim 9,81 \text{ m/s}^2$).

Dans une balance électronique, cette force appliquée sur le capteur de charge provoque une **déformation mécanique**, qui est ensuite convertie en un **signal électrique** par les jauges de contrainte.

1.2.1.3 Jauges de contrainte (Strain Gauges) :

Une jauge de contrainte est un capteur capable de mesurer la déformation d'un matériau lorsqu'il est soumis à un effort mécanique.

1.2.1.3.1 Principe de fonctionnement :

La résistance électrique du conducteur de la jauge varie proportionnellement à la déformation du matériau sur lequel elle est collée [1].

Facteur de jauge (GF) : C'est le coefficient qui relie la variation relative de la résistance ($\Delta R/R$) à la déformation (ϵ).

1.2.1.3.2 Types de jauges :

Les jauges de contrainte peuvent être classées en plusieurs types, notamment :

- Jauges à fil métallique
- Jauges à grille imprimée
- Jauges semi-conductrices

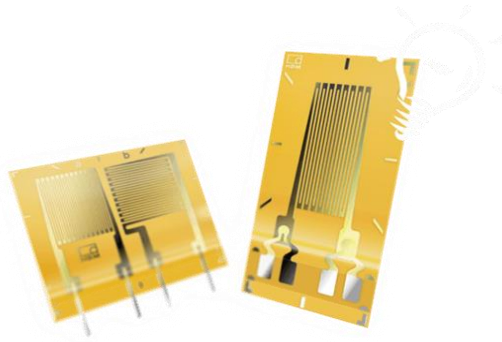


Figure 1: Jauges de contrainte [2].

1.2.1.4 Structure d'une jauge de contrainte :

Une jauge de contrainte est généralement composée des éléments suivants [2][3] :

1. Élément résistif (grille métallique) : partie sensible qui change de résistance lorsqu'elle est étirée ou comprimée.
2. Support isolant (substrat) : couche mince en matériau isolant qui supporte la grille métallique.
3. Fils de connexion : permettent de relier la jauge au circuit de mesure.
4. Couche de protection : protège la jauge contre l'humidité et les dommages mécaniques.

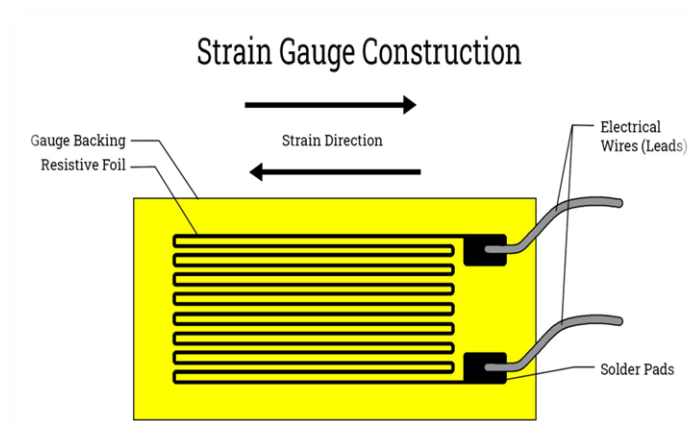


Figure 2 : Structure d'une jauge de contrainte [5].

1.2.2 Capteur de charge (Load Cell) :

Le capteur de pesage, également appelé cellule de charge, est un dispositif de mesure permettant de transformer une force mécanique ou une masse appliquée en un signal électrique mesurable [11] [15].

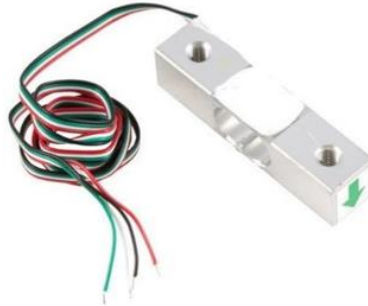


Figure 3 : Capteur de charge (Load Cell) [15]..

A) – principe de fonctionnement :

Dans le domaine de l'instrumentation, le principe Push-Pull (traction-compression) est utilisé dans les capteurs à jauges de contraintes, notamment les cellules de charge. Lorsqu'une force est appliquée sur la cellule, certaines jauges subissent une traction (Pull) tandis que d'autres subissent une compression (Push).

La déformation mécanique provoque une variation de la résistance électrique des jauges :

- **Traction (Pull) :** la jauge s'allonge, ce qui entraîne une augmentation de sa résistance.
- **Compression (Push) :** la jauge se raccourcit, ce qui provoque une diminution de sa résistance.

Les jauges sont généralement montées en pont de Wheatstone afin de convertir ces petites variations de résistance en un signal électrique mesurable.

Cette configuration permet d'augmenter la sensibilité du capteur, d'améliorer la précision de la mesure et de réduire l'influence des perturbations comme la température.

Le fonctionnement d'un capteur de pesage repose sur la déformation élastique d'un matériau sous l'effet d'une force. [16] [17]

Lorsqu'un objet est placé sur la balance :

1. La force appliquée provoque une légère déformation de la structure métallique de la cellule de charge.
2. Cette déformation modifie la résistance électrique des jauges de contrainte fixées sur la structure.

3. Les jauges sont disposées sous forme d'un pont de Wheatstone, ce qui permet de transformer cette variation de résistance en variation de tension.
4. La tension générée est proportionnelle à la force appliquée.
5. Ce signal est ensuite amplifié et converti pour être exploité par le système de mesure.

Ainsi, la cellule de charge assure la conversion d'une grandeur mécanique (force ou masse) en une grandeur électrique.

La force (pression, tension, compression, couple, poids, etc.) se transforme en une variation de résistance électrique, que l'on peut mesurer. [17]

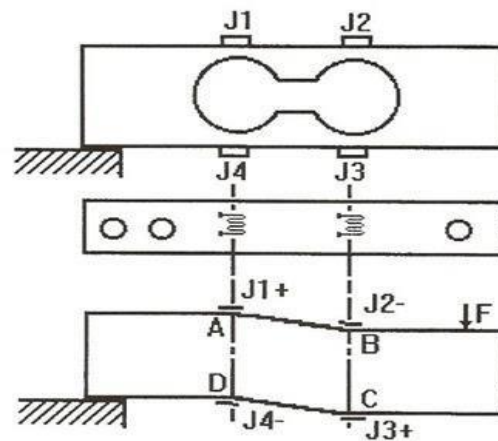


Figure 4 : Fonctionnement de la jauge de contrainte en capteur pesage [17].

Dans les balances électroniques modernes, la cellule de charge utilise généralement des jauges de contrainte collées sur un élément métallique déformable.

Lorsqu'une charge est appliquée, la déformation mécanique provoque une variation de la résistance des jauges de contrainte, ce qui génère une variation de tension dans le **pont de Wheatstone** [17].

1.2.3 Pont de Wheatstone :

Le pont de Wheatstone est un circuit électrique utilisé pour mesurer de faibles variations de résistance, il comporte 4 résistances disposées en pont, avec une tension d'alimentation, cette tension de sortie du pont varie proportionnellement à la variation de résistance d'une ou plusieurs jauges [5].

La tension de sortie V_s est ensuite amplifiée et traitée pour être exploitée par le système de mesure.

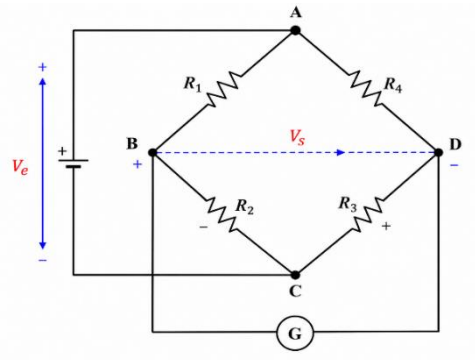


Figure 5 : Montage pont de Wheatstone [5].

Si seul $R_2=R$ est variable (une jauge) et les autres des résistance fixes. À partir de la linéarisation, il y a :

$$V_s = V_e \cdot \left(V_s(0) + \left(\frac{\partial V_s}{\partial R} \cdot \Delta R \right) \right) \dots\dots\dots (02)$$

V_s : tension de sortie du pont de Wheatstone (V).

V_e : tension d'alimentation (ou tension d'excitation) du pont (V).

$V_s(0)$: tension de sortie normalisée lorsque le pont est au repos

$\partial V_s / \partial R$: sensibilité du pont vis-à-vis d'une variation de résistance.

Elle indique de combien varie la tension de sortie lorsque la résistance varie de 1Ω .

ΔR : variation de la résistance de la jauge provoquée par la déformation.

$$\Rightarrow V_s = V_e \cdot \left(V_s(0) + \left(\frac{R_1}{(R_1+R)^2} \Delta R \right) \right) \dots\dots\dots (03)$$

Si les 4 résistances (4 jauges) varient, le terme de déformation devient :

$$V_s = V_e \left(V_s(0) + \left(\frac{\partial V_s}{\partial R_1} \cdot \Delta R_1 + \frac{\partial V_s}{\partial R_2} \cdot \Delta R_2 + \frac{\partial V_s}{\partial R_3} \cdot \Delta R_3 + \frac{\partial V_s}{\partial R_4} \cdot \Delta R_4 \right) \right) \dots\dots\dots (04)$$

$$V_s = V_e \cdot \left(-\frac{\Delta R_1}{4R_1} + \frac{\Delta R_2}{4R_2} + \frac{\Delta R_3}{4R_3} - \frac{\Delta R_4}{4R_4} \right) \dots\dots\dots (05)$$

1.3 Conditionnement du signal :

Pour obtenir une tension de sortie de 5 V pour une masse de 1 kg, il est nécessaire d'avoir une amplification globale du signal de sortie du pont.

La figure 4 est 5 présenté le schéma fonctionnel de montages possibles [16].

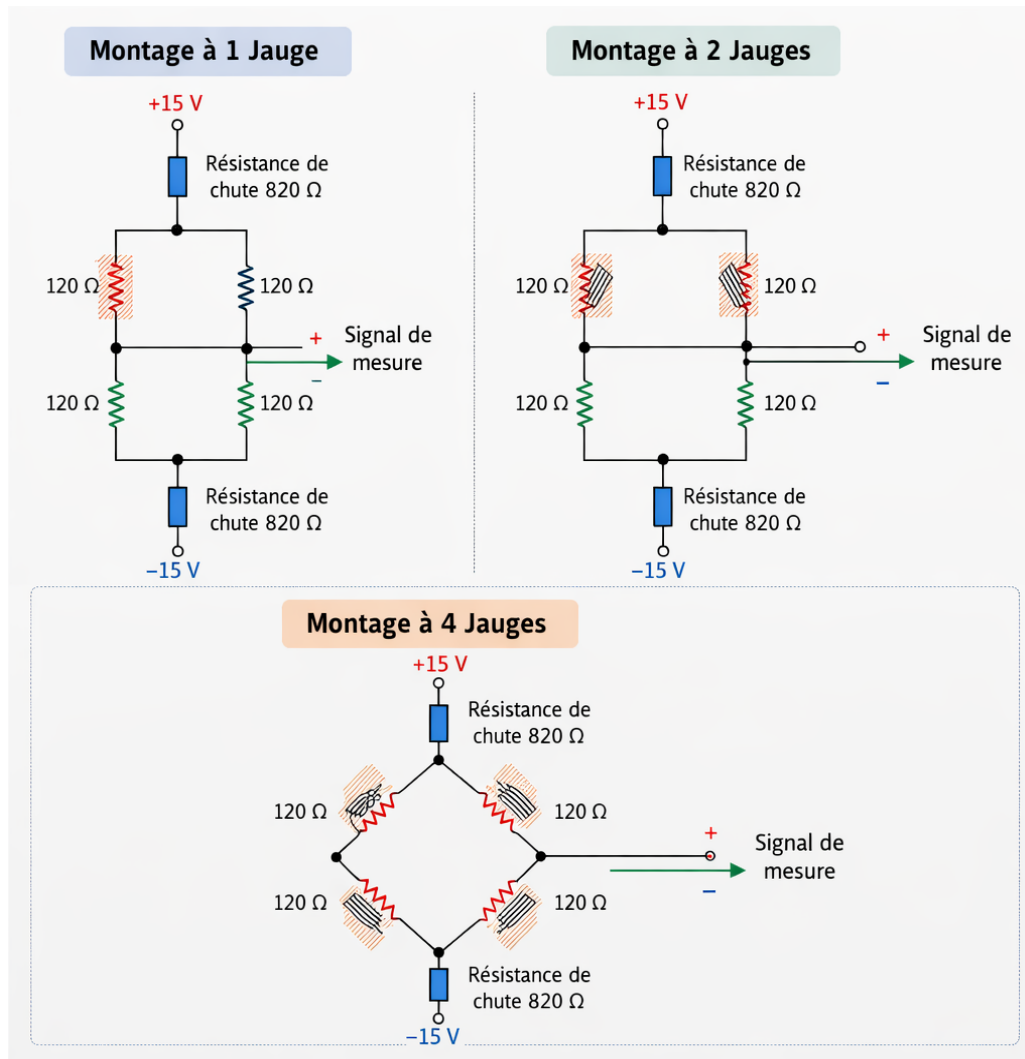


Figure 6 : Différent montages possibles [16].

Les signaux issus des jauges sont **très faibles (mV)** et nécessitent un **conditionnement** avant traitement numérique :

Le conditionnement du signal comprend plusieurs étapes importantes : **l'amplification**, **le filtrage** et **la conversion analogique-numérique**.

Dans les balances électroniques modernes, ces fonctions sont souvent assurées par un circuit spécialisé comme le HX711.

1. 3.1 Amplification :

Augmente le signal pour qu'il soit exploitable

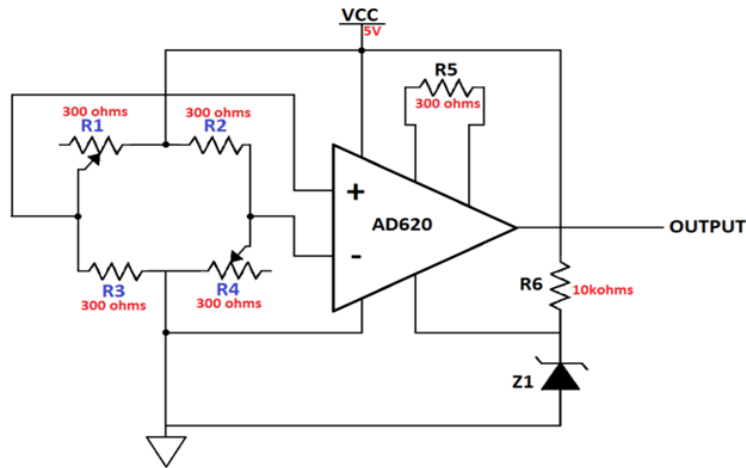


Figure 7 : Montage amplification du signal [16].

Le signal issu du pont de Wheatstone formé par les jauges de contrainte est extrêmement faible, souvent compris entre 1 mV et 20 mV.

Ce niveau de tension est trop bas pour être traité directement par les circuits électroniques.

L'amplification consiste à augmenter l'amplitude du signal tout en conservant sa forme et sa précision.

Cette opération est réalisée grâce à un amplificateur d'instrumentation, spécialement conçu pour amplifier des signaux très faibles tout en rejetant les perturbations externes.

Les avantages de l'amplification sont :

- a. Augmenter la sensibilité du système de mesure
- b. Rendre le signal exploitable par les circuits électroniques
- c. Améliorer la précision de la mesure

Ainsi, un signal de quelques millivolts peut être amplifié jusqu'à quelques volts, ce qui facilite son traitement.

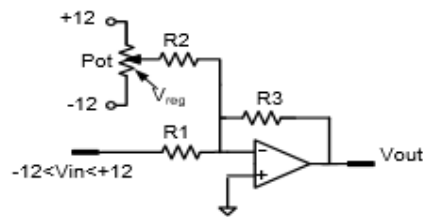


Figure 8 : Montage de réglage de zéro. [4]

- La formule de réglage est :

$$V_{out} = -\frac{R3}{R1}V_{in} - \frac{R3}{R2}V_{reg} \dots\dots\dots (06)$$

Avec : $-12V < V_{reg} < +12V$

Le réglage de zéro consiste à régler la tension V_{reg} jusqu'à ce que V_{out} s'annule. [4]

Nous allons maintenant étudier séparément les différentes fonctions composant ce montage électronique.

1.3.1.1 L'amplificateur d'instrumentation : [16]

Pour ne pas perturber le pont de Wheatstone utilise un amplificateur d'instrumentation

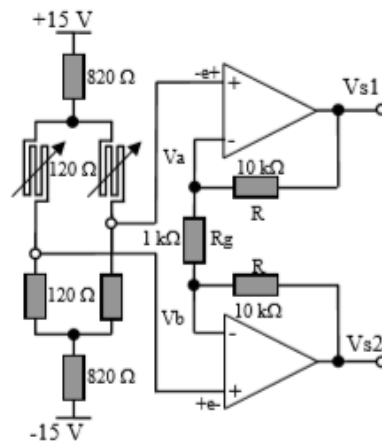


Figure 9 : L'amplificateur d'instrumentation.

Nous avons comme fonction de transfert :

$$V_{s1} - V_{s2} = G1(V_a - V_b + 2e) \dots\dots\dots (08)$$

Où e représente la tension de décalage des AOP et $G1 = [(2R + R_g) / R_g] \dots\dots\dots (07)$

1.3.1.2 L'amplificateur différentiel :

Pour compenser le décalage et amplifier la différence ($V_{s1}-V_{s2}$), utilise un amplificateur différentiel. [16]

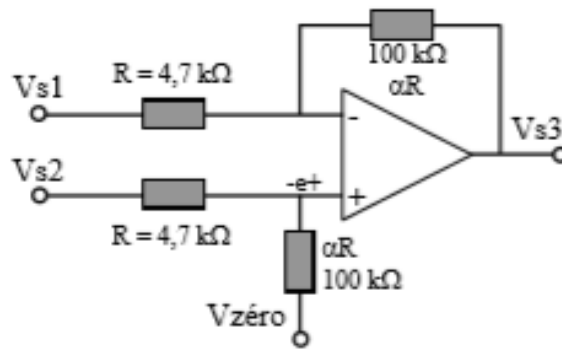


Figure 10 : L'amplificateur différentiel.

Nous obtenons en sortie : $V_{s3} = \alpha (V_{s2} - V_{s1}) + (1+\alpha) e + V \dots\dots (08)$

1.3.1.3 Le décalage réglable (réglage du zéro) :

Pour compenser la tension de décalage il est nécessaire de générer une tension réglable

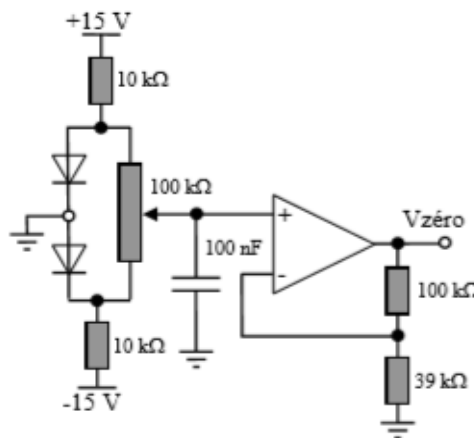


Figure 11 : Le décalage réglable (Réglage du zéro).

Les erreurs seront compensées pour :

$$|V_{\text{zéro}}| = \alpha G_1 (\Delta R_p / R_p) + 2\alpha G_1 e + (1+\alpha)e = 7,5 \text{ V}. \dots\dots (09)$$

Dans la pratique, les tensions de décalage sont dans le même sens, la compensation nécessaire est bien plus faible.

1.3.1.4 L'amplificateur à gain réglable :

Le dernier étage comporte un amplificateur à gain réglable.

Notons que le potentiomètre ne figure pas dans la boucle de contre réaction de l'AOP.

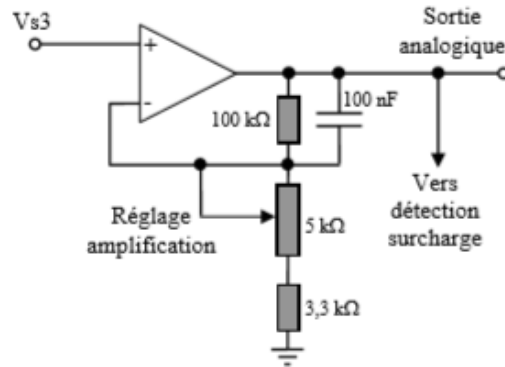


Figure 12 : L'amplificateur à gain réglable.

Le condensateur de 100 nF associé à la résistance de 100 kΩ réalise une fonction de filtrage de la tension de sortie.

1.3.1.5 La détection de surcharge :

Afin de détecter une surcharge du montage pouvant induire un affichage erroné, nous utilisons un AOP en comparateur.

L'affichage de la surcharge est effectué à l'aide d'une LED rouge, la seconde diode assure la protection en tension inverse de la LED.

Cette seconde diode peut être remplacée par une LED verte, le couple de LED indiquant la validité ou la non validité des mesures effectuées.

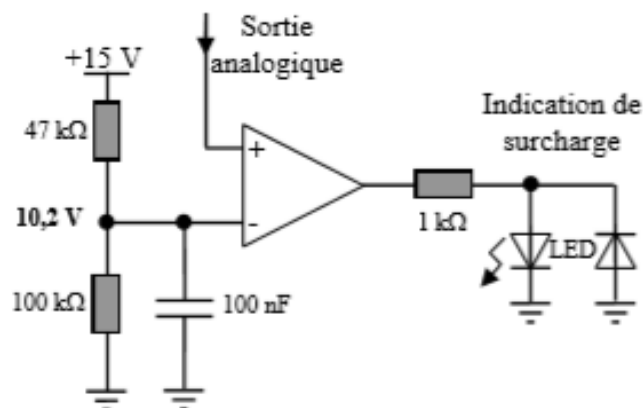


Figure 13 : La détection de surcharge. [16]

1.3.2 Filtrage : Élimine le bruit électrique et les perturbations

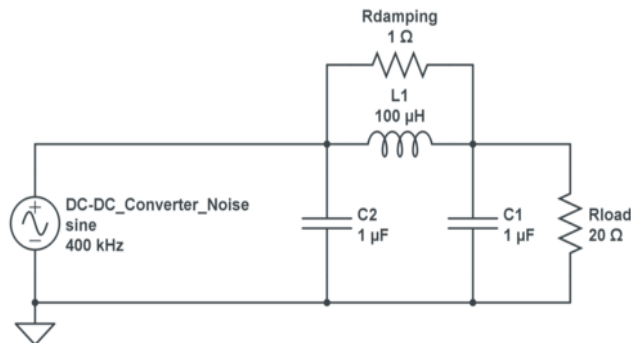


Figure 14 : Montage filtrage du signal [16].

Dans un environnement industriel ou électronique, le signal peut être perturbé par différents types de bruit électrique, tels que :

- Interférences électromagnétiques
- Bruit thermique des composants
- Vibrations mécaniques
- Perturbations provenant du réseau électrique

Le filtrage du signal permet d'éliminer ces perturbations indésirables afin d'obtenir une mesure plus stable.

Le type de filtre le plus utilisé dans les systèmes de pesage est le filtre passe-bas (Low-pass filter). Ce filtre laisse passer les signaux utiles de basse fréquence correspondant à la variation de poids, tout en supprimant les bruits de haute fréquence.

1.4.2.1 Le filtrage améliore :

1. La stabilité du signal
2. La précision de la mesure
3. La fiabilité du système de pesage.

1.3.3 Conversion analogique-numérique (ADC) :

Transforme le signal en valeurs numériques pour le microcontrôleur par **un ADC**.

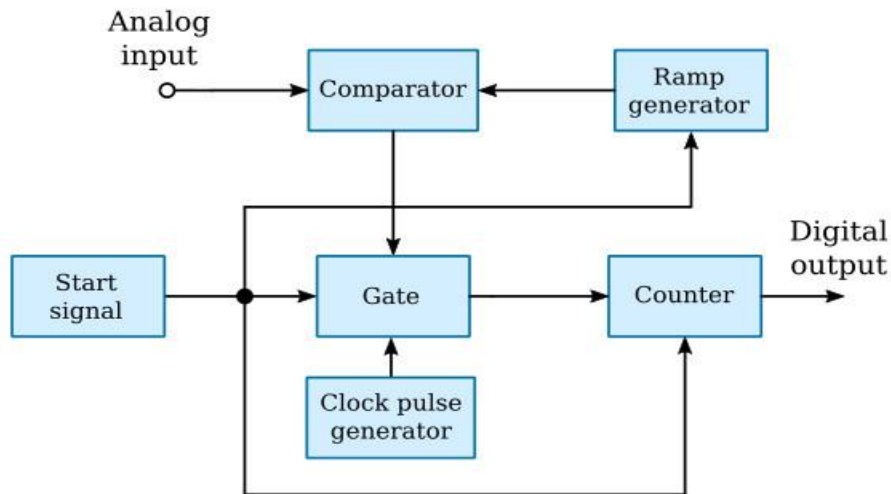


Figure 15 : Schéma Conversion analogique-numérique (ADC).

Après amplification et filtrage, le signal reste analogique. Or, les microcontrôleurs et les systèmes informatiques ne peuvent traiter que des données numériques.

La conversion analogique-numérique (ADC) permet de transformer le signal analogique en valeurs numériques compréhensibles par le microcontrôleur.

Le processus de conversion comprend généralement :

1. **Échantillonnage (sampling) :** mesure du signal à intervalles réguliers
2. **Quantification :** approximation de la valeur analogique par un niveau numérique
3. **Codage :** transformation de la valeur en code binaire

La précision de cette conversion dépend de la résolution de l'ADC (par exemple 12 bits, 16 bits ou 24 bits).

1.4 Métrologie (précision, répétabilité et linéarité) :

1.4.1 Définition de la Métrologie (Selon ISO) :

La métrologie est définie par l'Organisation internationale de normalisation (ISO) comme : [7][8]

« La science de la mesure et ses applications ».

Elle englobe tous les aspects théoriques et pratiques liés aux mesures, quels que soient leur niveau d'incertitude et leur domaine d'application.

La métrologie joue un rôle essentiel dans plusieurs domaines :

1. La recherche scientifique
2. L'industrie
3. Le commerce
4. La santé
5. La sécurité

Elle permet d'assurer la fiabilité, la traçabilité et la comparabilité des mesures réalisées dans différents laboratoires ou industries.

1.4.2 Historique :

La métrologie, science de la mesure, joue un rôle fondamental dans les systèmes de pesage en garantissant la précision, la fiabilité et la traçabilité des mesures de masse [6].

Depuis les premières balances mécaniques utilisées dans les échanges commerciaux jusqu'aux balances électroniques modernes, l'évolution des techniques de mesure a permis d'améliorer considérablement les performances des instruments de pesage.

L'apparition des capteurs à jauges de contrainte et des systèmes électroniques de conditionnement a marqué une avancée majeure en permettant de convertir les déformations mécaniques en signaux électriques mesurables avec une grande précision.

Aujourd'hui, la métrologie appliquée au pesage assure l'étalonnage, la vérification et la validation des balances électroniques, garantissant ainsi des résultats conformes aux exigences des domaines industriel, commercial, scientifique et médical.



Figure 16 : Balance mécanique traditionnelle [6].

1.4.3 Importance de la métrologie dans les systèmes de pesage :

Dans une balance électronique à jauges de contrainte, la masse est mesurée grâce à une chaîne de mesure composée du capteur, du circuit de conditionnement, du convertisseur analogique-numérique et du système de traitement.

La métrologie est essentielle pour garantir l'exactitude, la fiabilité et la traçabilité des mesures, en évaluant les performances du système à travers des paramètres tels que la précision, la sensibilité, la répétabilité et la linéarité [7][8].

Chaque élément peut apporter son quota d'erreurs ou d'incertitudes, la métrologie permet donc d'évaluer les performances du système grâce à des paramètres tels que la précision, la sensibilité, la répétabilité et la linéarité.

1.4.4 Les différents domaines de la métrologie : [7][8]

La métrologie se divise généralement en trois catégories principales :

1. **Métrologie scientifique :** Elle concerne le développement des unités de mesure, des étalons et des méthodes de mesure de haute précision.
2. **Métrologie industrielle :** Elle garantit la précision des instruments utilisés dans les processus de fabrication et de production industrielle.
3. **Métrologie légale :** Elle regroupe les mesures soumises à des réglementations officielles, notamment dans le commerce, la santé ou la sécurité [8].

SI Base Units			
Base quantity		Base unit	
Name	Typical symbol	Name	Symbol
time	t	second	s
length	$l, x, r, \text{etc.}$	meter	m
mass	m	kilogram	kg
electric current	I, i	ampere	A
thermodynamic temperature	T	kelvin	K
amount of substance	n	mole	mol
luminous intensity	I_v	candela	cd

Figure 17 : Grandeurs et unités de mesure [8].

1.4.5 Précision :

On appelle précision d'un instrument de mesure la proximité entre la valeur mesurée et la valeur réelle de la grandeur mesurée.

Pour une balance électronique, la précision correspond au degré de correspondance entre la masse affichée et la masse réelle de l'objet placé sur la balance.

La précision peut être évaluée à partir de l'erreur de mesure, définie par la relation suivante :

$$\text{Erreur} = \text{Valeur}_{\text{mesurée}} - \text{Valeur}_{\text{réelle}} \quad (10)$$

1.4.6 Répétabilité :

La répétabilité se définit comme la capacité de l'instrument de mesure à offrir un résultat constant lors de la répétition de la mesure, en effectuant la mesure en condition expérimentale constante [4].

Tableau 1 : Exemple de répétabilité pour une masse de 500 g [8]

Essai	Masse mesurée
1	500,1 g
2	499.9 g
3	500,2 g

- Une bonne balance doit produire des mesures presque identiques à chaque essai [8].

1.4.7 Linéarité :

La linéarité décrit la relation entre la grandeur mesurée et le signal de sortie du capteur. Un système de mesure est linéaire s'il existe une relation linéaire entre le signal de sortie et la grandeur d'entrée.

Dans le contexte d'une balance électronique, la relation entre la masse d'entrée et le signal de sortie du capteur présenter une relation linéaire.

Une bonne linéarité permet une facilité d'étalonnage du système et une précision de mesure élevée.

$$A = a * Masse + b \quad (11)$$

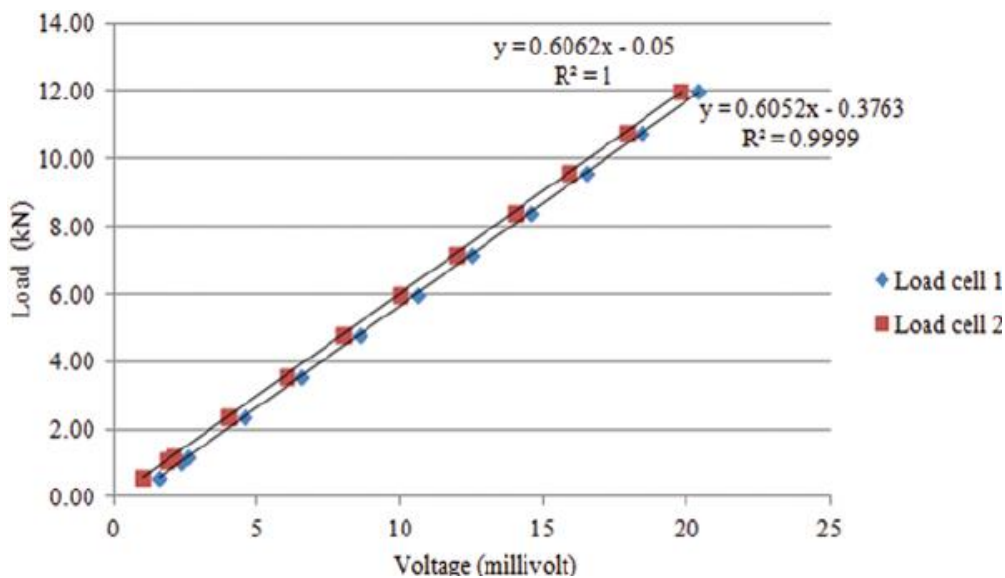


Figure 18 : Graphique explicatif de linéarité [8].

1.4.8 Sensibilité :

La sensibilité d'un système de mesure est la capacité du système à détecter des variations faibles d'une grandeur mesurée, est la variation du signal d'entrée rapportée à la variation du signal de sortie. [4]

$$S = \frac{\Delta Signal}{\Delta Masse} \quad (12)$$

Dans une balance à jauge de contrainte, une sensibilité élevée signifie que de très petites variations de masse peuvent être détectées et mesurées.

1.5 Étalonnage (Calibration) :

L'étalonnage est une opération métrologique qui consiste à comparer les indications d'un instrument de mesure à une référence de valeur connue et traçable, afin de vérifier et d'ajuster sa précision.

Cette procédure est essentielle pour garantir l'exactitude, la fiabilité et la répétabilité des mesures fournies par la balance électronique.

En pratique, l'étalonnage est réalisé à l'aide de masses étalons de valeur connue, permettant de corriger les écarts éventuels entre la valeur mesurée et la valeur de référence et d'assurer un fonctionnement conforme aux performances attendues.



Figure 19 : Étalonnage.

Cette opération permet de :

1. Vérifier la précision de l'instrument
2. Corriger les erreurs de mesure
3. Garantir la traçabilité des mesures

Dans le cas d'une balance électronique, l'étalonnage est généralement réalisé en utilisant des masses étalons connues afin de vérifier que la valeur affichée correspond à la masse réelle.

a) Exemple simple d'étalonnage :

Tableau 2: Exemple d'étalonnage [8]

Masse réelle	Valeur affichée
100 g	99.8 g
200 g	199.9 g
500 g	500.1 g

Ces valeurs permettent d'évaluer l'**erreur de mesure** et éventuellement d'appliquer une correction.

b) Relation entre force appliquée et signal du capteur :

La ligne pointillée représente la relation idéale entre la force appliquée et le signal de sortie.

Dans un capteur parfait, la relation est linéaire.

$$Signal = k \times Force \quad (13)$$

Où :

K : sensibilité du capteur.

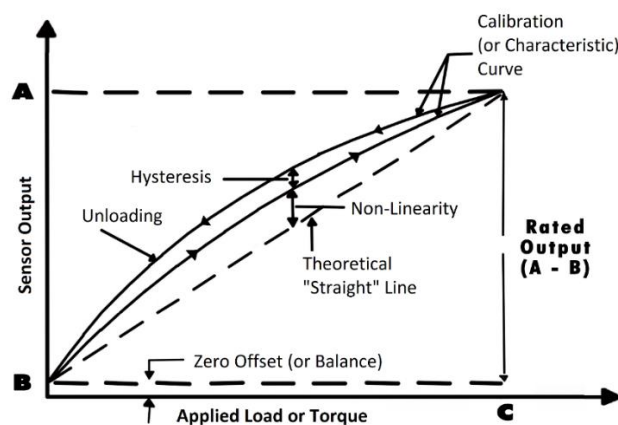


Figure 20 : Relation entre force appliquée et signal du capteur [8].

- Cette relation est généralement linéaire dans les capteurs à jauges de contrainte.

- Dans un capteur idéal, la relation est linéaire. Quand la force augmente, le signal augmente proportionnellement.

c) Non-linéarité (Non-Linéarité) :

La non-linéarité représente :

L'écart entre la courbe réelle du capteur et la ligne droite théorique.

Formule :

$$\text{Erreur linéarité} = \frac{\text{déviation max}}{\text{Sortie max}} \times 100 \quad (14)$$

Les principales causes sont les suivantes :

1. Déformation mécanique
2. Limites du matériau
3. Imperfections du capteur
4. Électronique de mesure.

1.6 Application industrielles :

Les balances à jauges de contrainte sont largement utilisées pour mesurer la masse avec une grande précision.

Grâce à leur fiabilité, leur stabilité et leur sensibilité, elles trouvent de nombreuses applications :

1. Dans les systèmes de pesage industriels,
2. Le dosage et le contrôle de produits
3. L'industrie agroalimentaire,
4. Le pesage de réservoirs et de silos, ainsi que le contrôle des forces dans les machines industrielles.

Elles permettent d'assurer des mesures précises, d'améliorer la qualité des produits, d'automatiser les procédés et de garantir le respect des normes industrielles.

1.7 Analyse des grandeurs d'influence :

Le pesage est une des opérations les plus courantes en laboratoire.

Les balances de précision modernes sont aujourd'hui tellement perfectionnées que l'on peut pratiquement se passer d'un local de pesage [23].

1. Emplacement de la balance :

La précision et la fiabilité des résultats de pesage sont étroitement liées à l'emplacement de la balance, notamment de la qualité de la table de pesée.

Celle-ci doit être suffisamment rigide afin de ne pas se déformer sous l'effet des charges appliquées et capable de transmettre le minimum de vibrations.

Il est recommandé d'utiliser un plan de travail stable, tel qu'une table de laboratoire ou une table en pierre.

La surface de support doit également être amagnétique et peu sensible à l'électricité statique, en évitant les matériaux tels que l'acier, le plastique ou le verre.

De plus, la table doit reposer uniquement sur le sol ou être fixée exclusivement au mur afin d'éviter la transmission simultanée des vibrations.

Enfin, il est préférable que cette table soit réservée exclusivement aux opérations de pesage afin de garantir des mesures précises, stables et reproductibles [23].

2. Le local de travail :

Il doit si possible :

1. Ne pas être soumis aux vibrations ou secousses,
2. Avoir un seul accès (courants d'air),
3. Avoir le moins de fenêtres possible (exposition directe aux rayons du soleil),
4. Les coins du local doivent être réservés à la table de pesée ; c'est à cet endroit qu'un bâtiment présente le moins de vibrations [23].

3. La température :

La température ambiante doit si possible être maintenue constante afin d'éviter toute dérive, ne pas peser à proximité de radiateurs.

Les balances dotées du calibrage motorisé et entièrement automatique, compensent la dérive de température restante [23].

4. L'humidité de l'air :

L'humidité relative doit être comprise entre 45 et 60 %.

5. La lumière :

1. Éviter l'exposition directe aux rayons du soleil (par exemple, rechercher un mur sans fenêtre).
2. Les sources de lumière doivent être suffisamment éloignées de la table de pesée afin d'éviter tout rayonnement thermique (notamment les lampes à incandescence ; les tubes fluorescents ont moins d'influence).

6. L'air :

1. Ne pas peser à proximité d'une climatisation ou d'appareils dotés de ventilateurs (par exemple, les ordinateurs).
2. Éviter la proximité de radiateurs, qui sont sources de chaleur et générateurs de circulation d'air.
3. Ne pas peser près d'une porte [23].

1.8 Utilisation de la balance :

Les conseils suivants vous aideront à obtenir rapidement des résultats de pesage fiables.

1. La mise de niveau :

Vérifiez que la bulle d'air du niveau soit bien centrée par rapport au repère ; au besoin, corrigez le niveau en réglant les vis de calage [23].

Calibrez ensuite la balance.

Une balance dont le niveau n'a pas été ajusté correctement lors de son installation peut entraîner une variation de la sensibilité, autrement dit, sur une balance qui n'est pas exactement en position horizontale [23].

2. La mise sous tension :

1. Laissez toujours la balance raccordée au secteur et allumée, de façon à ce qu'un équilibre thermique puisse s'établir au sein de la balance.
2. N'éteignez la balance qu'à l'aide de la touche de tarage ; elle passe ainsi en mode Stand-by et l'électronique reste sous tension (un temps d'échauffement n'est plus nécessaire) [23].

3. Le plateau :

Posez le produit à peser au centre du plateau afin d'éviter toute erreur liée aux charges excentrées [23].

Il est conseillé - après une pause de plus de 30 minutes - de charger brièvement le plateau avant de réutiliser la balance.

Retirez le produit à peser du plateau dès que l'opération de mesure est terminée.

4. La lecture du résultat :

- Avant chaque pesée, vérifiez que la balance est bien à zéro et tarez si nécessaire. Vous évitez ainsi toute erreur due au zéro [23].

5. L'entretien :

1. Veillez à ce que la chambre de pesée et le plateau soient toujours propre.
2. Pour le pesage, utilisez toujours des récipients propres [23].

1.9 Conclusion :

En conclusion, l'étude théorique de la balance à jauges de contrainte a permis de comprendre le principe de conversion d'une force ou d'une masse en un signal électrique exploitable.

Son fonctionnement repose sur la déformation élastique d'un élément mécanique équipé de jauges de contrainte, dont la variation de résistance est détectée par un pont de Wheatstone.

Cette variation, proportionnelle à la charge appliquée, permet de déterminer la masse avec une grande précision après étalonnage.

L'étude a également mis en évidence les principaux facteurs influençant les performances métrologiques du système, notamment la sensibilité des jauges, les propriétés mécaniques du matériau, les conditions de montage et les sources d'erreurs de mesure.

Grâce à sa précision, sa fiabilité et sa stabilité, la balance à jauges de contrainte est aujourd'hui largement utilisée dans les domaines industriels, commercial et scientifique.

La maîtrise de ses principes de fonctionnement constitue une étape essentielle pour la conception, l'optimisation et la validation des systèmes de pesage électroniques modernes.

Les connaissances théoriques présentées dans ce chapitre constituent la base indispensable pour la compréhension et la mise en œuvre du système de pesage développé dans ce mémoire.

Elles serviront de fondement au **chapitre suivant**, consacré à la **description du dispositif de mesure**, dans lequel seront présentés l'architecture matérielle du système, les différents composants utilisés ainsi que leur rôle et leur intégration dans la réalisation pratique de la balance électronique.

Chapitre 2 : Description des dispositifs de mesure

2.1 Introduction :

Ce chapitre traite de la partie pratique du projet, Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, les fondements théoriques des jauges de contrainte, du pont de Wheatstone, ainsi que les notions de métrologie et d'étalonnage, il s'agit à présent de décrire la conception et la réalisation de la balance électronique développée.

Ce chapitre expose l'architecture générale du système de mesure ainsi que les différents composants matériels utilisés.

Il explique également l'interaction entre ces éléments afin de convertir la charge mécanique appliquée sur la plateforme de pesage en une information numérique correspondant à la masse mesurée.

Le système conçu repose principalement sur une cellule de charge à jauges de contrainte, un module de conditionnement et de conversion analogique-numérique HX711, un microcontrôleur ESP32 (ou Arduino Nano, selon votre projet) chargé du traitement des données, ainsi qu'un écran OLED assurant l'affichage en temps réel des mesures.

Enfin, ce chapitre présente le principe général de fonctionnement de la balance électronique, l'architecture matérielle du système et le rôle de chacun des composants, afin de mettre en évidence leur contribution au fonctionnement global du dispositif de pesage.

2.2 Structure générale du système de mesure :

Le système de mesure de la balance électronique peut être représenté sous forme d'une chaîne de mesure composée de plusieurs blocs fonctionnels (Figure 40).

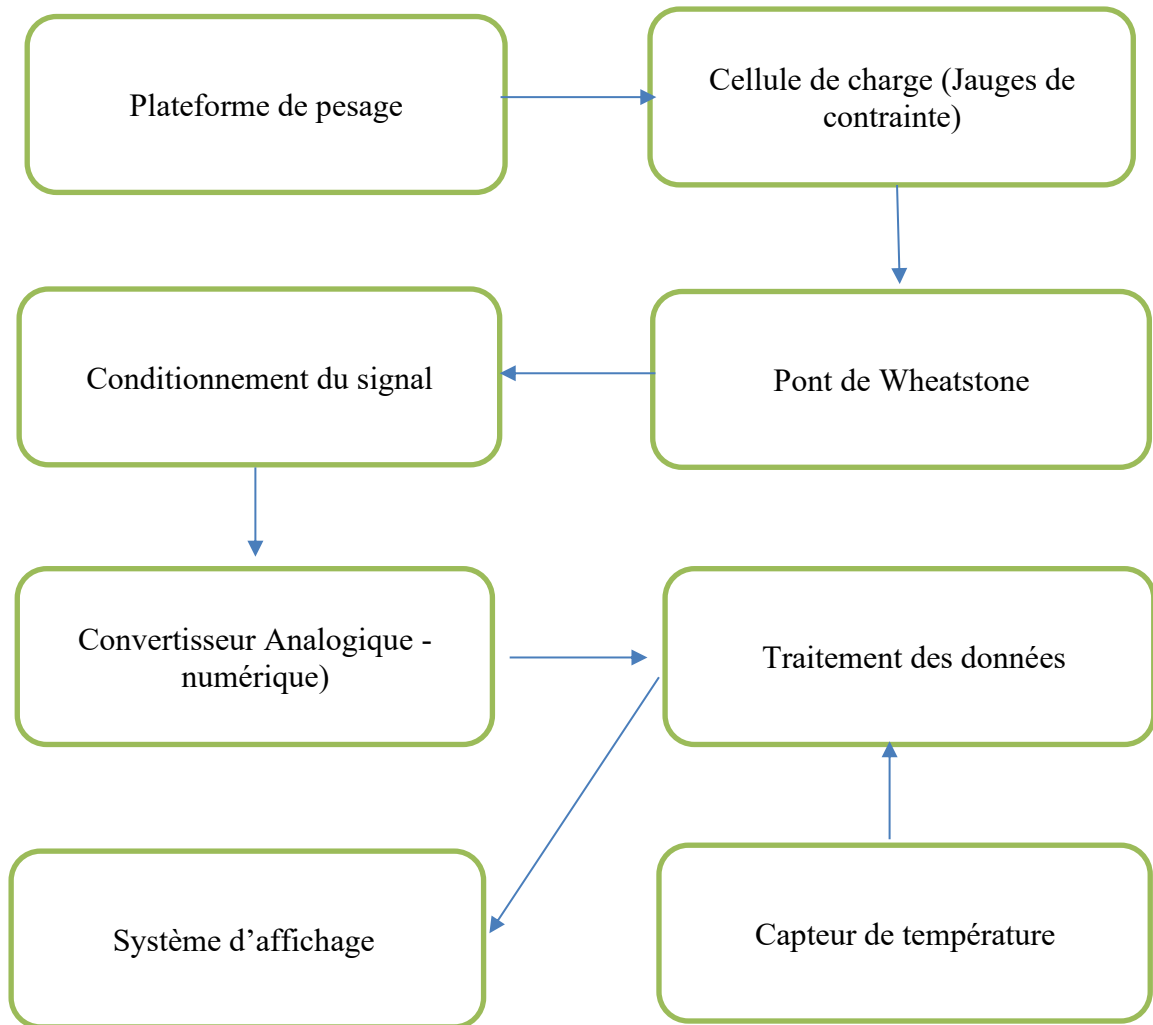


Figure 21 : Schéma du Structure générale du système de mesure.

2.3 Description de matériel utilisé :

2.3.1 Jauge de contrainte (caractéristique technique) :

Sont des capteurs mécano résistifs largement utilisés dans les systèmes de pesage pour leur grande sensibilité et leur précision. [04]

Les principales caractéristiques techniques d'une jauge de contrainte sont sa résistance nominale (généralement de 120 Ω , 350 Ω ou 1000 Ω), son facteur de jauge (GF)

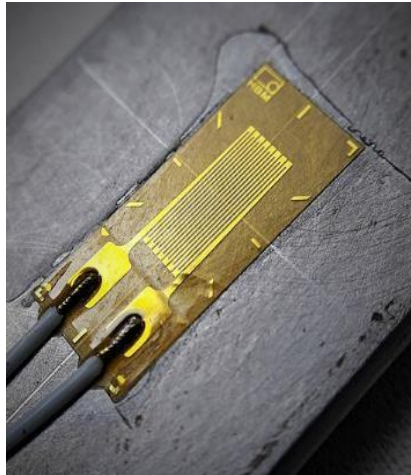


Figure 22 : Jauge de contrainte [04].

2.3.2 Capteur de pesage :

Un capteur de pesage est constitué d'un élément métallique sur lequel sont fixées des jauges de contrainte permettant de mesurer une force appliquée.



Figure 23 : Capteur de pesage [17].

Ce composant est généralement fabriqué en aluminium ou en acier inoxydable.

Ces matériaux présentent deux avantages principaux :

- Il est solide et peut supporter de lourdes charges.

- Il a une certaine élasticité, ce qui leur permet de se déformer légèrement sous l'effet d'une force puis de retrouver leur forme initiale lorsque la charge disparaît. [17]

Lorsqu'un effort est porté au métal, ce dernier se déforme légèrement.

À condition que l'effort porté soit en deçà des limites admissibles, cette déformation sera élastique et la matière retrouvera son état originel une fois l'effort annulé [17].

Plus une cellule de charge présente une sensibilité élevée, plus elle pourra mesurer des variations minimales de force [17].

Dans plusieurs domaines d'industrie, par exemple dans le domaine des robots ou aéronautique, la linéarité des capteurs de force doit être suffisante.

Cependant, en ce qui concerne certaines sortes de capteurs, par exemple, les capteurs de type galette, ils peuvent présenter quelques imperfections en termes de non-linéarité ($\pm 0,1$ % de la valeur nominale), ainsi qu'une erreur de répétabilité d'environ $\pm 0,05$ % de la pleine échelle [16] [17].

2.3.3 Module hx711 :

Le HX711 est un circuit intégré spécialement conçu pour les applications de pesage électronique utilisant des capteurs à jauges de contrainte [12].

Il intègre un amplificateur d'instrumentation à faible bruit ainsi qu'un convertisseur analogique-numérique (ADC) de 24 bits, permettant le traitement de signaux de très faible amplitude.

Dans une balance électronique, le HX711 amplifie le signal électrique issu du pont de Wheatstone de la cellule de charge, puis le convertit en données numériques exploitables par un microcontrôleur, tel que l'ESP32.

Grâce à sa haute résolution, sa précision et sa simplicité de mise en œuvre, ce module est largement utilisé dans les balances électroniques, les systèmes industriels de pesage et les dispositifs de mesure de force.

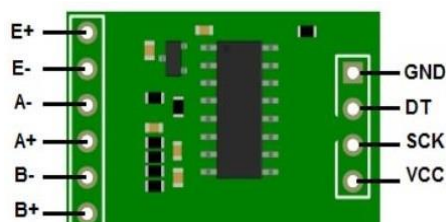


Figure 24 : Module hx711 [12].

2.5.3.1 Fonctionnement du module HX711 :

Le fonctionnement du module HX711 repose sur le traitement du signal issu de la **cellule de charge**. [12]

Lorsqu'une force est appliquée sur la plateforme de la balance, la cellule de charge se déforme légèrement, ce qui provoque une variation de la résistance des jauges de contrainte. [12]

Cette variation entraîne un déséquilibre du pont de Wheatstone.

Générant une tension différentielle très faible, généralement de l'ordre du millivolt.

Le module HX711 intervient alors en deux étapes principales :

a) Amplification du signal :

Le HX711 possède un amplificateur d'instrumentation intégré qui amplifie la tension différentielle provenant de la cellule de charge.

Le gain d'amplification peut atteindre 128, ce qui permet d'obtenir un signal suffisamment important pour être traité.

b) Conversion analogique-numérique :

Après amplification, le signal analogique est converti en signal numérique par le convertisseur ADC 24 bits intégré dans le HX711.

Cette conversion permet au microcontrôleur de lire les données de mesure sous forme de valeurs numériques.

Configurer avec un gain de 128 ou 64. Cela correspond à une tension d'entrée [12].

Différentielle de ± 20 mV ou ± 40 mV. Ce canal sert surtout pour les mesures précises.

Canal B a un gain fixe de 32 et est destiné à des applications où une amplification moins élevée suffit.

Le HX711 a aussi un régulateur d'alimentation, donc pas besoin d'un régulateur externe pour la tension analogique (AVDD). Il fonctionne avec 5 V.

2.5.3.2 Branchement du module HX711 :

Le module HX711 possède plusieurs broches permettant sa connexion avec la cellule de charge et le microcontrôleur.

a) Connexion avec la cellule de charge :

Les bornes suivantes sont utilisées :

E+ : alimentation positive du pont de Wheatstone

E- : alimentation négative du pont

A+ : entrée positive du signal provenant de la cellule de charge

A- : entrée négative du signal

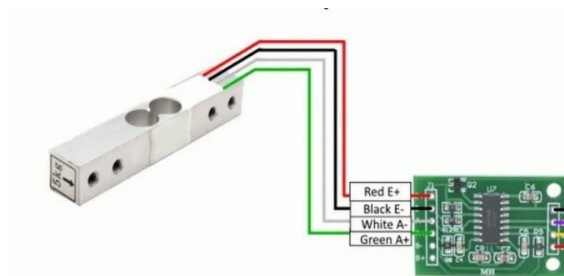


Figure 25 : Câblage capteur poids avec hx711 [12].

Ces broches permettent de connecter directement la cellule de charge au module HX711.

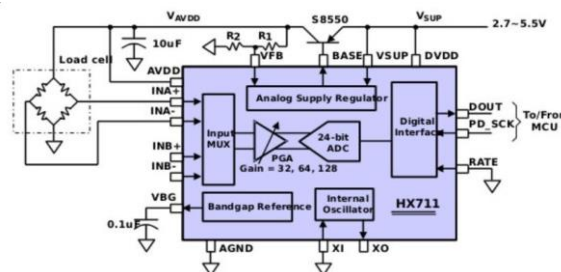


Figure 26 : Schéma fonctionnelle de hx711 [12].

- **Entrées analogiques** : Le canal différentiel A sert à relier directement la sortie différentielle d'un capteur à pont (comme une jauge de contrainte).
- Il peut être configuré avec un gain de 128 ou 64, ce qui permet d'amplifier les signaux de faible amplitude typiques de ce type de capteurs. [12]
Avec une alimentation de 5 V (AVDD), ces gains correspondent à une tension d'entrée différentielle de ± 20 mV ou ± 40 mV.
Le canal différentiel B a un gain fixe de 32 et accepte une tension d'entrée différentielle à pleine échelle de ± 80 mV avec une alimentation de 5 V.
- **Options alimentation** : L'alimentation numérique (DVDD) doit être la même que celle utilisée pour le microcontrôleur (MCU). [12]
Si on utilise le régulateur d'alimentation analogique interne, la tension de sortie dépend du transistor externe connecté.

b) Connexion avec la carte ESP32 :

Les broches suivantes sont utilisées pour la communication :

VCC : alimentation du module

GND : masse

DT (Data) : transmission des données

SCK (Clock) : signal d'horloge

Le microcontrôleur lit les données numériques provenant du HX711 à travers les broches DT et SCK.

2.5.4 Capteur DS18B20 :

2.5.4.1 Définition du capteur DS18B20 :

Le **DS18B20** est un capteur de température numérique de haute précision, largement utilisé dans les systèmes embarqués.

Il permet de mesurer la température ambiante et de transmettre les données au microcontrôleur via une communication numérique de type **1-Wire**, ne nécessitant qu'une seule ligne de données [9].



Figure 27 : Le capteur DS18B20 [9].

Dans ce projet, le DS18B20 est utilisé pour **mesurer les variations de température** influençant les jauges de contrainte, afin de corriger la dérive thermique du système de pesage [9].

a) Fonctionnement :

Le capteur DS18B20 mesure la température et envoie une valeur numérique directement exploitable par ESP32.

b) Principe dans mon système :

1. La température ambiante est mesurée
2. L'ESP32 lit cette température
3. Une correction est appliquée sur la mesure de masse.

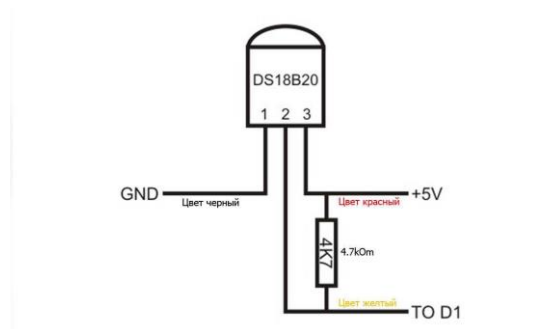


Figure 28 : Schéma de principe [9].

c) Branchement avec ESP32 :

Tableau 3 : Branchement DS18B20 avec ESP32 [10].

DS18B20	ESP32
VCC	5V
GND	GND
DATA	P2 (ou autre pin digitale)

- Ajouter une **résistance de pull-up (4.7 k Ω)** entre **DATA** et **VCC**

d) Caractéristiques principales :

1. Type : capteur numérique
2. Plage de mesure : -55°C à +125°C
3. Précision : $\pm 0.5^\circ\text{C}$
4. Communication : 1-Wire
5. Faible bruit
6. Haute stabilité

f) Avantages de l'intégration du DS18B20 :

- 1) Amélioration de la stabilité
- 2) Réduction de la dérive thermique
- 3) Mesures plus fiables
- 4) Approche intelligente (instrumentation moderne) [10].

2.5.5 Carte ESP32 :

2.5.5.1 Définition d'ESP32 :

La carte ESP32 est une carte de développement basée sur le microcontrôleur ESP32 d'Expressif Systèmes.

Elle intègre des fonctionnalités avancées de traitement, de communication Wi-Fi et Bluetooth, ce qui la rend particulièrement adaptée aux systèmes embarqués et aux applications IoT.

La carte électronique ESP32, qui constitue l'unité de traitement principale du système. Elle assure l'acquisition des données provenant du module HX711, le traitement des mesures, la gestion de l'affichage OLED ainsi que le contrôle des différentes fonctionnalités de la balance de précision. Grâce à ses capacités de calcul et de communication sans fil, l'ESP32 représente une solution performante pour les applications embarquées et les systèmes de mesure intelligents. [13] [14]

2.5.5.2 Fonctionnement de l'ESP32 dans la balance :

Dans le système de pesage réalisé, l'ESP32 joue un rôle central dans la **chaîne de mesure**.

Son fonctionnement repose sur plusieurs étapes :

1. Lecture des données

L'ESP32 reçoit les données numériques provenant du module HX711 à travers les broches DT (Data) et SCK (Clock).

2. Traitement des données

Les valeurs reçues sont traitées par le programme afin de convertir les données brutes en valeur de masse réelle.

3. Étalonnage

Un facteur d'étalonnage est appliqué pour obtenir une mesure précise correspondant à la masse réelle.

4. Affichage du résultat

La valeur mesurée est ensuite envoyée vers l'afficheur OLED pour être visualisée par l'utilisateur.

2.5.5.3 Caractéristiques de l'ESP32 :

L'ESP32 possède plusieurs caractéristiques techniques qui le rendent adapté à mon projet :

Tableau 4 : Caractéristiques de l'ESP32 [18].

Caractéristique	Description
Microcontrôleur	ESP32 (processeur double cœur 32 bits)
Fréquence d'horloge	Jusqu'à 240 MHz
Mémoire SRAM	520 Ko
Mémoire Flash	Généralement 4 Mo
Tension de fonctionnement	3,3 V
Wi-Fi	IEEE 802.11 b/g/n intégré
Bluetooth	Bluetooth Classic et Bluetooth Low Energy (BLE)
Entrées/Sorties GPIO	Jusqu'à 34 broches GPIO
Convertisseur ADC	ADC 12 bits intégré
Interfaces de communication	UART, SPI, I ² C, PWM, CAN
Modes d'économie d'énergie	Deep Sleep, Light Sleep
Température de fonctionnement	-40 °C à +85 °C

L'ESP32 constitue l'unité centrale de traitement de la balance de précision.

Il assure l'acquisition des données provenant du système de mesure, leur traitement numérique, l'affichage des résultats sur l'écran OLED ainsi que la gestion des différents périphériques du système.

Son intégration du Wi-Fi et du Bluetooth offre également la possibilité d'ajouter des fonctionnalités de communication et de supervision à distance. [18]

2.5.5.4 Rôle dans la chaîne de mesure

Dans la balance électronique réalisée, ESP32 assure plusieurs fonctions essentielles :

- Acquisition des données du module HX711
- Traitement et calcul de la masse
- Gestion de l'affichage
- Contrôle des éléments d'interface (LED, boutons)

2.5.5.5 Broches et connexions :

L'ESP32 dispose d'un grand nombre de broches d'entrée/sortie (GPIO) permettant l'interfaçage avec différents capteurs et périphériques.

Dans le cadre de cette balance de précision, plusieurs broches sont utilisées pour la communication avec le module HX711, l'afficheur OLED et le capteur de température DS18B20 [23].

Tableau 5 : Connexions de l'ESP32 [18].

Périphérique	Broche du module	Broche ESP32
HX711	DT (Data)	GPIO 25
HX711	SCK (Clock)	GPIO 27
OLED I2C	SDA	GPIO 21
OLED I2C	SCL	GPIO 22
DS18B20	DATA	GPIO 15
LED d'indication	Anode (+)	GPIO 2
Alimentation	VCC	3,3 V ou 5 V*
Masse	GND	GND

Description

GPIO 4 et GPIO 5 : assurent la communication avec le module HX711 pour l'acquisition des données de pesage.

- GPIO 21 (SDA) et GPIO 22 (SCL) : constituent le bus I²C utilisé pour l'afficheur OLED.
- GPIO 15 : reçoit les données du capteur de température DS18B20.
- GPIO 2 : pilote la LED d'indication du système.
- VCC et GND : assurent l'alimentation et la référence électrique commune de tous les composants.

Cette configuration permet une communication fiable entre les différents modules de la balance tout en exploitant efficacement les ressources matérielles de l'ESP32. [18]

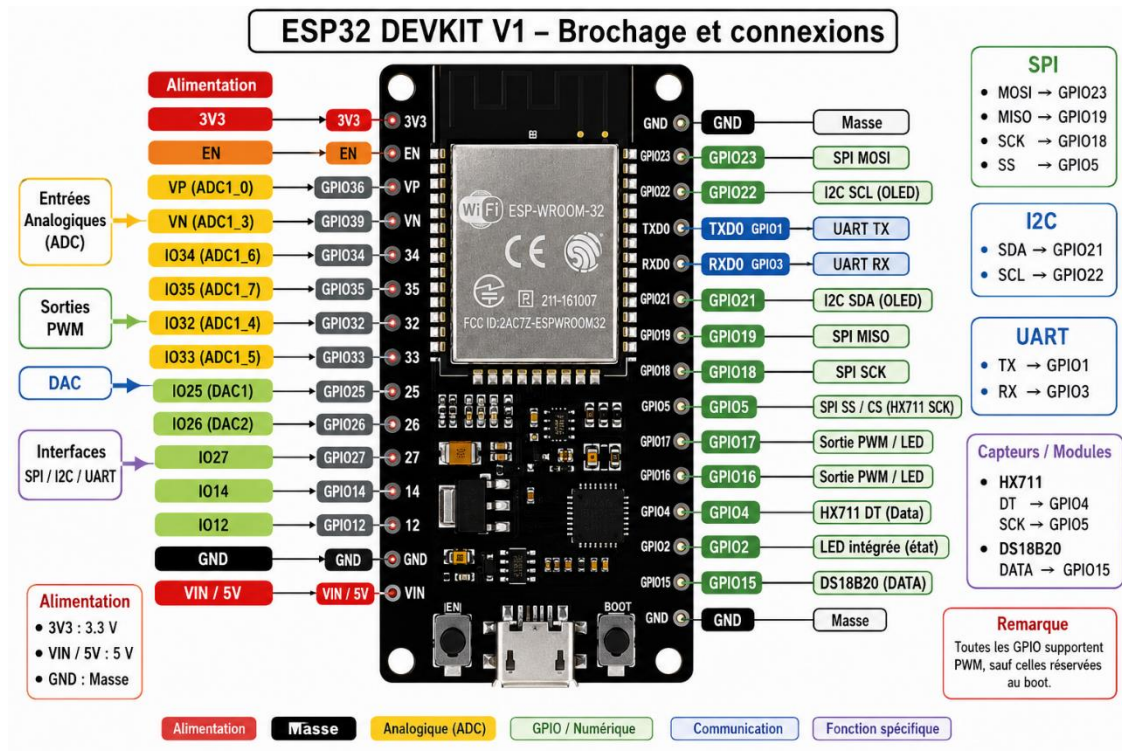


Figure 29 : Branches ESP32. [18]

ORGANIGRAMME DU SYSTÈME DE PESAGE

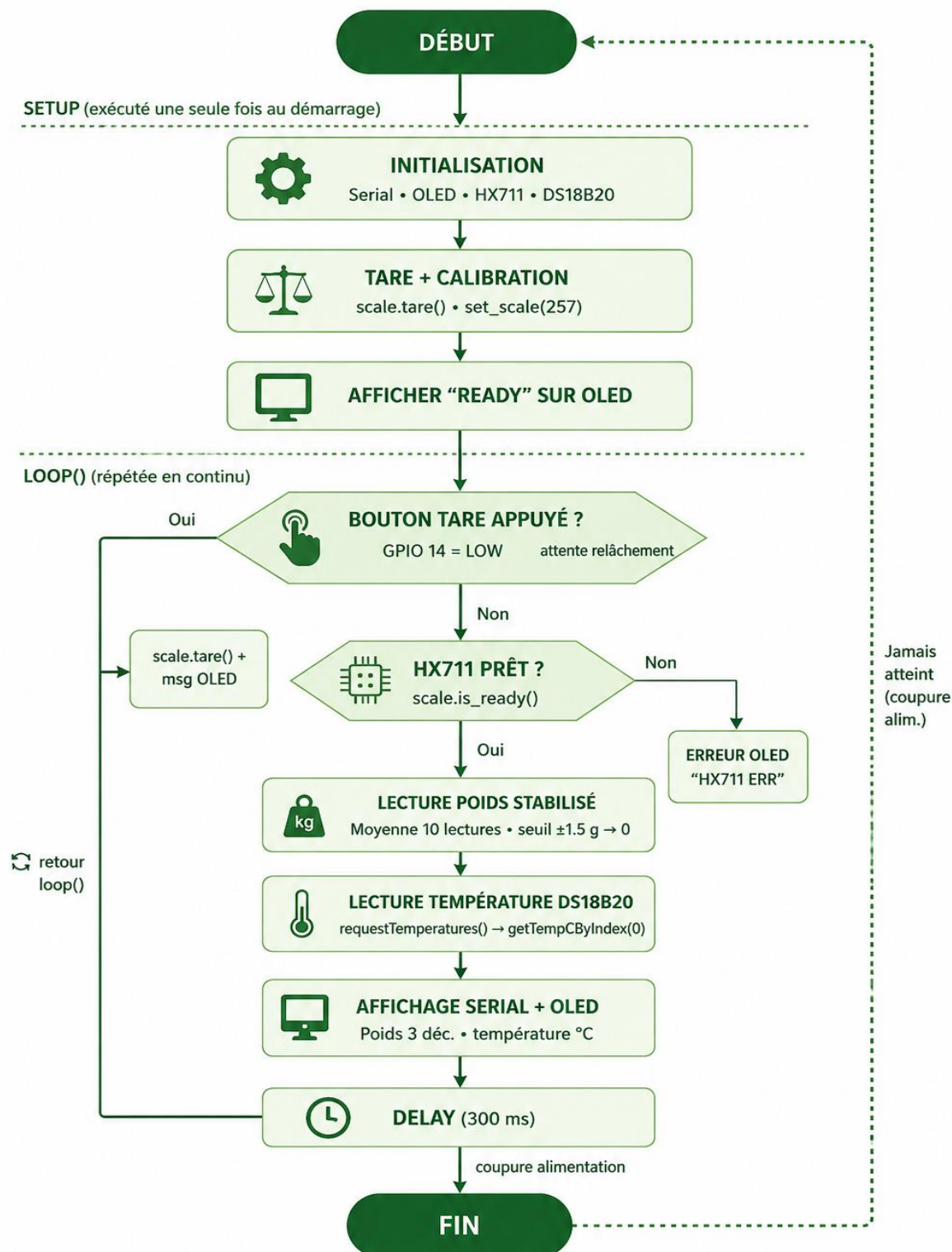


Figure 30 : L'organigramme de code.

2.6 Afficheur bleu OLED 128 × 64 :

2.6.1 Description :

Le moniteur OLED est un outil de display qui appartient aux technologies largement utilisées dans des solutions instrumentales et systèmes intégrés.

Les écrans OLED se distinguent des moniteurs LCD par le fait que dans les écrans OLED, l'éclairage est généré par des diodes organiques électroluminescentes qui sont capables de donner leur propre émission lumineuse, et ceci permet d'obtenir une image d'excellente qualité et de contraste [19].

Grâce au projet, l'écran OLED est utilisé afin de montrer en permanence la valeur de la masse déterminée avec l'appareil.

Ces données, provenant du traitement des données effectuées avec l'ESP32, sont transmises sur l'écran afin que l'utilisateur puisse voir les résultats directement [19].

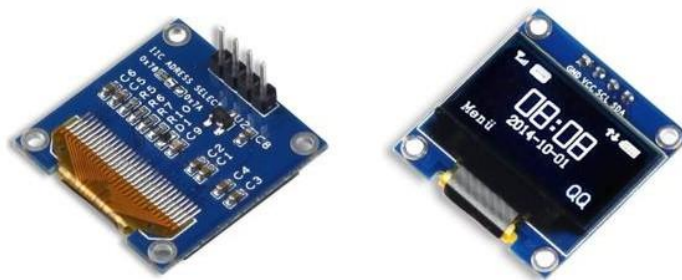


Figure 31 : Afficheur OLED [19].

2.6.2 Caractéristiques de l'afficheur OLED :

Les principales caractéristiques de l'afficheur OLED utilisé dans ce projet sont :

- Écran OLED de 1,3 pouce avec affichage en noir et blanc ou en noir et bleu.
- L'image est claire et le contraste élevé grâce à la résolution 128x64.
- **Type d'écran** : OLED graphique. [19]
- Résolution : 128 × 64 pixels
- Interface de communication : I2C
- Tension d'alimentation : 3.3 V à 5 V
- Consommation énergétique : faible
- Nombre de broches : 4
- Dimensions compactes adaptées aux systèmes embarqués.

2.6.3 Branchement de l'afficheur OLED :

L'afficheur OLED communique avec ESP32.

Le module comporte généralement quatre broches principales :

- VCC : alimentation du module (3.3 V ou 5 V)
- GND : masse du circuit
- SDA : ligne de données
- SCL : ligne d'horloge [19]

Dans le montage de la balance électronique, ces broches sont connectées à l'ESP32 de la manière suivante :

- VCC → 5V ESP32
- GND → GND ESP32
- SDA → P21 ESP32
- SCL → P22 ESP32

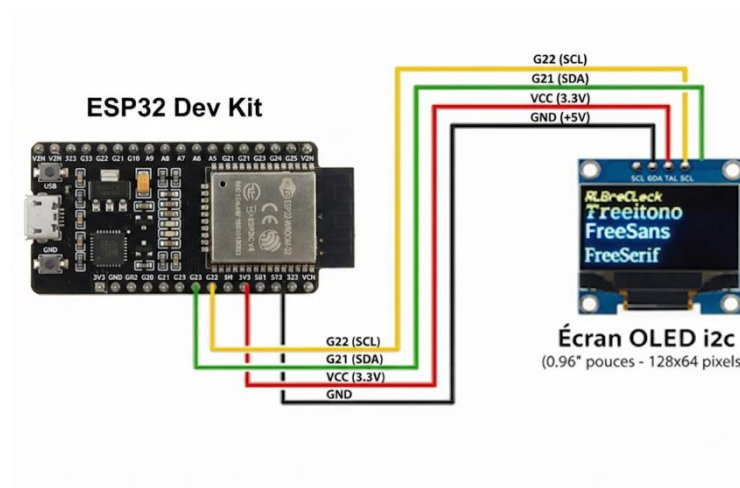


Figure 32 : Raccorder un écran OLED à l'ESP32 [20].

2.7 Dimensionnement du système d'alimentation :

2.7.1 Estimation des besoins de l'utilisateur (bilan de puissance) :

La consommation totale du système est la somme des différents blocs :

1. Capteur de pesage + amplificateur (HK711)
2. Microcontrôleur (ESP32)
3. Afficheur OLED
4. Modules additionnels (Bluetooth, ADC, etc.)

Consommation totale :

$$P_{total} = P_{capteur} + P_{mcu} + P_{afficheur} + P_{modules} \dots\dots\dots (15)$$

Tableau 6: Le tableau ci-dessous présente le bilan énergétique [24].

Composant	Tension (V)	Courant (mA)	Puissance (mW)
Cellule de charge (pont de Wheatstone)	5 V	≈ 10 Ma	50 mW
HX711	5 V	≈ 1.5 Ma	7.5 mW
ESP32	5 V	≈ 50 Ma	250 mW
OLED 128x64	5 V	≈ 25 Ma	125 mW
DS18B20	5 V	≈ 1 Ma	5 mW
LED	5 V	≈ 10 Ma	50 mW
MT3608 (pertes)	5 V	≈ 10 Ma	50 mW
Total	5 V	≈ 110.5 Ma	≈ 552.5 mW

Énergie consommée :

L'énergie consommée pendant une durée t est donnée par :

$$E_{consommée} = P_{total} \times t \dots\dots\dots (16)$$

$$= 552.5 \times 1 = 0.5525 \text{ Wh}$$

Où :

- E en Wh (Watt-heure)
- P en W
- t en heures

Autonomie de la batterie :

L'autonomie est un point clé dans ton système :

$$\text{Autonomie} = \frac{\text{Capacité batterie(Wh)}}{P_{totale} \text{ (W)}} \times 100 \dots\dots\dots (17)$$

$$= 14.7 \text{ heures}$$

$$\text{Energie stockée (Wh)} = 0,5525 \times 14,7 = 8,12 \text{ Wh}$$

$$\text{Capacité (h)} = 8,12 \text{ Wh} / 3.7\text{v} = 2.2 \text{ Ah}$$

2.7.2 Système d'alimentation de la balance :

Pour assurer l'autonomie de la balance électronique, on a mis en place un système de recharge alimentaire efficace.

Ce système fournit l'électricité nécessaire pour la microcarte de contrôle, le capteur de poids, le module HX711, ainsi que pour le moniteur à cristaux liquides OLED.

Le système d'approvisionnement comprend en premier lieu une batterie lithium, un module de charge TP4056 [21].

2.7.2.1 Batterie lithium :

La batterie de lithium représente la source d'énergie majeure de l'appareil de pesée. Cette dernière est largement employée dans tous les appareils électroniques portables en raison de ses propriétés de recharge et de sa fiabilité [24].

La batterie fournit l'énergie requise par tous les composants du système de balance incluant l'Arduino Nano, l'HX711 et OLED monitor, elle est chargée par sa propre autonomie, créant ainsi une autonomie totale.

- **Caractéristiques principales :**

1. Type : Batterie lithium rechargeable
2. Tension nominale : 3.7 V
3. Bonne densité énergétique.
4. Faible autodécharge
5. Longue durée de vie
6. Capacité : 2.6 Ah.

2.7.2.2 Module de charge TP4056 :

TP4056 Module est une composante électronique qui est principalement utilisée dans l'alimentation et la charge d'accumulateurs lithium-ion.

Le module permet une charge facile de la batterie sans provoquer d'accidents comme la surcharge et la surchauffe de la batterie.

Comme il est prévu dans le système de gestion de l'équilibre, dans le cas où la batterie est branchée sur une source d'alimentation, c'est le module TP4056 qui gère la charge de la batterie [21].



Figure 33 : Module de charge TP4056 [21].

Fonctions principales :

La clé à douille est un outil indispensable pour les bricoleurs.

Elle a plusieurs avantages :

- Gestion automatique du processus de charge
- Protection contre la surcharge
- Protection contre la décharge excessive
- Indication de l'état de charge grâce à des LED
- Tension d'entrée : 5 V CC (USB Type-C)
- Tension de charge : $4,2 \text{ V} \pm 1 \%$
- Courant de charge = 1 A
- Rendement Jusqu'à 90 %

Ce module garantit ainsi la sécurité et la durabilité de la batterie utilisée dans le système.

2.7.2.3 Convertisseur boost MT3608 :

L'élément MT3608 est un module électronique conçu pour régler la tension de l'alimentation.

Puisque le lithium-ion fonctionne avec une tension d'environ 3,7V, la fonction de ce module est d'élever cette tension à 5V, qui est la tension requise par les différents composants de la conception [22].

Dans ce projet, le module MT3608 assure la stabilisation et l'adaptation de la tension afin de garantir le bon fonctionnement de l'ESP32 et des autres modules électroniques [22].



Figure 34 : Convertisseur boost MT3608 [22].

- **Caractéristiques principales :**
 1. Type : convertisseur DC-DC élévateur (Boost)
 2. Tension d'entrée : 2 V à 24 V
 3. Tension de sortie : jusqu'à 28 V
 4. Rendement élevé
 5. Réglage de la tension de sortie par potentiomètre [22].

2.8 Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter l'ensemble des composants matériels retenus pour la conception et la réalisation de la balance électronique à jauges de contrainte.

Le choix de chaque composant a été effectué en tenant compte de plusieurs critères essentiels, notamment la précision, la fiabilité, la stabilité, la faible consommation d'énergie et la compatibilité avec les autres éléments du système.

Le système de mesure repose sur l'utilisation d'un pont de Wheatstone associé au module HX711, qui intègre un amplificateur à faible bruit et un convertisseur analogique-numérique de haute résolution (24 bits).

Cette solution permet d'amplifier les très faibles variations de tension délivrées par les jauges de contrainte et de les convertir en données numériques avec une excellente précision, garantissant ainsi des mesures fiables et répétables.

Par ailleurs, l'intégration du capteur de température DS18B20 permet de surveiller les conditions thermiques du système et de contribuer à la compensation des effets de la température sur les mesures, améliorant ainsi la stabilité et la précision de la balance dans différentes conditions d'utilisation.

L'ESP32 assure le traitement des données acquises, tandis que l'afficheur OLED permet une visualisation claire et instantanée des informations relatives au poids et à la température.

L'ensemble de ces composants constitue une architecture matérielle performante, évolutive et adaptée à la réalisation d'un système de pesage électronique précis et fiable. Ainsi, ce chapitre a permis d'établir la base matérielle nécessaire à la conception de la balance électronique.

Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation pratique du système, à son assemblage, à son fonctionnement ainsi qu'à la validation expérimentale de ses performances.

Chapitre 3 : Réalisation, conception et analyse des résultats

3.1 Introduction :

Après avoir présenté, dans le chapitre précédent, l'étude de conception de la balance électronique de précision, notamment le choix des solutions techniques, la sélection des composants électroniques, le dimensionnement des différents éléments ainsi que la conception mécanique de la structure, ce chapitre est consacré à la réalisation pratique du système et à l'évaluation de ses performances.

L'objectif principal est de décrire les différentes étapes de développement du prototype, depuis l'assemblage des composants jusqu'à la validation expérimentale de la balance. Les procédures de réalisation du circuit électronique, l'intégration mécanique des différents modules et leur mise en œuvre seront détaillées afin de présenter le fonctionnement global du système.

Dans une première partie, la réalisation matérielle de la balance est présentée. Elle comprend l'assemblage des jauges de contrainte, du pont de Wheatstone, de l'amplificateur HK711, de la carte ESP32, de l'afficheur OLED, du capteur de température DS18B20, ainsi que des modules d'alimentation, de gestion de la batterie et de l'intégration mécanique de l'ensemble.

La deuxième partie est consacrée à l'étalonnage et à la validation expérimentale de la balance.

Plusieurs essais sont réalisés à l'aide de masses de référence afin d'évaluer les performances métrologiques du système en termes de précision, de répétabilité, de linéarité et de stabilité.

Une étude de l'influence de la température sur les mesures est également menée à l'aide du capteur DS18B20.

Enfin, la dernière partie présente une analyse des résultats expérimentaux obtenus. Les performances de la balance réalisée sont comparées aux valeurs de référence afin d'évaluer sa conformité aux objectifs fixés et de mettre en évidence les limites ainsi que les perspectives d'amélioration du système.

3.2 Conception et réalisation de la Balance :

La Conception de la balance électronique a été menée dans le but de développer un système de pesage à la fois précis, fiable et simple d'utilisation.

Cette étape a consisté à assembler l'ensemble des composants mécaniques et électroniques afin d'obtenir un dispositif fonctionnel répondant aux exigences définies lors de la phase de conception.

Sur le plan mécanique, une modélisation tridimensionnelle (3D) a été réalisée afin d'optimiser la répartition des charges appliquées sur la cellule de mesure et d'assurer la stabilité de l'ensemble du dispositif.

Le boîtier a également été conçu pour intégrer les différents modules électroniques tout en leur assurant une protection contre les contraintes extérieures, telles que les chocs, la poussière et les manipulations.

Sur le plan électronique, les jauges de contrainte sont montées en configuration de pont de Wheatstone afin de convertir les déformations mécaniques en un faible signal électrique.

Ce signal est ensuite conditionné et amplifié par le module HX711, qui intègre un amplificateur d'instrumentation et un convertisseur analogique-numérique haute résolution (24 bits), garantissant une acquisition précise des mesures.

Les données acquises sont traitées par le microcontrôleur ESP32, chargé du calcul de la masse, de la gestion des différentes fonctionnalités du système ainsi que de l'affichage des résultats.

Les mesures de poids et de température sont affichées en temps réel sur un écran OLED 128×64 , offrant une lecture claire et intuitive.

Afin de surveiller l'influence des variations thermiques sur les mesures, un capteur de température DS18B20 a été intégré au système.

Les informations fournies par ce capteur permettent d'évaluer la dérive thermique et de contribuer à l'amélioration de la stabilité des mesures.

L'alimentation du dispositif est assurée par une batterie rechargeable au lithium, associée à un module de charge TP4056 et à un convertisseur élévateur MT3608, garantissant une alimentation stable de l'ensemble des composants électroniques.

Après l'assemblage complet du système, plusieurs essais de fonctionnement ont été réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement des différents modules, la qualité des connexions électriques ainsi que la stabilité des mesures.

Cette phase de validation préliminaire constitue une étape essentielle avant la réalisation de l'étalonnage et l'évaluation expérimentale des performances de la balance, qui seront présentés dans la section suivante.

3.2.1 Le retro ingénierie d'une balance :

Le retro ingénierie, est un procédé technique qui consiste à analyser un objet, un système, un logiciel ou un composant afin de comprendre son fonctionnement interne, sa structure et les différentes étapes de sa conception.

La première étape de réalisation consiste à effectuer une analyse par rétro-ingénierie d'une balance électronique existante afin de comprendre son fonctionnement, son architecture interne et l'organisation de ses différents composants.

Cette étude permet d'identifier les solutions techniques utilisées et de définir les choix de conception pour la réalisation de notre propre système de pesage et de récupérer le capteur de poids pour utiliser dans les premières tests.



Figure 35 : Le retro ingénierie d'une balance.

La rétro-ingénierie a mis en évidence la présence d'une cellule de charge à jauges de contrainte, d'un module de conditionnement du signal, d'un microcontrôleur et d'un système d'affichage.

Ces résultats ont servi de référence pour la conception et la réalisation de la balance électronique développée dans ce projet.

3.2.2 Réalisation de la partie électronique :

La réalisation de la partie électronique de la balance de précision repose sur deux sous-systèmes principaux : une chaîne de mesure destinée à l'acquisition et au traitement du signal issu de la cellule de charge, et une chaîne d'alimentation assurant la gestion de l'énergie et l'alimentation des différents composants électroniques du prototype.

3.2.2.1 Testes et résultats :

Plusieurs essais ont été effectués dans FABLAB ISTA afin de vérifier avec une plaque d'essai son bon fonctionnement de chaque composant.

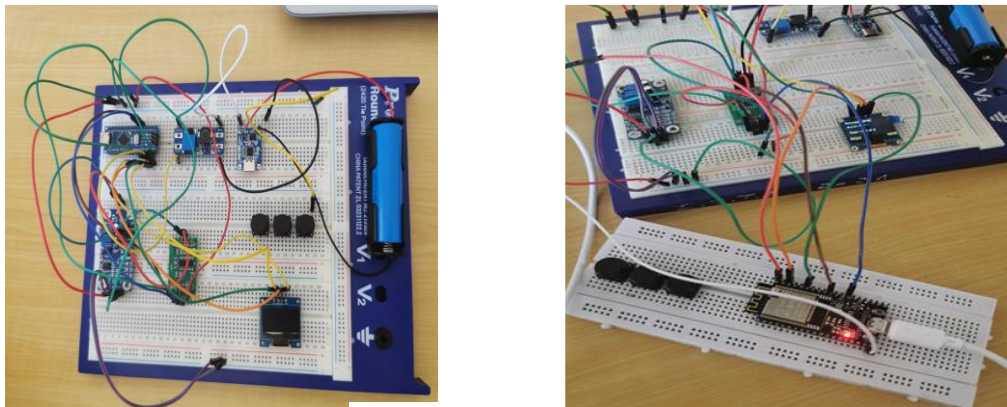


Figure 36 : Testes et essais.

Après l'étude par rétro-ingénierie, la cellule de charge récupérée à partir d'une balance existante a été testée afin d'évaluer ses performances.

La cellule a été connectée au module HX711, qui permet l'amplification et la conversion du signal analogique provenant du capteur, puis les données ont été traitées par la carte ESP32.

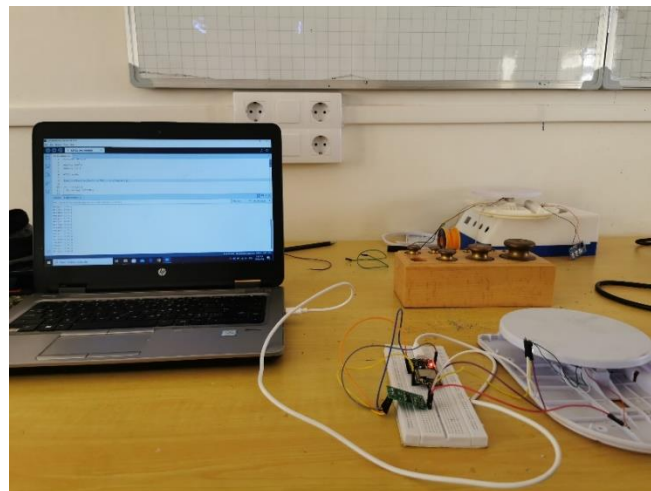


Figure 37 : Testes capteur de poids.

Cette étape a permis d'observer les valeurs de poids mesurées en utilisant les masses étalons classe M, de réaliser la calibration du système et d'analyser la précision obtenue avec ce type de capteur.



Figure 38 : Masses étalons Classe M.

Les résultats obtenus ont servi comme base pour le développement du prototype final, avec l'objectif d'améliorer la précision en utilisant par la suite des cellules de charge plus performantes et adaptées à une balance de haute précision.

Résultats :

1- Essai à vide :

L'essai à vide a l'objectif de vérifier le bon fonctionnement de la chaîne de mesure en l'absence de charge appliquée.

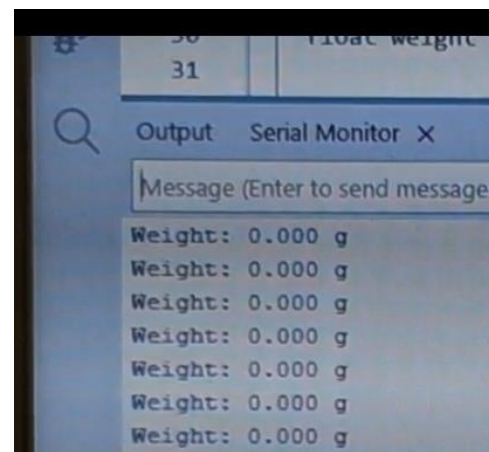
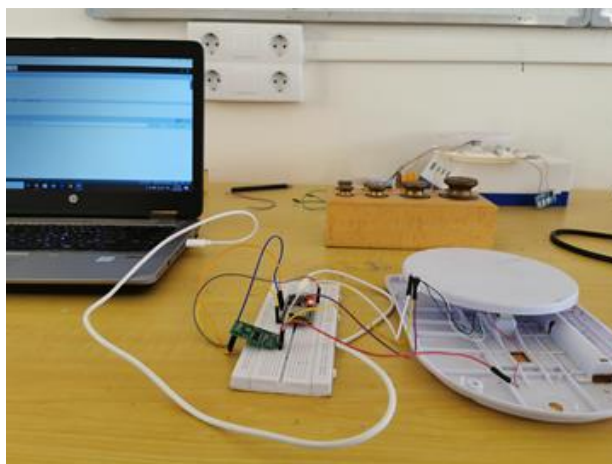


Figure 39 : Essai à vide.

Les valeurs affichées sur le moniteur série restent stables, ce qui traduit une bonne stabilité du signal délivré par la cellule de charge et le module HX711.

2- Essais avec masse étalon 100 g :

L'essai avec masse étalon de 100g permis de vérifier le bon fonctionnement chaîne de mesure en présence de charge appliquée.



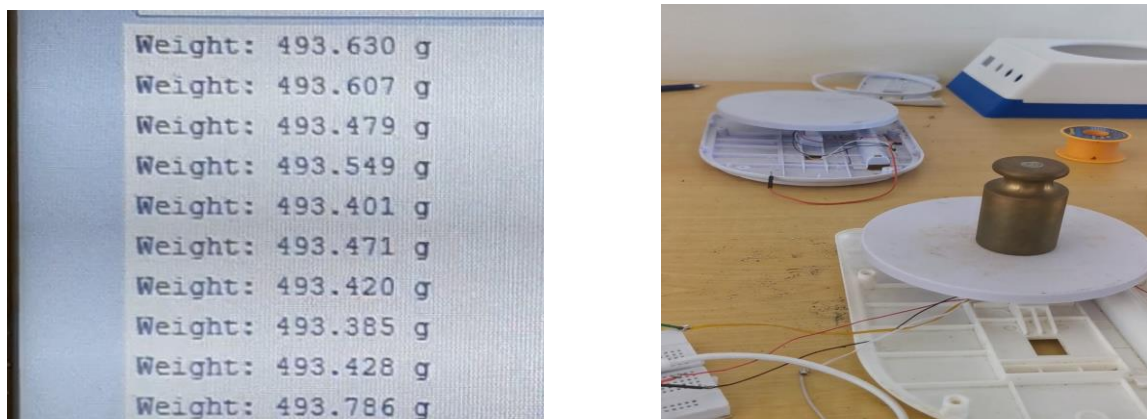
Figure 40 : Essais avec masse étalon 100 g.

Les résultats obtenus montrent que le système de pesage présente une bonne stabilité après la phase de stabilisation.

La première mesure (96,53 g) s'écarte des valeurs suivantes, ce qui peut être attribué au temps de stabilisation du capteur ou du module HX711 après l'application de la charge. Une fois le système stabilisé, les mesures varient entre 97,66 g et 97,77 g.

4- Essais avec masse étalon 500 g :

L'essai avec masse étalon de 500g permis de vérifier le bon fonctionnement chaîne de mesure en présence de charge appliquée.



Pour une charge d'en**Figure 41** : Essais avec masse étalon 500 g. isées entre 493,385 g et 493,786 g, ce qui traduit une bonne stabilité des mesures avec une faible dispersion (environ 0,40 g). Après le retrait de la charge, la balance revient à 0,000 g, confirmant le bon fonctionnement de la fonction de tare et l'absence de dérive significative.

3.2.2.2 Schéma de conditionnement et d'acquisition du signal de pesage :

En raison de l'indisponibilité de la machine CNC, nous n'avons pas pu imprimer la carte PCB. Nous avons donc procédé à sa fabrication manuelle, comme l'illustre la figure suivante.

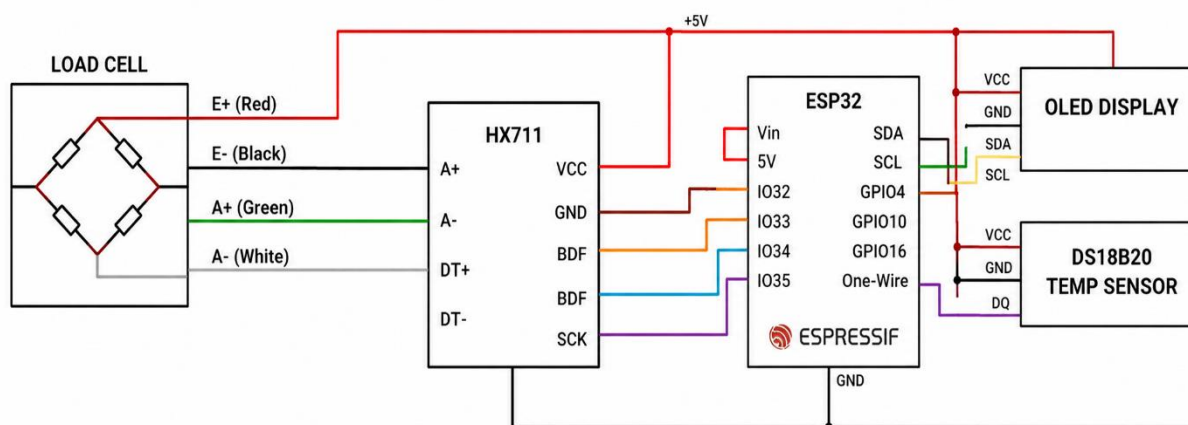


Figure 42 : Schéma de conditionnement et d'acquisition du signal de pesage.

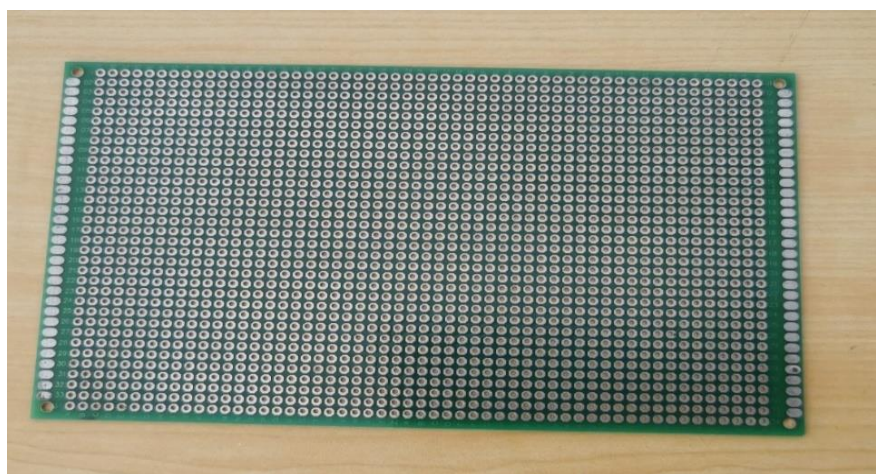


Figure 43 : Plaque PCB.

3.2.2.3 Schéma électronique d'alimentation :

La figure suivante montre le circuit de la carte d'alimentation. La batterie est connectée à un module de charge TP4056 pour la recharger, ainsi qu'à un convertisseur qui augmente la tension pour alimenter divers appareils.

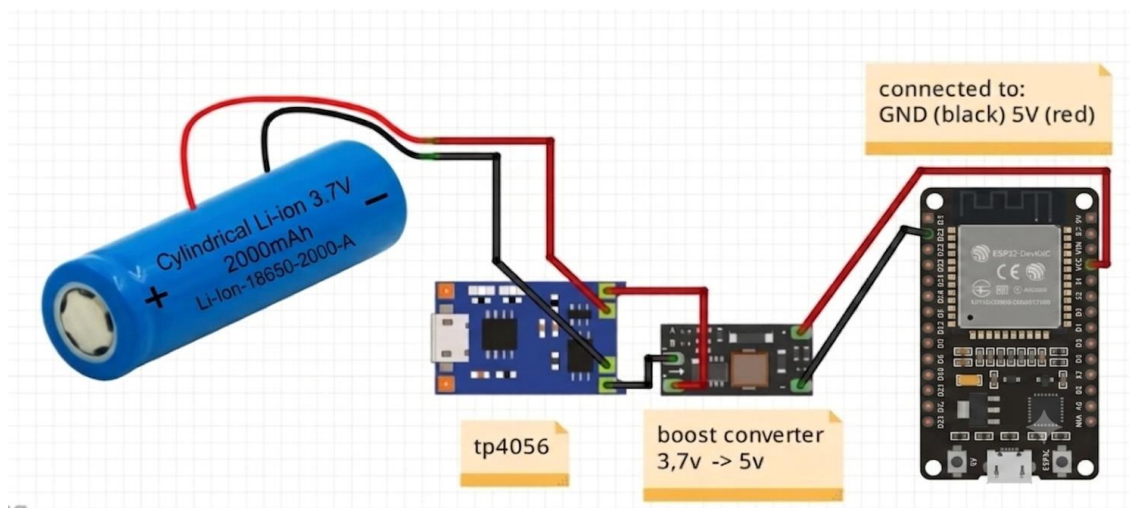


Figure 44 : Schéma d'alimentation simulation.

3.2.3 Réalisation et de Conception de prototype :

3.2.3.1 partie mécanique et modélisation 3D :

Pour la conception de la Balance, nous avons utilisé le logiciel Blender 5.1.

3.2.3.2 Définition de logiciel :

Blender 5.1 est un logiciel libre et open source de modélisation, d'animation et de conception 3D développé par la Blender Fondation. Il permet de créer, modifier et visualiser des modèles tridimensionnels destinés à diverses applications telles que la conception mécanique, l'animation, l'impression 3D et la visualisation de prototypes [25].

Dans ce projet, Blender 5.1 a été utilisé pour la modélisation 3D de la structure mécanique de la balance, permettant de vérifier l'intégration des différents composants et d'optimiser la conception avant la phase de fabrication.



Figure 45 : Logo logiciel Blender [25].

3.2.3.4 Conception 3D :

Blender 5.1 est un logiciel libre et open source de modélisation, d'animation et de conception 3D développé par la Blender Fondation.

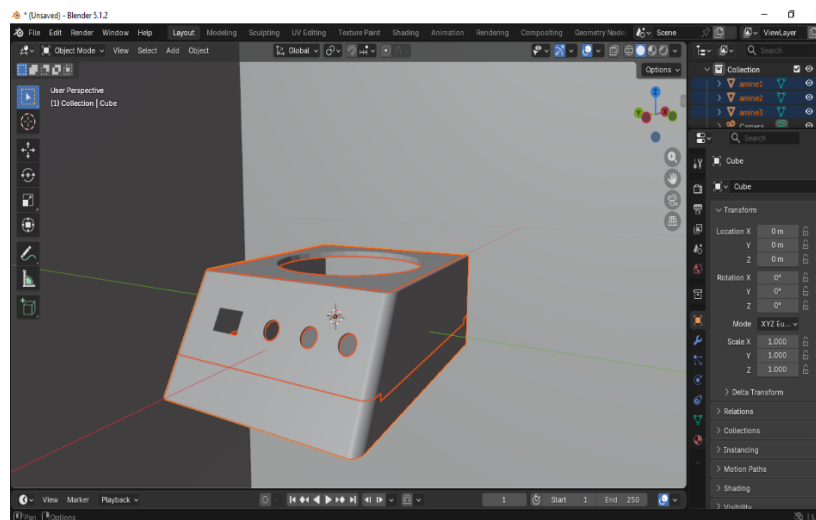


Figure 46 : Design 3D de la balance.

3.2.3.5 Impression 3D :

Les figures ci-dessous illustrent des représentations en 3D de la balance :

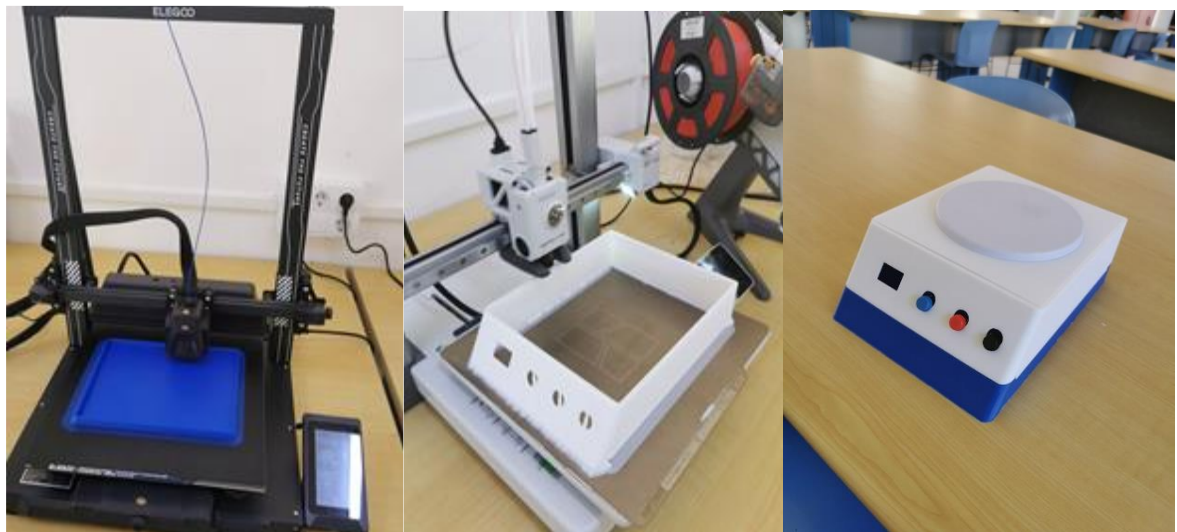


Figure 47 : Impression 3D.

3.3.1. Fonctionnement de la carte d'acquisition :

La carte d'acquisition constitue l'élément principal de traitement des informations issues de la cellule de charge.

Son rôle est de convertir les faibles variations électriques générées par le capteur en données numériques exploitables par le microcontrôleur.

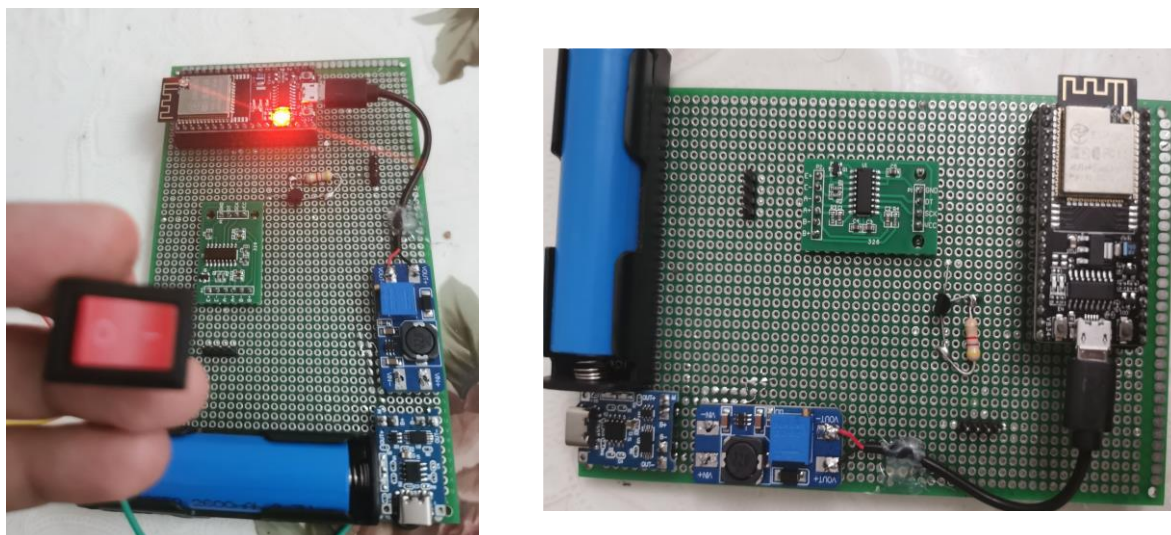


Figure 48 : La carte d'acquisition.

Lorsqu'une masse est appliquée sur le plateau de pesage, la cellule de charge se déforme légèrement, ce qui entraîne une variation de résistance des jauges de contrainte constituant le pont de Wheatstone.

Cette variation produit un signal électrique de très faible amplitude, généralement de l'ordre du millivolt.

Afin de rendre ce signal exploitable, il est amplifié par l'HK711, qui assure la conversion analogique-numérique avec une résolution élevée adaptée aux applications de pesage de précision.

Les données numériques obtenues sont envoyées à l'ESP32 qui effectue le traitement des mesures, l'application des coefficients de calibration ainsi que les calculs nécessaires à la détermination de la masse.

Le microcontrôleur récupère également les informations du capteur de température DS18B20 afin de surveiller les variations thermiques pouvant influencer la précision des mesures.

Enfin, les résultats sont affichés sur l'écran OLED, permettant à l'utilisateur de visualiser en temps réel la valeur de la masse mesurée ainsi que les informations complémentaires du système.

3.3.2 Essai et validation du capteur de température DS18B20 :

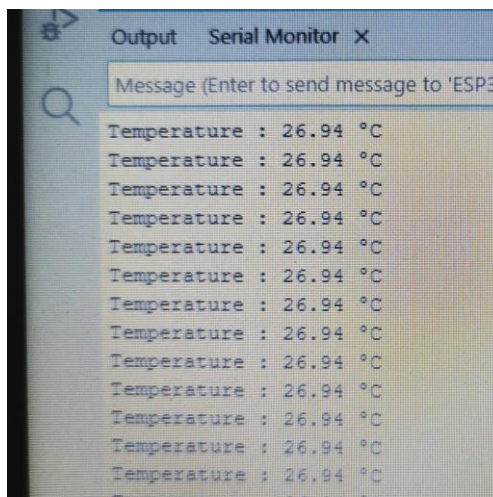
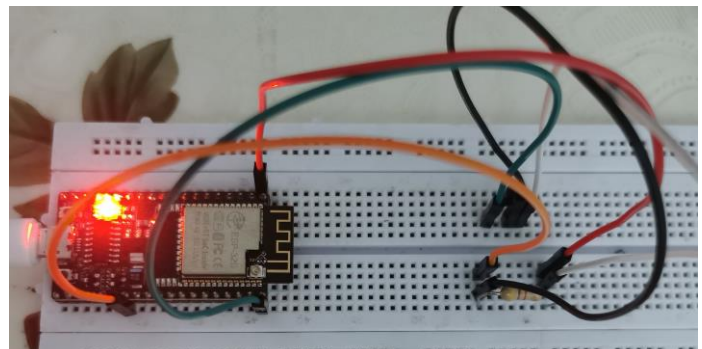
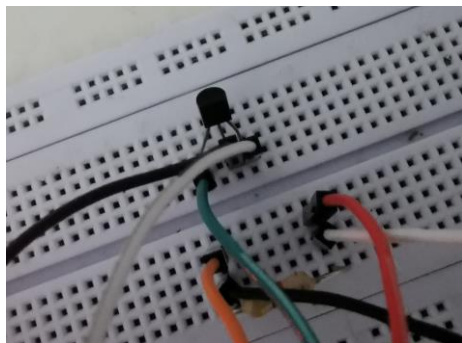
Un essai du capteur de température DS18B20 a été effectué afin de vérifier son bon fonctionnement et son intégration avec la carte ESP32.

Lors des tests, le DS18B20 a été connecté à l'ESP32 avec une résistance de tirage de 4,7 k Ω parce qu'il possède une sortie de type drain ouvert (open-drain).

Cela signifie qu'il peut uniquement mettre la ligne de données à l'état bas (0 V), mais ne peut pas la porter à l'état haut

La résistance de 4,7 k Ω joue donc le rôle de résistance de tirage. [26]

Les mesures de température ont été lues et affichées en temps réel sur le moniteur série de l'IDE Arduino.



```
DS18B20.ino
1  #include <OneWire.h>
2  #include <DallasTemperature.h>
3
4  #define ONE_WIRE_BUS 4 // GPIO utilisé
5
6  OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
7  DallasTemperature sensors(&oneWire);
8
9  void setup() {
10     Serial.begin(115200);
11     sensors.begin();
12
13     Serial.println("DS18B20 avec ESP32");
14 }
15
16 void loop() {
17     sensors.requestTemperatures();
18
19     float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
20
21     Serial.print("Temperature : ");
22     Serial.print(temperature);
23     Serial.println(" °C");
24
25     delay(1000);
26 }
```

Figure 49 : Essai et validation du capteur de température DS18B20.

Les résultats obtenus montrent une stabilité des valeurs autour de 27 °C avec de très faibles variations.

Cet essai a permis de vérifier le fonctionnement du capteur dans l'environnement du système et de confirmer sa compatibilité avec l'ESP32 pour une future intégration dans le projet global de la balance électronique.

3.3.2.1 Soudage Capteur DS18B20 :

Après avoir vérifié le bon fonctionnement du capteur DS18B20, celui-ci a été soudé sur la carte de circuit imprimé (PCB) afin d'assurer son intégration définitive au système.

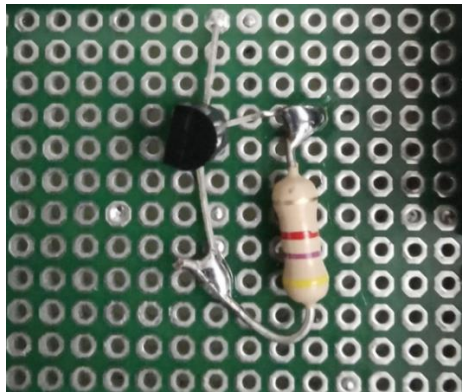


Figure 50 : Soudage Capteur DS18B20.

3.4 Collage et le soudage Jauges de contrainte :

3.4.1 Le matériel utilisé :

Cette opération nécessite l'utilisation du matériel suivant :

Colle, jauges, cellule de charge, pied à coulisse, fer à souder, étain.



Figure 51 : Le matériel utilisé.

3.4.2 Soudage et fixation :

Une partie mécanique a été récupérée à partir d'une balance électronique existante afin d'être utilisée comme support mécanique.

Cette structure métallique a servi de base pour le collage et le positionnement des jauges de contrainte de type HBM.

Ce choix permet de bénéficier d'un support déjà optimisé pour la mesure de déformation, assurant ainsi une bonne sensibilité et une meilleure stabilité mécanique.



Figure 52 : Soudage et fixation. Après avoir collé les deux jauges pour bien fixer tout ça.

Après avoir fixé les jauges, nous avons soudé les fils de connexion des jauges de contrainte.

3.4.2.1 Testes et essais des jauges HBM :

Les jauges de contrainte ont été caractérisées à l'aide d'un testeur multifonction afin de vérifier leur état et leur résistance électrique.

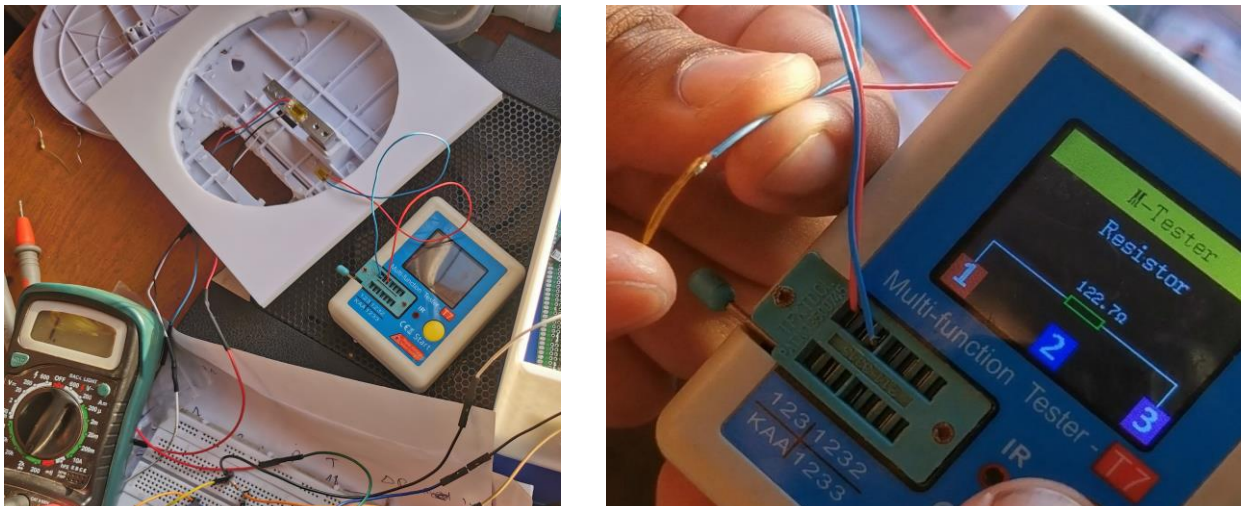


Figure 53 : Testes et essais des jauges.

Les mesures obtenues ont confirmé une résistance nominale d'environ $122,7 \Omega$, conforme à la valeur nominale de 120Ω du fabricant.

Ce test a permis de valider l'intégrité électrique des jauges avant leur montage et de

s'assurer qu'aucune anomalie, telle qu'une coupure ou un court-circuit, n'était présente. Afin de vérifier le fonctionnement des jauges de contrainte de $120\ \Omega$, des essais ont également été réalisés en les intégrant dans un pont de Wheatstone.

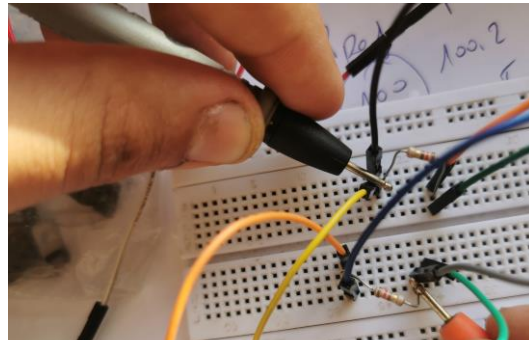


Figure 54 : Réalisation de pont de Wheatstone.

Les mesures obtenues ont montré que la variation de tension en sortie du pont restait très faible, en raison de la faible déformation de l'élément mécanique supportant les jauges.

Cette variation n'était pas suffisante pour garantir une mesure stable et précise avec la chaîne d'acquisition utilisée.

Pour cette raison, une cellule de charge commerciale compatible a été retenue pour la validation expérimentale du prototype.

3.4.2.2 Test de déformation des jauges de contrainte HBM :

Un second essai a été réalisé à l'aide d'un testeur multifonction afin d'observer la variation de la résistance des jauges de contrainte sous l'effet d'une déformation mécanique.

Les jauges ont été soumises à de faibles puis à de plus fortes déformations manuelles.

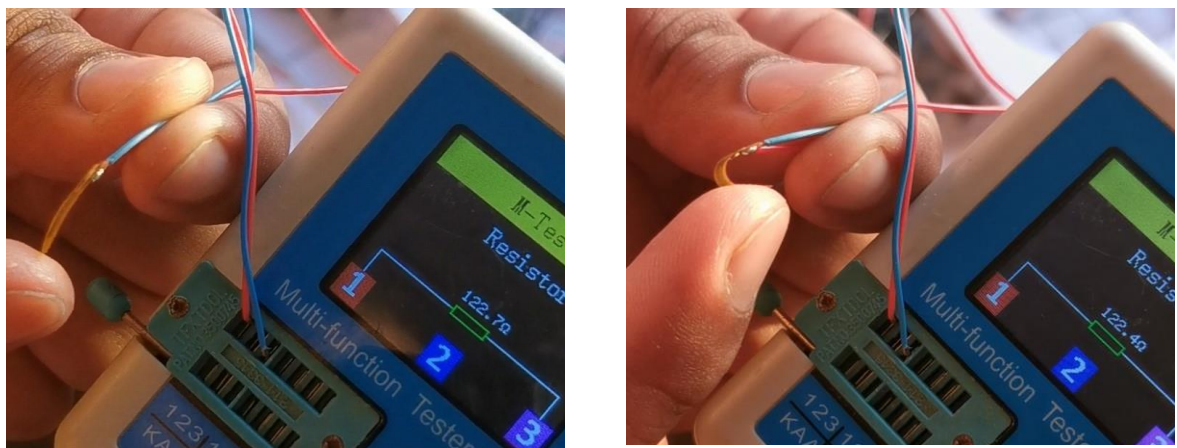


Figure 55 : Test de déformation des jauges de contrainte.

Les mesures ont montré que la variation de résistance restait très faible malgré l'augmentation de la déformation appliquée.

Ces résultats indiquent que les jauges testées ne permettaient pas d'obtenir une sensibilité suffisante pour les exigences de notre système de pesage de précision.

En conséquence, elles n'ont pas été retenues pour la réalisation de la cellule de charge du prototype.

3.4.2.3 Test de déformation des jauges de contrainte récupéré (Balance existant) :

Un essai de déformation a été réalisé sur les jauges de contrainte récupérées d'une balance électronique existante

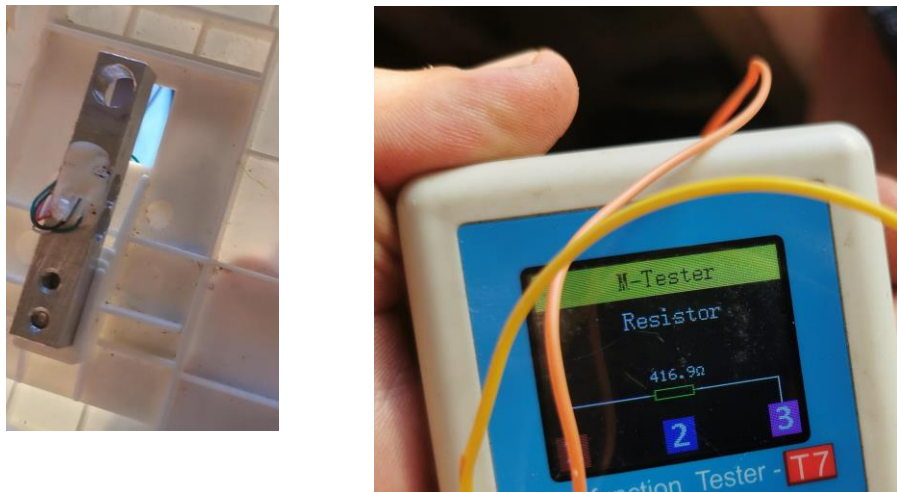


Figure 56 : Test de déformation des jauges de contrainte récupéré.

Les résultats obtenus ont montré une variation de résistance plus importante et cohérente lors de l'application d'une déformation mécanique, traduisant une meilleure sensibilité des jauges.

Cette bonne réponse a confirmé leur compatibilité avec la chaîne de mesure (HX711–ESP32) et a permis leur intégration dans le prototype. Les essais de pesage et les résultats expérimentaux présentés dans ce mémoire ont ainsi été réalisés à l'aide de cette cellule de charge.

3.4.3 Opération de soudage des composants électroniques :

3.4.3.1 Test d'intégration :

Le test d'intégration consiste à assembler les différents modules préalablement testés individuellement afin de vérifier leur bon fonctionnement en interaction au sein du système complet, les tensions d'alimentation ont été contrôlées à l'aide d'un multimètre afin de s'assurer de la stabilité de l'alimentation électrique.

Une tension de 4,86 V a été mesurée entre les broches VCC et GND de l'ESP32, tandis qu'une tension de 4,85 V a été relevée entre les bornes E+ et E- du module HX711, correspondant à la tension d'excitation appliquée à la cellule de charge.

Ces valeurs, très proches de la tension nominale de 5 V, confirment la bonne alimentation des différents modules et garantissent leur fonctionnement dans des conditions normales.

Cette étape permet de valider la communication entre les composants, d'assurer la cohérence des échanges de données et de confirmer le bon fonctionnement global de la balance électronique avant les essais de performance et d'étalonnage.

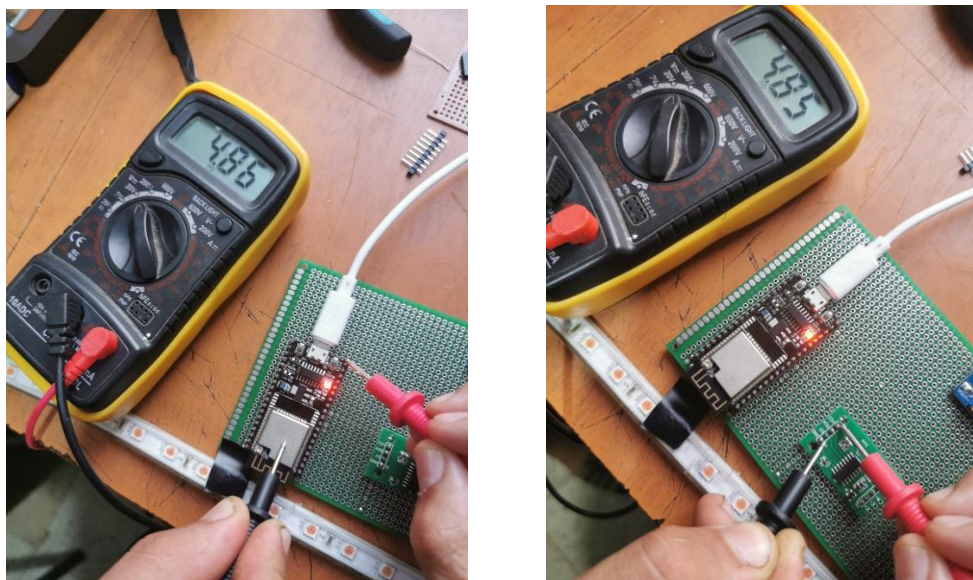


Figure 57 : Test d'intégration.

3.4.3.1 Soudage :

une étape de soudage a été réalisée afin d'assurer les connexions électriques définitives entre les différents éléments du système.

Cette opération consiste à fixer les fils et les composants électroniques sur la carte de prototypage en utilisant un fer à souder et de l'étain.

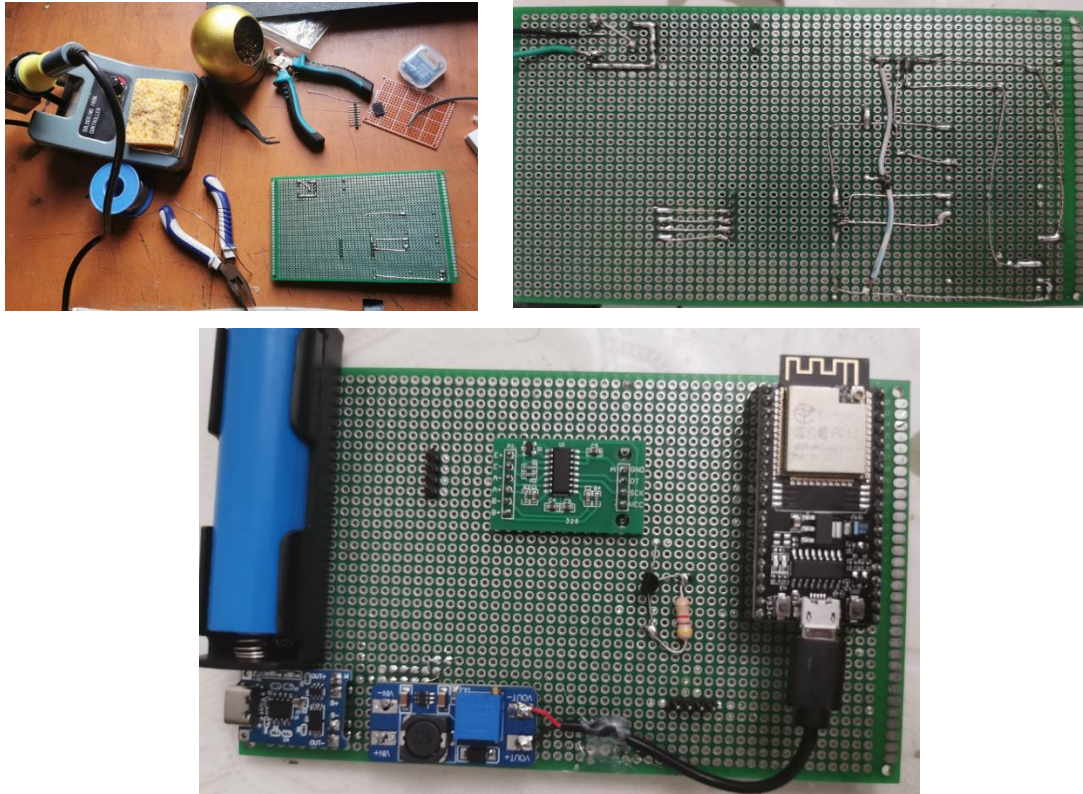


Figure 58 : Soudage.

3.4.4 Tests et résultats prototype :

1- Essai à vide : notre prototype affiche le poids et la température au même temps.

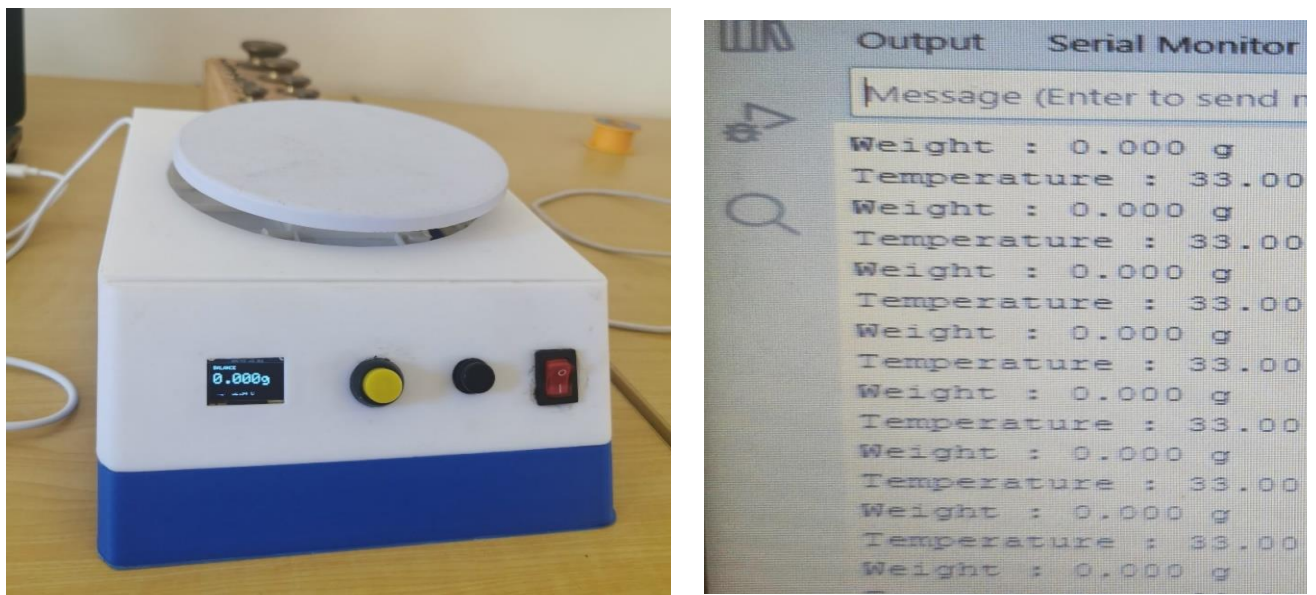


Figure 59 : Essai à vide.

Tableau de répétabilité essai à vide :

Tableau 7 : répétabilité essai à vide

Essai	Poids (g)	Température (°C)
1	0.000	33.00
2	0.000	33.00
3	0.000	33.00
4	0.000	33.00
5	0.000	33.00

En l'absence de toute charge sur le plateau, l'écran OLED affiche une valeur de 0,000 g, indiquant que la fonction de tare a été correctement exécutée et que le système est convenablement initialisé.

2- Petites masses étalons :

Les figures présentes les résultats obtenus lors de l'essai réalisé avec de petites masses étalons.

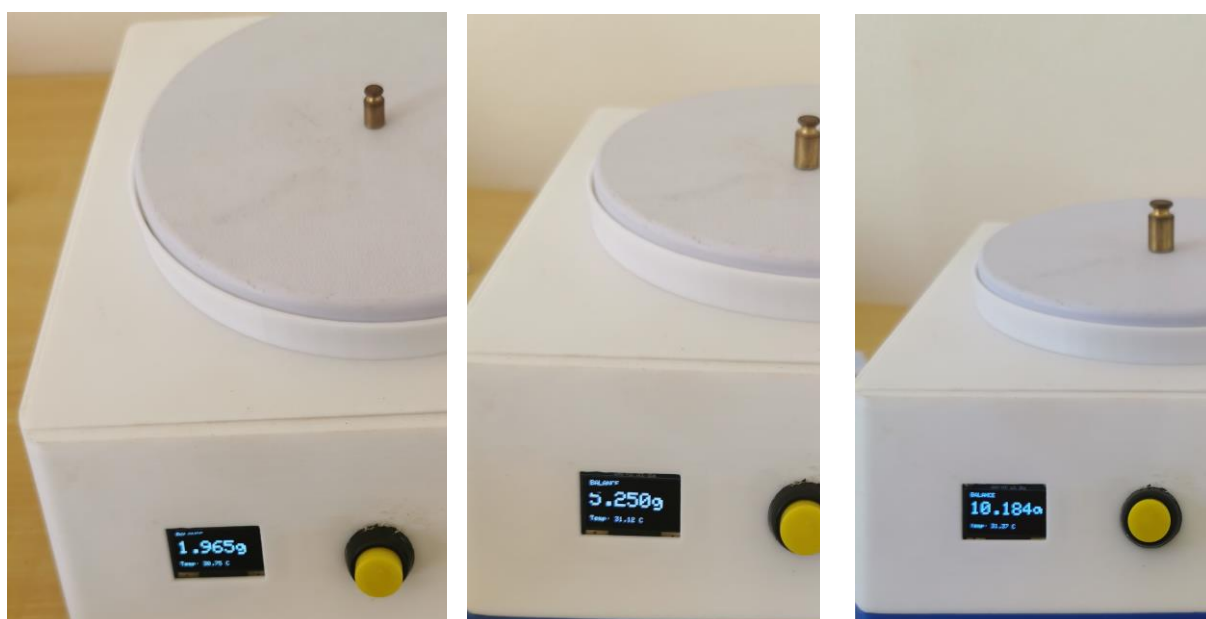


Figure 60 : Petite masses étalons.

Réalisation et analyse des résultats

Les valeurs affichées par la balance sont proches des masses de référence, ce qui met en évidence la capacité du système à mesurer avec précision de faibles masses.

3- Essai avec masse étalon 50g :

Les figures présentent les résultats des essais réalisés avec une masse étalon de 50 g sur le prototype développé.

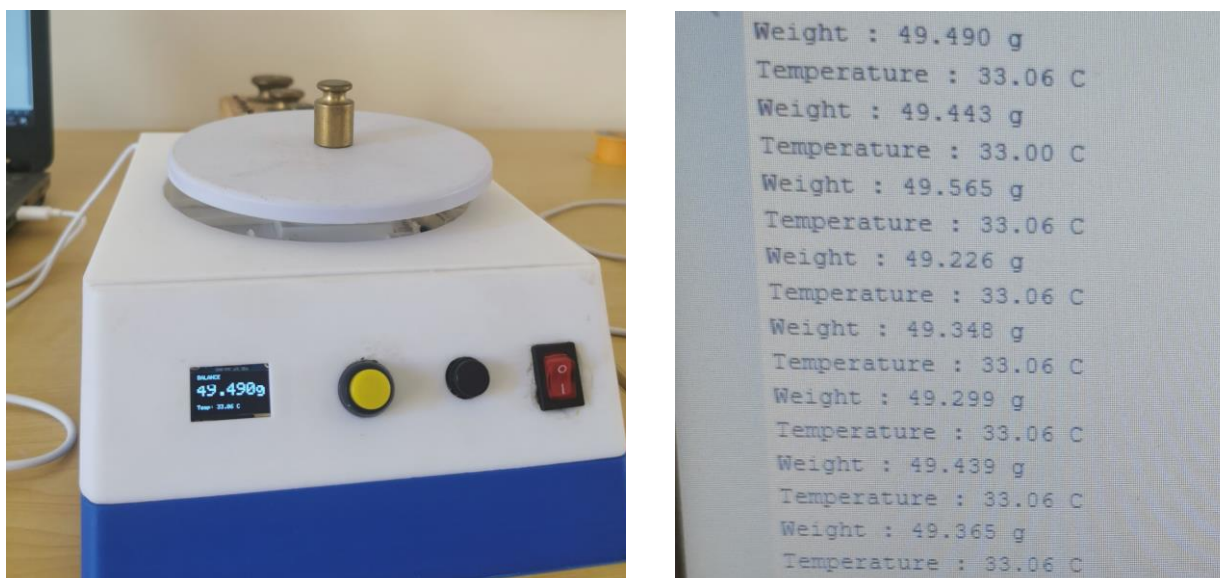


Figure 61 : Essai avec masse étalon 50g

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 50 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 50 g.

Tableau 8: répétabilité essai avec étalon de 50 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	49.490	33.06
2	49.443	33.00
3	49.565	33.06
4	49.226	33.06
5	49.348	33.06

Les résultats obtenus avec une masse étalon de 50 g montrent une bonne stabilité de la balance électronique.

Les valeurs mesurées sont comprises entre 49,226 g et 49,565 g, avec une masse moyenne de 49,414 g.

La dispersion des mesures reste limitée, ce qui traduit une bonne répétabilité du système.

4- Essai avec masse étalon 100g :

Les figures présentent les résultats des essais réalisés avec une masse étalon de 100 g sur le prototype développé.

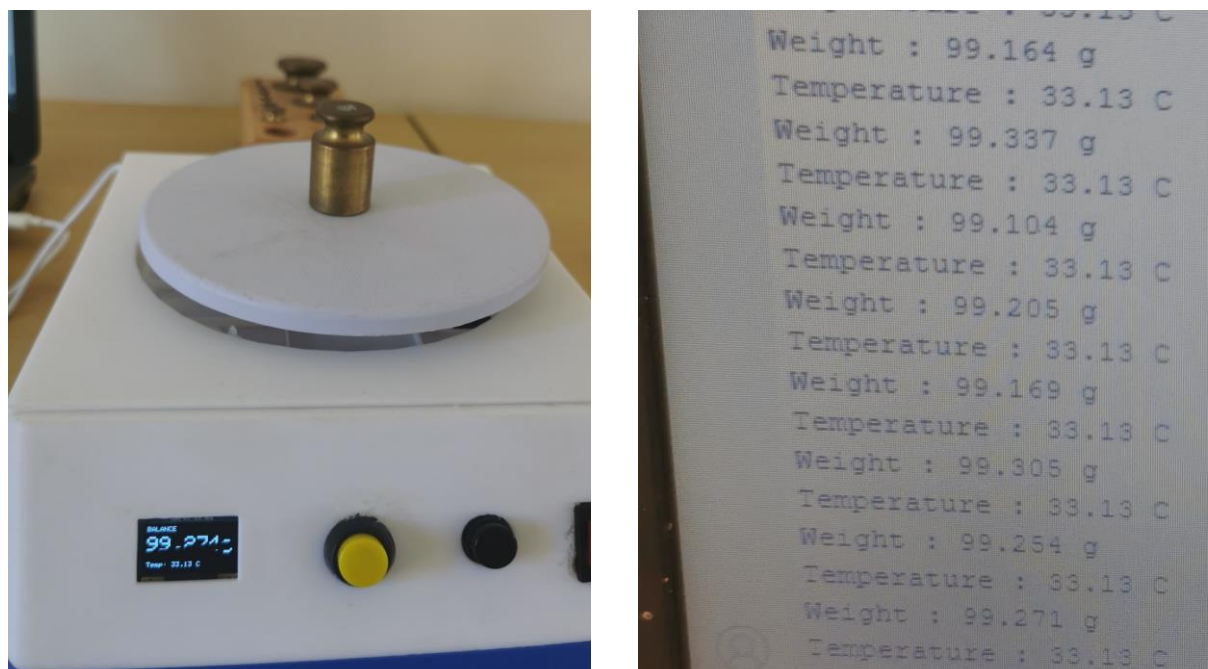


Figure 62 : Essai avec masse étalon 100g

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 100 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 100 g.

Tableau 9 : répétabilité essai avec étalon de 100 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	99.164	33.13
2	99.337	33.13
3	99.104	33.13
4	99.205	33.13
5	99.169	33.13

Les essais réalisés avec une masse étalon de 100 g montrent aussi une bonne stabilité des mesures fournies par la balance électronique.

5- Essai avec masse étalon 200g :

Les figures présentent les résultats des essais réalisés avec une masse étalon de 200 g sur le prototype développé.

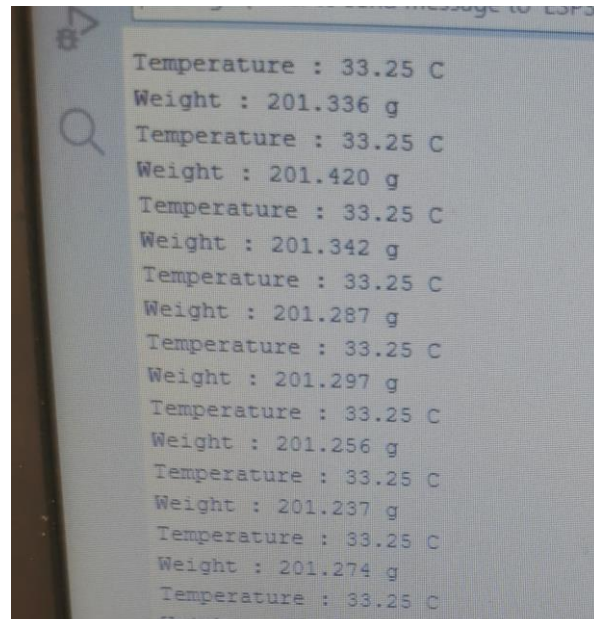


Figure 63 : Essai avec masse étalon 200g.

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 200 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 200 g.

Tableau 10 : répétabilité essai avec étalon de 200 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	201.336	33.25
2	201.420	33.25
3	201.342	33.25
4	201.287	33.25
5	201.297	33.25

Les essais effectués avec une masse étalon de **200 g** mettent en évidence une excellente stabilité des mesures de la balance électronique.

6- Essai avec masse étalon 300g :

Les figures présentent les résultats des essais réalisés avec une masse étalon de 300 g sur le prototype développé.

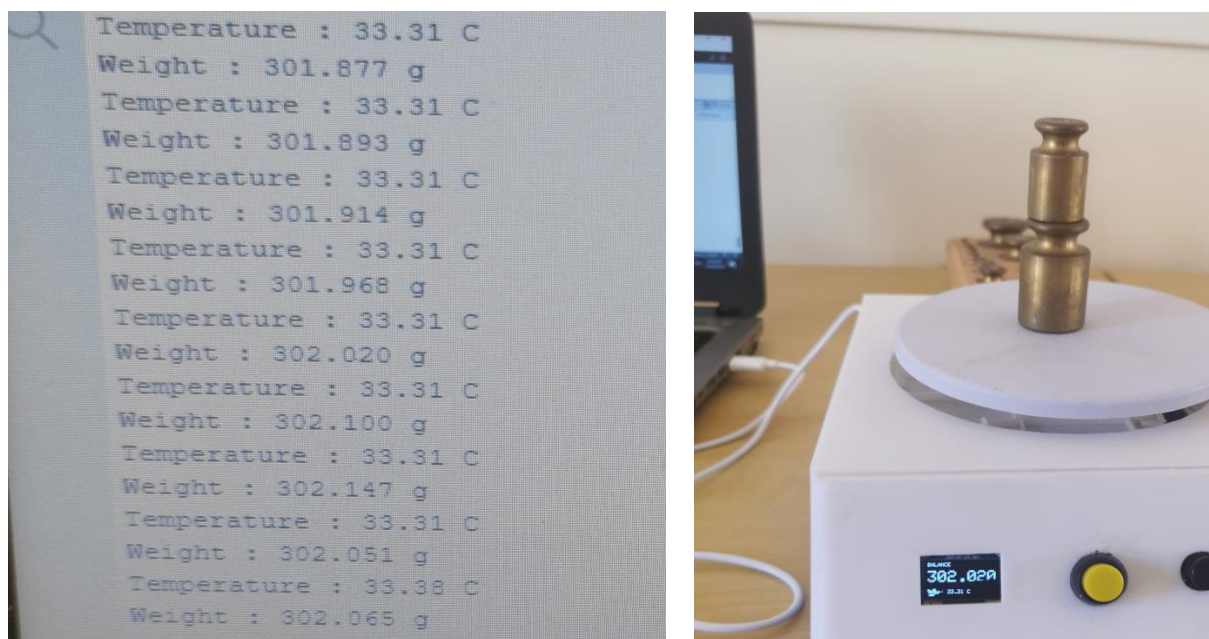


Figure 64 : Essai avec masse étalon 300g.

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 300 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 300 g.

Tableau 11 : répétabilité essai avec étalon de 300 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	301.877	33.31
2	301.893	33.31
3	301.914	33.31
4	301.969	33.31
5	302.020	33.31

Les résultats obtenus avec la masse étalon de 300 g montrent que la balance électronique fournit des mesures régulières et proches à l'étalon.

7- Essai avec masse étalon 500g :

Les figures présentent les résultats des essais réalisés avec une masse étalon de 500 g sur le prototype développé.



Figure 65 : Essai avec masse étalon 500g.

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 500 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 500 g.

Tableau 12 : répétabilité essai avec étalon de 500 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	503.722	33.38
2	503.626	33.44
3	503.644	33.44
4	503.557	33.44
5	503.681	33.44

L'essai réalisé avec la masse étalon de 500 g met en évidence un fonctionnement stable de la balance électronique.

8- Essai avec masse étalon 800g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse



Figure 66 : Essai avec masse étalon 800g.

Tableau de répétabilité essai avec étalon de 800 g :

Le tableau présente les résultats de cinq mesures successives réalisées avec une masse étalon de 800 g.

Tableau 13 : répétabilité essai avec étalon de 800 g

N° mesure	Poids (g)	Température (°C)
1	805.626	33.50
2	805.793	33.50
3	805.773	33.50
4	805.625	33.50
5	805.755	33.50

Les résultats obtenus avec la masse étalon de 800 g montrent l'écart entre la masse mesurée et la masse nominale est plus important que pour les faibles masses étalons. Cette augmentation de l'erreur avec la charge appliquée peut s'expliquer par les limites de linéarité de la cellule de charge

3.4.4.1 Control de justesse (résultats Valeurs moyennes) :

Le tableau présente les résultats du contrôle de la justesse.

Tableau 14 : Control de justesse

Mass Appliqué (g)	Poids affiché (g)	Température (°C)
50 g	49.490 g	33.06 °C
100 g	99.247 g	33.16 °C

Réalisation et analyse des résultats

200 g	201.203 g	33.27 °C
300 g	302.050 g	33.35 °C
500 g	503.443 g	33.44 °C
800 g	805.750 g	33.53 °C

Le contrôle de la justesse a été réalisé en comparant les valeurs mesurées aux masses étalons de référence.

Après chaque mesure, la fonction tare a été activée afin de remettre la balance à zéro avant l'application de la masse suivante.

Cette procédure permet d'éliminer toute charge résiduelle, de garantir des conditions de mesure identiques pour chaque essai et d'améliorer la fiabilité ainsi que la justesse des résultats obtenus.



Figure 67 : Option TARE.

3.4.4.2 Test de fidélité :

Afin d'évaluer la fidélité du système de pesage réalisé, un test de répétabilité a été effectué en appliquant différentes charges correspondant à une partie de la capacité maximale de la balance.

Des masses égales ou supérieures au tiers de la capacité maximale 800g ont été utilisées afin de vérifier le comportement du système dans différentes conditions de charge.

Pour chaque masse appliquée, cinq mesures successives ont été réalisées dans les mêmes conditions expérimentales.

- 5 mesures avec masse étalons de 500g :

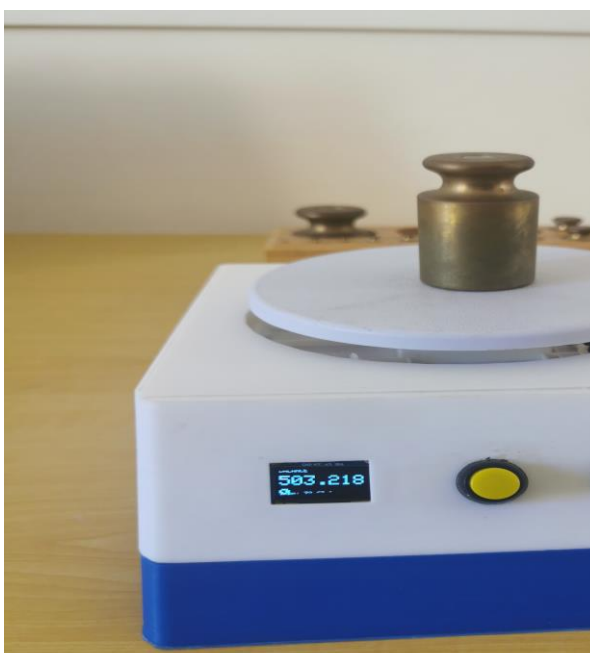




Figure 68 : Teste de fidélité

Les résultats obtenus montrent une faible dispersion entre les mesures, ce qui confirme la stabilité, la répétabilité et la bonne fidélité du système de mesure.

Réalisation et analyse des résultats

FORMULAIRE		CODE :	EN/PT/48
FEUILLE BRUTE D'ÉTALONNAGE D'IPFNA		VERSION :	01
		DATE :	14/07/2025
		PAGE :	1/1
1 - INFORMATIONS CLIENT			
NOM DE CLIENT :	ISTA		
2 - INFORMATIONS DU CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE			
N° DU CERTIFICAT :	1	DATE D'ÉTALONNAGE :	22-06-2026
RÉALISER PAR :	MERZAK	PÉRIODICITÉ :	12 mois
3 - INFORMATIONS DE L'ÉQUIPEMENT ÉTALONNER :		vérification avant ajustement :	
DÉSIGNATION :	Balance de Précision		Note : à remplir si un ajustage de l'IPFNA a été effectué avant étalonnage
INSTRUMENT :	PRECISION TECK		
CONSTRUCTEUR :			CHARGE APPLIQUÉE
MODÈLE/TYPE :			VALEURS MESURÉES IPFNA
N° SÉRIE :			
N° IDENTIFICATION :			
TYPE D'AFFICHAGE :	Numérique : ☒	Analogique : ☐	
4 - CARACTERISTIQUES DE L'ÉQUIPEMENT ÉTALONNER :			
UNITÉ DE MESURE :	g	CLASSE :	11 ☐ selon OIML R76-1
ÉTENDUE DE MESURE :	0 - 800g	INDICATION À VIDE :	0.000g
RÉSOLUTION (d) :	0.001	Coefficient T° en ppm/°C :	
ECHÉLON (e) :	0.01 ☐ selon OIML R76-1	Qualification initiale de l'IPFNA :	Oui ☐ Non ☐
PORTÉE MINIMALE :	1g ☐ selon OIML R76-1	INDICATEUR DE NIVEAU :	Avec ☐ Sans ☒
5 - CONDITIONS AMBIANTE :		Procédure :	
Thermohygromètre utilisé ID :		PR/PT/12	
temp - D518B20		temps de début : 33.06°C	
		temps de fin : 33.53°C	
6 - RESULTATS DES MESURES			
CONTROLE DE JUSTESSE :			CONTROLE DE FIDÉLITÉ :
IDENTIFICATION DE LA MASSE(S) APPLIQUÉE	CHARGE NOMINALE	VALEURS MESURÉES IPFNA	CONTRÔLE D'EXENTRATION :
L7-67	2g	1.965g	CHARGE APPLIQUÉE 1/3FS ou plus
/	5g	5.250g	Excentration est négligeable ?
/	10g	10.385g	OUI ☐ NON ☒
/	20g	20.398g	IDENTIFICATION DE LA MASSE(S) APPLIQUÉE
/	50g	49.490g	500g
/	100g	99.247g	Nombre de répétitions :
/	200g	201.203g	5 / 3
/	300g	302.105g	VALEURS MESURÉES IPFNA
/	500g	503.443g	1 503.722 C
/	800g	805.750g	2 503.626 1
			3 503.644 2
			4 503.557 3
			5 503.481 4

Figure 69 : Brut d'étalonnage.

Réalisation et analyse des résultats

FEUILLE BRUTE D'ÉTALONNAGE					
1 – INFORMATIONS CLIENT					
Nom du client :	ISTA				
2 – INFORMATIONS DU CERTIFICAT D'ÉTALONNAGE					
N° du Certificat :	1	Date d'étalonnage :	22-06-2026		
Réalisé par :	MERZAK	Périodicité :	12 mois		
3 – INFORMATIONS DE L'ÉQUIPEMENT ÉTALONNÉ					
Désignation :	Balance de Précision				
Constructeur :	Precision Teck				
Modèle / Type :	—				
N° Série :	—				
N° Identification :	—				
Type d'affichage :	Numérique				
4 – CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉQUIPEMENT ÉTALONNÉ					
Unité de mesure :	g	Classe :	II		
Étendue de mesure :	0 – 800 g	Indication à vide :	0.000 g		
Résolution (d) :	0.001	Efficient T° (ppm/°C)	—		
Échelon (e) :	0.01	Portée minimale :	18		

Figure 70 : Brut d'étalonnage fichier Excel.

6 – RÉSULTATS DES MESURES				
CONTRÔLE DE JUSTESSE				
ID Masse	Charge Nominale (g)	Valeur Mesurée (g)	Erreur Absolue (g)	Erreur relative (%)
LI-67	2	1,965	-0,0350	-1,7500
—	5	5,25	0,2500	5,0000
—	10	10,385	0,3850	3,8500
—	20	20,398	0,3980	1,9900
—	50	49,49	-0,5100	-1,0200
—	100	99,247	-0,7530	-0,7530
—	200	201,203	1,2030	0,6015
—	300	302,105	2,1050	0,7017
—	500	503,443	3,4430	0,6886
—	800	805,75	5,7500	0,7188
		Erreur max abs (g) ↑	5,7500	

Figure 71 : Résultat de mesures contrôle de justesse.

42			
43	CONTRÔLE DE FIDÉLITÉ (Charge 50%FS ≈ 500 g)		
44	Répétition	Valeur Mesurée (g)	Ecart à la Moyenne (g)
45	1	503,722	0,116
46	2	503,626	0,020
47	3	503,644	0,038
48	4	503,557	-0,049
49	5	503,481	-0,125
50	Moyenne (g)	503,6060	
51	Écart-type (g)	0,0913	
52	Étendue / Range (g)	0,2410	
53	Min (g)	503,4810	
54	Max (g)	503,7220	
55			

Figure 72 : Résultats de mesures contrôle de fidélité

4.5 Influence de la température sur la dérive de mesure :

En effet, les variations de température peuvent modifier légèrement les caractéristiques mécaniques de la cellule de charge ainsi que la résistance des jauges de contrainte, ce qui peut entraîner une variation du signal mesuré même lorsque la masse appliquée reste constante.

1) Calcul de la dérive avec la variation de température

On calcule d'abord la variation du poids mesuré :

$$DW = W_{max} - W_{min} \dots\dots\dots(18)$$

Ensuite, on calcule la variation de température :

$$DT = T_{max} - T_{min} \dots (23)$$

Puis la dérive thermique :

$$DT = DW_{max}/T_{max} \dots\dots\dots (19)$$

L'unité obtenue est : g/ ° C

4.5.1 Calcul de la dérive thermique :

Le tableau présente le calcul de la dérive thermique.

Tableau 15 : Calcul de la dérive thermique

Masse appliquée (g)	Poids mesuré moyen (g)	Température moyenne (°C)	Δ Poids (g)	ΔT (°C)	Dérive thermique (g/°C)
50	49.40	33.06	—	—	—
100	99.25	33.16	0.15	0.10	1.50
200	201.30	33.27	0.18	0.11	1.64
300	302.05	33.35	0.75	0.08	9.38
500	503.50	33.44	1.45	0.09	16.11
800	805.75	33.53	2.25	0.09	25.00

Tableau 16 : Essais de comparaison masse étalon 100g lorsque la température augmente

Moment	Température (°C)	Poids mesuré (g)	Δ Poids (g)
Matin	25	101.501	0.000
Midi	30	102.135	+0.634
Après-midi	35	103.403	+1.902
Soir	28	101.908	+0.407
Nuit	22	101.102	-0.399

Le tableau présente l'évolution du poids mesuré en fonction de la température à différents moments de la journée.

Les résultats montrent une légère augmentation de la valeur mesurée lorsque la température s'élève.

Ces observations mettent en évidence l'influence de la température sur les mesures de la balance.

Toutefois, les variations restent limitées et peuvent être prises en compte lors de l'étalonnage ou de la compensation thermique afin d'améliorer la précision du système.

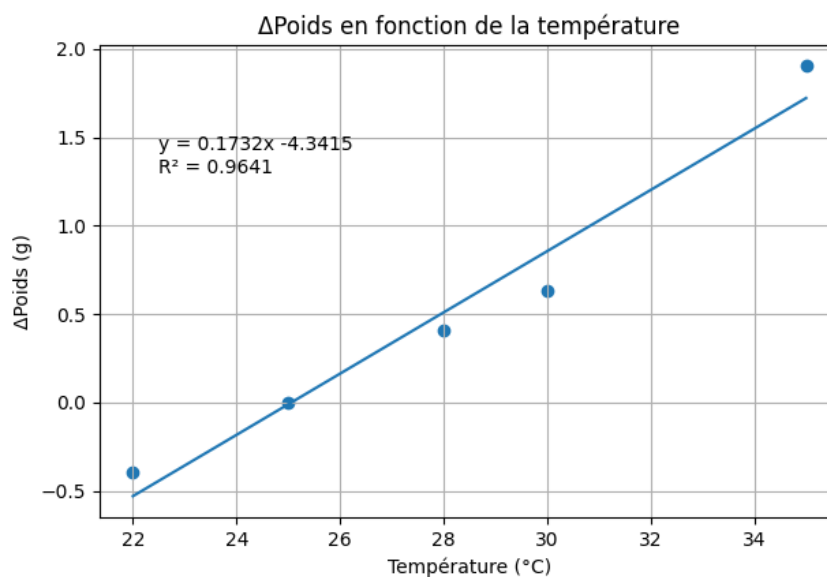


Figure 73 : ΔPoids en fonction de T.

La courbe montre une augmentation quasi linéaire de ΔPoids avec la température. Cette tendance met en évidence l'influence de la température sur la précision de la balance et permet d'évaluer sa dérive thermique.

La valeur R^2 indique que 87,89 % de la variation du poids mesuré est expliquée par la variation de la température.

Cette valeur élevée montre une forte corrélation entre la température et la dérive du système de pesage.

4.5.2 Tableau des erreurs de mesures :

Le tableau présente les erreurs de mesures.

Tableau 17 : Les erreurs de mesures

Masse réelle (g)	Masse mesurée moyenne (g)	Erreur absolue (g)	Erreur relative (%)
50	49.40	-0.60	-1.20 %
100	99.25	-0.75	-0.75 %
200	201.30	+1.30	+0.65 %
300	302.05	+2.05	+0.68 %
500	503.50	+3.50	+0.70 %
800	805.75	+5.75	+0.72 %

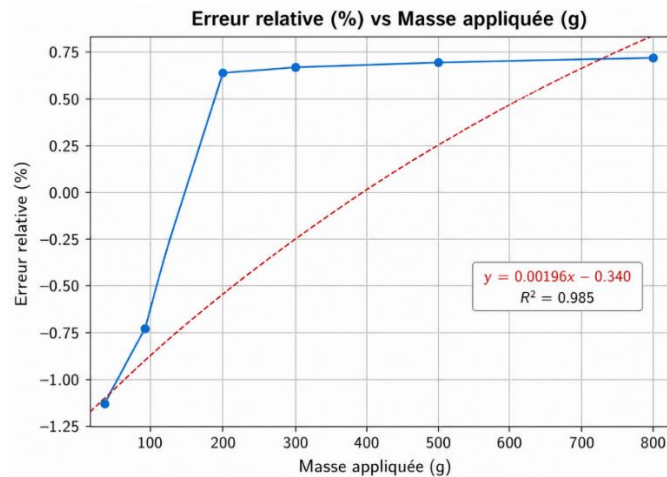


Figure 74 : graphique d'erreur relative (%) en fonction de la masse appliquée.

L'erreur est plus élevée à faible masse (50 g) → sensibilité du capteur faible en bas de gamme.

- À partir de 200 g, l'erreur devient quasi stable (~0.65 à 0.72%).
- Le système présente donc une bonne linéarité globale.
- Le comportement est typique des balances à cellule de charge + HX711.

Le système montre une précision satisfaisante sur toute la plage de mesure, avec une légère amélioration de la stabilité lorsque la charge augmente.

L'erreur relative reste inférieure à 1%, ce qui valide la performance de la balance développée pour des applications de pesage de précision.

4.5.3 Interprétation :

Le graphique présente l'évolution de l'erreur relative en fonction de la masse appliquée.

- L'erreur reste inférieure à 1% dans presque tous les cas
- Le système est donc globalement précis et linéaire.

a. Performances du système :

Les essais expérimentaux réalisés avec différentes masses étalons ont permis d'évaluer les performances de la balance électronique développée.

Les résultats montrent une bonne répétabilité des mesures, caractérisée par une faible dispersion entre les différentes acquisitions effectuées pour une même charge.

Le système présente également une réponse stable, avec un retour correct au zéro après la fonction de tare et un affichage fiable des valeurs mesurées. La mesure de la

température à l'aide du capteur DS18B20 a permis de vérifier que les essais ont été réalisés dans des conditions thermiques quasi constantes.

b. Avantages du système :

Le dispositif développé se distingue par sa simplicité de conception, son faible coût et sa facilité de mise en œuvre.

L'association de la cellule de charge, du module HX711 et du microcontrôleur ESP32 permet d'obtenir une bonne résolution de mesure tout en assurant un traitement rapide des données.

L'intégration de l'écran OLED offre un affichage clair des résultats, tandis que la fonction de tare améliore la facilité d'utilisation de la balance.

c. Justification des résultats :

Les faibles fluctuations observées entre les mesures successives confirment la bonne stabilité de la chaîne de mesure.

En revanche, un écart entre les masses mesurées et les masses nominales apparaît et tend à augmenter lorsque la charge appliquée devient plus importante.

Ce comportement peut être attribué au facteur d'étalonnage utilisé, aux caractéristiques de linéarité de la cellule de charge, aux tolérances du module HX711 ainsi qu'aux conditions mécaniques de montage.

Malgré ces écarts, les mesures restent cohérentes et reproductibles.

d. Limites du système :

Le prototype présente certaines limites susceptibles d'affecter l'exactitude des mesures.

L'étalonnage a été réalisé dans des conditions expérimentales et pourrait être optimisé sur une plage de masses plus étendue afin d'améliorer la précision.

Par ailleurs, bien que la cellule de charge utilisée possède une capacité nominale de 10 kg, l'objectif de ce projet était de concevoir une balance offrant une bonne précision pour des masses allant jusqu'à 800 g.

L'utilisation d'une cellule de charge de grande capacité réduit la sensibilité aux faibles charges, ce qui peut entraîner une augmentation de l'erreur de mesure lorsque l'on recherche une précision élevée sur une faible plage de pesée.

Enfin, les performances du système peuvent être influencées par des facteurs externes tels que les vibrations, la répartition de la charge sur le plateau ou les variations importantes de température. Ces limitations constituent des pistes d'amélioration pour les développements futurs du dispositif.

4.6 Conclusion :

Ce chapitre a présenté les différentes étapes de la réalisation pratique de la balance électronique, depuis la conception matérielle jusqu'à l'intégration des différents modules du système.

Il a notamment décrit la mise en œuvre de la carte l'ESP32, du module HX711, de la cellule de charge à jauges de contrainte, du capteur de température DS18B20, ainsi que du système d'affichage OLED.

La réalisation de l'alimentation et l'adaptation de la structure mécanique ont également permis d'assurer le bon fonctionnement de l'ensemble du prototype.

Les essais réalisés ont confirmé le bon fonctionnement des différents composants, leur intégration ainsi que la fiabilité de la chaîne d'acquisition et de traitement des données.

Toutefois, la réalisation de la cellule de charge conçue initialement n'a pas pu être menée à son terme en raison de contraintes matérielles liées aux jauges de contrainte disponibles.

Afin de valider le prototype, une cellule de charge compatible récupérée d'une balance électronique a été utilisée, permettant de réaliser les essais expérimentaux, l'étalonnage et l'évaluation des performances du système.

Dans l'ensemble, les résultats obtenus confirment la faisabilité de la solution proposée et constituent une base solide pour les essais métrologiques, l'optimisation du système et le développement de futures améliorations.

Chapitre 4 : Étude Économique

4.1 Introduction :

La recherche économique constitue un élément essentiel lors de la réalisation de ce projet car elle offre l'opportunité d'évaluer la faisabilité économique et financière de la solution proposée.

Cette phase implique une analyse des divers aspects concernant les ressources nécessaires, les coûts, le rendement du projet.

En ce qui concerne la création d'une balance intelligente de précision, l'objectif de la recherche sera la révélation des coûts de production, la détermination des performances du produit ainsi que l'étude des perspectives de développement de l'objet sur le marché.

4.2 Premier axe : Présentation du projet

4.2.1 L'idée de projet (la solution proposée) :

Dans le cadre de ce projet, l'idée consiste à concevoir et réaliser une balance électronique de précision intelligente permettant de mesurer des masses avec une grande précision grâce à une cellule de charge associée à un module HX711 et une carte ESP32.

La solution proposée vise à remplacer les balances classiques par un système connecté capable de :

1. Mesurer le poids avec précision ;
2. Afficher les valeurs mesurées en temps réel ;
3. Traiter les données obtenues par le microcontrôleur ESP32 ;
4. Améliorer la fiabilité des mesures grâce à un système de calibration ;
5. Proposer une solution économique et personnalisable adaptée aux besoins de la métrologie.

Le système est composé principalement de :

1. Une cellule de charge pour la conversion de la force en signal électrique ;
2. Un amplificateur et convertisseur HX711 pour l'acquisition des données ;
3. Une carte ESP32 pour le traitement et la communication ;
4. Un écran d'affichage pour la visualisation des résultats ;
5. Une structure mécanique conçue pour assurer la stabilité de mesure.

4.2.2 Les valeurs suggérées :

Les valeurs proposées pour le développement de la balance sont :

Tableau 18 : Les valeurs suggérées

Paramètre	Valeur proposée
Capacité maximale	800 g
Résolution	0,001 g
Type de capteur	Cellule de charge
Convertisseur	HX711 24 bits
Unité de mesure	Gramme (g)
Microcontrôleur	ESP32
Affichage	LCD/OLED
Alimentation	5V / USB
Communication	WiFi / Bluetooth (ESP32)
Fonction calibration	Oui
Traitement des données	ESP32
Structure	Boîtier imprimé en 3D

4.2.3 L'équipe :

La réalisation du projet est assurée par une équipe ayant pour rôle de développer une solution innovante dans le domaine de la métrologie et des systèmes embarqués.

Tableau 19 : L'équipe

Membre	Rôle
MERZAK M	Étudiant en Master 2 instrumentation et métrologie et participant dans le mécanisme 1275 Incubateur Université Oran 1
Dr A GOURBI	Encadrant
Dr M CHAIB	Co- Encadrant
Dr S SLIMANE	Co- Encadrant

4.2.4 Les objectifs du projet :

Les objectifs principaux du projet sont :

Objectif général :

Développer une balance électronique intelligente capable d'effectuer des mesures de masse précises et fiables.

Objectifs spécifiques :

1. Concevoir un système de pesage basé sur une cellule de charge.
2. Interfacer le capteur avec le module HX711.
3. Programmer la carte ESP32 pour l'acquisition et le traitement des mesures.
4. Réaliser une procédure de calibration pour améliorer la précision.
5. Concevoir un boîtier ergonomique adapté à l'utilisation.
6. Tester et valider les performances de la balance.
7. Proposer une solution à faible coût pour les applications de précision.

4.2.5 Planning de réalisation du projet :

Tableau 20 : Planning de réalisation du projet

Période	Activités
Semaine 1	Recherche bibliographique et étude des balances de précision
Semaine 2	Choix des composants électroniques et conception du système
Semaine 3	Réalisation du montage ESP32 + HX711 + cellule de charge
Semaine 4	Développement du programme et acquisition des données
Semaine 5	Calibration et amélioration de la précision
Semaine 6	Conception du boîtier 3D et intégration des composants
Semaine 7	Tests expérimentaux et correction des erreurs
Semaine 8	Validation finale et préparation de la présentation

4.3 Deuxième axe : Aspects innovants

4.3.1. La nature des innovations :

Le projet proposé présente plusieurs aspects innovants dans le domaine des systèmes de mesure et de la métrologie.

L'objectif est de développer une balance combinant précision et traitement numérique des données.

Les principales innovations sont :

1. Innovation technologique :

La réalisation d'une balance basée sur une cellule de charge haute précision associée à un module HX711 24 bits permettant une acquisition fiable des signaux faibles provenant du capteur.

L'utilisation de la carte ESP32 apporte une capacité de traitement avancée ainsi que des fonctions de communication sans fil (WiFi/Bluetooth).

2. Innovation fonctionnelle :

Le système permet :

- La mesure du poids en temps réel ;
- L'affichage instantané de la valeur mesurée ;
- La calibration automatique ou assistée ;
- Le filtrage et le traitement numérique des mesures afin de réduire les erreurs.

3. Innovation économique :

Le projet propose une solution alternative aux balances de précision commerciales en utilisant des composants accessibles et un développement personnalisé à faible coût.

4.3.2 Les domaines d'innovation :

Les innovations du projet appartiennent à plusieurs domaines :

1. Domaine de la métrologie

Le projet contribue à l'amélioration des systèmes de mesure grâce à :

- Une meilleure précision ;
- Une calibration adaptée ;
- Une acquisition numérique des données.

2. Domaine de l'électronique embarquée

L'intégration de :

- Cellule de charge ;
- Convertisseur HX711 ;
- Microcontrôleur ESP32 ;
- Permet de créer un système embarqué complet dédié au pesage.

3. Domaine de l'Internet des objets (IoT)

Grâce à l'ESP32, la balance peut évoluer vers un système connecté permettant :

- La transmission des mesures ;
- Le suivi des données ;
- L'intégration avec une application ou une interface distante.

4. Domaine de la fabrication numérique :

La réalisation de la structure mécanique par impression 3D permet :

- Une conception personnalisée ;
- Une réduction du temps de fabrication ;
- Une adaptation rapide du prototype.

5. Domaine de l'industrie intelligente

Cette solution s'inscrit dans l'évolution vers des équipements intelligents capables de

- Mesurer ;
- Analyser ;
- Communiquer les informations.

4.4 Analyse stratégique du marché :

4.4.1 Le segment du marché :

Le projet s'inscrit dans le marché des systèmes de mesure et des équipements de pesage électronique.

Il vise principalement les utilisateurs ayant besoin de solutions de mesure précises, fiables et accessibles.

Les segments ciblés sont :

1) Marché de la métrologie et du contrôle qualité :

Les laboratoires, centres de recherche et établissements techniques nécessitent des instruments capables d'effectuer des mesures précises pour les essais et les contrôles.

2) Marché éducatif et universitaire :

Les écoles, universités et centres de formation peuvent utiliser cette balance comme support pédagogique pour :

1. L'apprentissage des systèmes embarqués ;

2. L'étude des capteurs ;
3. La réalisation de travaux pratiques.

3) Marché industriel :

La balance peut être adaptée aux besoins de :

1. Petites industries ;
2. Ateliers de fabrication ;
3. Contrôle de petites pièces ;
4. Applications nécessitant un pesage précis.

4.4.2 La mesure de l'intensité de la concurrence :

Le marché des balances électroniques possède plusieurs acteurs proposant des produits différents selon la précision et le prix.

A. Concurrence directe :

Elle est représentée par :

1. Les fabricants de balances électroniques de précision ;
2. Les fournisseurs d'équipements de laboratoire ;
3. Les marques spécialisées dans les instruments de mesure.

Ces solutions présentent généralement :

1. Une bonne précision ;
2. Une forte fiabilité ;
3. Mais un coût élevé.

B. Concurrence indirecte :

Elle comprend :

1. Les balances électroniques standards ;
2. Les applications de pesage basées sur smartphone ;
3. Les solutions mécaniques traditionnelles.

Positionnement du projet :

La solution proposée se distingue par :

Tableau 21 : La solution proposée

Critère	Balance proposée	Produits classiques
---------	------------------	---------------------

Coût	Faible	Élevé
Personnalisation	Possible	Limitée
Connectivité	ESP32 WiFi/Bluetooth	Rare
Maintenance	Facile	Complexe
Développement	Open source	Fermé

L'intensité de la concurrence est donc considérée comme moyenne à élever, mais le projet possède un avantage grâce à son caractère personnalisable et son coût réduit.

4.4.3 La stratégie marketing :

La stratégie marketing proposée repose sur plusieurs axes :

a) Stratégie produit

Proposer une balance :

1. Précise ;
2. Intelligente ;
3. Économique ;
4. Adaptable selon les besoins des utilisateurs.

Le produit peut être développé en plusieurs versions selon :

1. La capacité maximale ;
2. La précision demandée ;
3. Les fonctionnalités connectées.

b) Stratégie de prix :

Adopter un prix compétitif basé sur :

1. L'utilisation de composants accessibles ;
2. La fabrication locale ;
3. La réduction des coûts de production.

c) Stratégie de communication :

La promotion du produit peut être réalisée par :

1. Démonstrations dans les laboratoires et établissements ;
2. Réseaux sociaux ;
3. Salons technologiques ;

4. Plateformes de projets innovants.

d) Stratégie de distribution :

La commercialisation peut cibler :

1. Universités et centres de formation ;
2. Petites entreprises ;
3. Laboratoires ;
4. Utilisateurs particuliers intéressés par les systèmes de mesure.

4.5 Plan de production et organisation :

4.5.1. Le processus de production :

Le processus de fabrication de la balance intelligente se déroule en plusieurs étapes afin d'assurer la qualité et la précision du produit final.

Étape 1 : Étude et conception

Cette étape consiste à :

- Définir les besoins techniques du système ;
- Choisir les composants électroniques ;
- Concevoir l'architecture générale de la balance ;
- Réaliser la conception mécanique du boîtier en 3D.

Étape 2 : Fabrication mécanique

Elle comprend :

- La modélisation du boîtier ;
- La fabrication de la structure par impression 3D ;
- L'assemblage des parties mécaniques ;
- L'installation de la plateforme de pesage.

Étape 3 : Réalisation électronique

Cette phase consiste à :

- Installer la cellule de charge ;
- Connecter le module HX711 ;
- Intégrer la carte ESP32 ;

- Réaliser le câblage et les tests électriques.

Étape 4 : Développement logiciel

Elle comprend :

- La programmation de l'ESP32 ;
- La lecture des données du capteur ;
- Le traitement numérique des mesures ;
- L'affichage du poids ;
- L'intégration du système de calibration.

Étape 5 : Tests et validation

La dernière étape consiste à :

- Vérifier la précision des mesures ;
- Comparer les résultats avec des masses connues ;
- Corriger les erreurs ;
- Valider le fonctionnement final.

4.5.2 L'approvisionnement :

L'approvisionnement concerne la recherche et l'acquisition des composants nécessaires à la réalisation du produit.

Les principaux composants sont :

Tableau 22 : Les principaux composants

Composant	Fonction
Cellule de charge	Mesure de la force appliquée
Module HX711	Amplification et conversion du signal
ESP32	Traitement et communication
Écran LCD/OLED	Affichage des mesures
Boutons de commande	Interaction utilisateur
Alimentation	Fourniture d'énergie
Composants électroniques	Connexions et protection
Filament 3D	Fabrication du boîtier

L'approvisionnement peut être réalisé auprès :

1. De fournisseurs électroniques ;
2. De plateformes spécialisées ;
3. De fournisseurs locaux.

L'objectif est de garantir :

1. La disponibilité des composants ;
2. Un coût réduit ;
3. Une bonne qualité des produits.

4.5.3 La main d'œuvre :

La réalisation du projet nécessite plusieurs compétences techniques.

Tableau 23 : La main d'œuvre

Domaine	Mission
Conception électronique	Choix des composants et réalisation du circuit
Programmation embarquée	Développement du code ESP32
Conception mécanique	Modélisation et fabrication du boîtier
Métrologie	Calibration et analyse de précision
Tests qualité	Vérification des performances

Une équipe polyvalente permet d'assurer toutes les phases du développement, de la conception jusqu'à la validation du prototype.

4.5.4 Les principaux partenaires :

Le développement du projet peut être soutenu par différents partenaires :

A. Partenaires académiques :

- Universités et instituts techniques ;
- Laboratoires de recherche ;
- Encadrement spécialisés.

Rôle :

1. Accompagnement scientifique ;
2. Validation technique ;
3. Accès aux équipements.

B. Partenaires techniques :

- Fournisseurs de composants électroniques ;

- Fabricants de matériel de prototypage ;
- Ateliers de fabrication numérique.

Rôle :

- Fourniture des composants ;
- Assistance dans la fabrication.

C. Partenaires économiques :

- Entreprises industrielles ;
- Laboratoires de contrôle ;
- Sociétés intéressées par les systèmes de mesure.

Rôle :

1. Tester le produit ;
2. Développer des opportunités commerciales.

4.6 Cinquième axe : Plan financier

4.6.1 Les charges Variables :

	Produit brut	Quantité globale	Unité	Valeur du produit brut (DA)	Quantité unitaire (pour 1 unité)	Unité	Coût de reviens unitaire (DA)
Matières premières	Cellule de charge 800 g	1000		800000,00	1		800,00
	ESP32 Node MCU	1000		1900000,00	1		1900,00
	Module HX711	1000		500000,00	1		500,00
	Écran LCD/OLED	1000		650000,00	1		650,00
	Capteur DS18B20	1000		300000,00	1		300,00
	Carte électronique PCB	1000		600000,00	1		600,00
	Boîtier de la balance	1000		1000500,00	1		1000,50
	Plateau de pesage	1000		800000,00	1		800,00
	Module TP4056	1000		150000,00	1		150,00
	Module MT3608	1000		350000,00	1		350,00
	Batterie Lithium et support	1000		500000,00	1		500,00
	Interrupteur ON/OFF	1000		100000,00	1		100,00
	Fils électriques	40000		20,00	1000		0,50
	Étain de soudure	50		250,00	1000		5000,00
	Gaines isolantes	300		150,00	1000		500,00
	Connecteurs divers	1000		30,00	1000		30,00
	Resistances 120	1000		10,00	1000		10,00
	Resistances 4.6K	2000		10,00	0		0,00

Étude Économique

Autres	Impression 3D / fabrication boîtier	1000		1000,00	1		1,00
	Tests et calibration	1000		500,00	1		0,50
Total des charges variables				7652470,00	///		13192,50

4.6.2 Les charges fixes :

Organisation/Main d'œuvre	Poste	Nombre	Salaire Mensuel (DA/An)	Salaire Brut (DA/An)
	Ingénieur conception électronique	1	60 000	720000
	Technicien montage et tests	1	40 000	480000
	Responsable gestion / commercial	1	40 000	480000
	Total masse salariale	3	140000	1680000

Frais & Services divers	Frais & Services divers	Nombre	Montant Mensuel (DA/An)	Montant Annuel (DA/An)
	Électricité	1	5 000	60000
	Internet / communication	1	3 000	36000
	Location atelier	1	20 000	240000
	Maintenance équipements	1	5 000	60000
	Transport	1	5 000	60000
	Marketing	1	6000	72000
	Total services	6	44000	528000

Total charges fixes (DA)	2208000
---------------------------------	----------------

4.6.3 Equipements et investissement :

Équipement	Désignation	Valeur unitaire	Quantité	Valeur total DA
	Ordinateur de conception	80 000	4	320000
	Fer à souder + station de soudage	25 000	1	25000
	Multimètre numérique	8 000	1	8000
	Alimentation de laboratoire	25 000	1	25000
	Imprimante 3D (boîtier)	70 000	1	70000
	Outils de montage électronique	10 000	1	10000
	Oscilloscope	60 000	1	60000
	Total		10	518000
	Dotation à l'amortissement1 (Sur 5ans)			103600

Agencement et installation	Désignation		Valeur (DA)
	Installations	Installation électrique	20 000
		Aménagement espace de travail	50 000
		Tables et supports de montage	30 000
		Mobilier de bureau	25 000
	Total		125000
	Dotation aux investissements (Sur 10ans)		12500

4.6.4 Marketing :

	Mois												Total
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Budget mensuel (x1000 DA)	10	10	8	6	6	6	4	4	4	4	2	2	66

4.6.5 Revenue

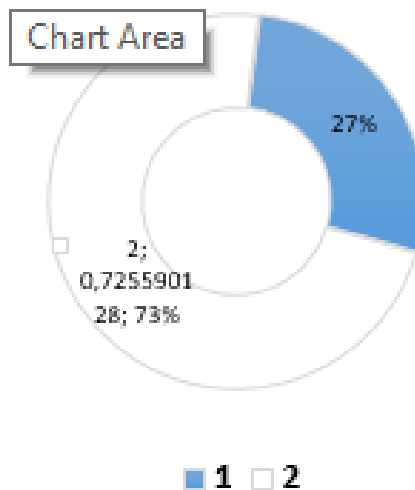
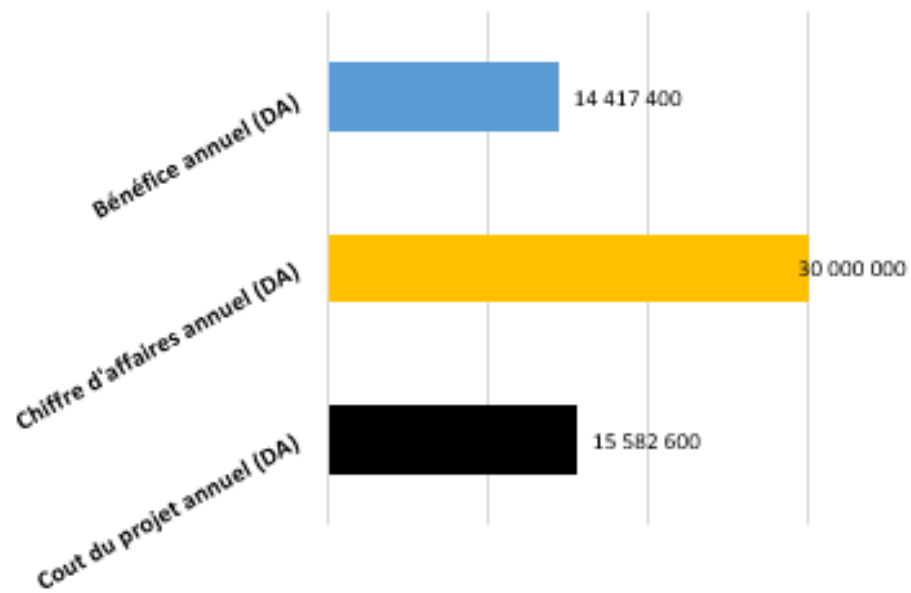
Biens / Services			Mois												Tot
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Produit/service1	Unités vendues	Q1	5	5	10	40	60	70	100	120	140	150	150	150	1000
	Prix de vente (x1000 DA)	P1	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	///
	Chiffre d'affaires (x1000 DA)	CA1	150,00	150,00	300,00	1200,00	1800,00	2100,00	3000,00	3600,00	4200,00	4500,00	4500,00	4500,00	30000,00

4.6.6 Bilan final :

	Formule	Montant (DA)
Cout unitaire initial (DA)		13192,50
Charges fixes unitaire (DA)		2208,00
Dotation à l'amortissement unitaire (Sur 5 ans)		103,60
Dotation aux investissements unitaire (Sur 10 ans)		12,50
Cout Unitaire final (DA)	A+B+C+D	15516,60
Capacite de production (unités/an)		1000
Budget Marketing (DA/an)		66000,00
Cout du projet annuel (DA)	(E*F)+G	15582600,00
Chiffre d'affaires annuel (DA)		30000000,00

Étude Économique

Bénéfice annuel (DA)	I-H	14417400,00
Marge bénéficiaire (%)	$J*100/I$	48,06 %



4.6.7 Prototype Expérimental :



Partenaires clés	Activités clés	Proposition de valeur	Relation clients	Segments clients
• Fournisseurs de composants électroniques	• Conception et développement de la balance intelligente	• Mesure de masse précise et fiable	• Support technique	• Laboratoires et centres de recherche
• Fabricants de cartes électroniques (PCB)	• Programmation ESP32 et traitement des données	• Faible coût par rapport aux balances commerciales	• Assistance à l'installation	• Universités et établissements de formation
• Fournisseurs de cellules de charge et HX711	• Intégration des composants électroniques	• Calibration simple et amélioration de la précision	• Maintenance et mise à jour du système	• Petites industries
Ateliers d'impression 3D	• Conception mécanique et fabrication du boîtier	• Solution personnalisable selon le besoin	• Formation utilisateur	• Ateliers de contrôle qualité
• Structures d'accompagnement startup	• Tests et validation métrologique	• Système connecté basé sur ESP32 (WiFi/Bluetooth)	• Support après-vente	• Utilisateurs particuliers intéressés par la précision

 Activer
Accédez

Ressources clés	Canaux
• Carte ESP32 • Cellule de charge haute précision • Module HX711 • Logiciel de programmation • Matériel de prototypage • Équipe technique	• Vente directe • Réseaux sociaux • Site internet / plateforme numérique • Salons et événements technologiques • Partenariats avec laboratoires • Démonstrations dans les établissements

Structure des coûts	Sources de revenus
• Achat des composants électroniques • Fabrication du boîtier 3D • Développement logiciel • Tests et calibration • Communication et marketing	• Vente de balances intelligentes • Services de personnalisation • Maintenance et assistance technique • Vente de solutions adaptées aux entreprises • Formation sur l'utilisation du système

Cout Unitaire final (DA)	15516,60
--------------------------	----------

Cout du projet annuel (DA)	15582600,00
----------------------------	-------------

4.7 Conclusion :

Cette étude économique montre que le projet de conception d'une balance électronique de précision est réalisable sur le plan financier.

L'analyse du marché met en évidence une demande croissante en instruments de pesage précis, tandis que la production nationale de ce type d'équipements demeure limitée, ce qui offre des perspectives favorables pour le développement d'une solution locale.

Par ailleurs, l'intégration des exigences métrologiques, notamment en matière de précision, de répétabilité, de justesse et d'étalonnage, constitue une valeur ajoutée essentielle du projet. En garantissant des performances conformes aux besoins des applications industrielles, commerciales et de laboratoire, le prototype développé répond aux exigences de fiabilité des systèmes de mesure modernes.

Ainsi, cette étude confirme que le projet est non seulement réalisable sur les plans technique et économique, mais qu'il présente également un intérêt métrologique, en proposant une solution de pesage précise, fiable et susceptible de contribuer au développement de l'instrumentation de mesure à l'échelle nationale.

Conclusion générale

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous sommes intéressés à la conception et à la réalisation d'une balance électronique de précision basée sur une cellule de charge à jauges de contrainte.

Ce travail répond à la nécessité de disposer d'un système de pesage fiable, précis et économiquement accessible, tout en contribuant au développement de solutions locales dans le domaine de l'instrumentation et de la métrologie.

L'objectif principal était de concevoir un prototype capable d'assurer la mesure de la masse, son traitement numérique et son affichage en temps réel, tout en évaluant ses performances métrologiques par des essais d'étalonnage.

Les travaux réalisés ont permis de concevoir et d'intégrer l'ensemble de la chaîne de mesure, comprenant la cellule de charge, le module HX711, le microcontrôleur ESP32, le capteur de température DS18B20, l'écran OLED et les différents circuits d'alimentation.

Une étude théorique des jauges de contrainte, du pont de Wheatstone, de la métrologie et de l'étalonnage a servi de base à la réalisation du prototype.

Les essais expérimentaux ont confirmé le bon fonctionnement du système et ont montré une bonne stabilité, ainsi que des performances métrologiques satisfaisantes.

Au cours de la réalisation, plusieurs solutions ont été étudiées afin d'optimiser les performances de la cellule de charge.

Après une phase d'analyse et de validation, une cellule de charge compatible récupérée d'une balance électronique a été intégrée au prototype.

Cette solution a permis de poursuivre les expérimentations, de réaliser les opérations d'étalonnage et de confirmer le bon fonctionnement ainsi que les performances du système de pesage.

Enfin, l'étude économique a confirmé la faisabilité technique et financière du projet, tandis que des perspectives d'amélioration portent sur l'optimisation de la cellule de charge, la compensation thermique et l'ajout de fonctionnalités de communication et de supervision.

Bibliographie

- [1] Abrial, J.-R.: The B-Book. Cambridge University Press, 1996.
Article d'actes de conférence
- [2] Bherer, H., Desharnais, J., Frappier, M., St. Denis, R.: Investigating Discrete Controllability with Kleene Algebra, in Relational and Kleene-Algebraic Methods in Computer Science (7th International Seminar on Relational Methods in Computer Science / 2nd International Workshop on Applications of Kleene Algebra), Berghammer, R.; Möller, B.; Struth, G. (Eds.), Lecture Notes in Computer Science 3051, Springer-Verlag, 2004, pp 74-85.
- [3] Evans, N., Treharne, H., Laleau, R., Frappier, M.: Applying CSP||B to Information Systems, Software and Systems Modeling, 17 pages, à paraître.
- [4] Fraikin, B., Frappier, M., Laleau, R.: State-Based versus Event-Based Specifications for Information Systems: a Comparison of B and EB3, Software and Systems Modeling, 4(3), July 2005, pp 236-257.
- [5] Frappier, M., Habrias, H. (Eds) : Software Specification Methods : An Overview Using a Case Study, Hermes Science Publishing, London, England, 2006.
Rapport Technique
- [6] Frappier, M., Laleau, R.: Proving the Refinement of Scenarios into Object-Oriented Models. Rapport technique CEDRIC n°277, Institut d'Informatique d'Entreprise, Conservatoire National des Arts et Métiers, Évry, et Rapport technique n° 272, Département de mathématiques et d'informatique, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, août 2001.
- [7] Gervais, F., Frappier, M., St-Denis, R.: EB3. in Software Specification Methods: An Overview Using a Case Study, M. Frappier, H. Habrias, Eds., Hermes Science Publishing, London, England, avril 2006.
- [8] Hoare, C.A.R. : Communicating Sequential Processes, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.
- [9] Analog Devices, DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet, consulté en 2026.
- [10] Maxim Integrated, *DS18B20 – Digital Temperature Sensor Datasheet*, 2019
- [11] P. Lagonotte, J.P. Le Bourg, T. Doget et J.P. Allard, Projet de synthèse de l'électronique analogique : réalisation d'une balance à jauges de contrainte.
- [12] «HX711 Load Cell Amplifier Hookup Guide,» SparkFun , 12 03 2018. [En ligne]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide>. [Accès le 24 05 2025].

Bibliographie

- [13] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet, Espressif Systems, Shanghai, China, consulté en 2026.
- [14] Espressif Systems. (2026). ESP32 Series Wireless MCU. Consulté sur le site officiel d'Espressif Systems.
- [15] « Capteurs de Pesage : guide d'information,» LCM Systems Ltd, 04 07 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.lcmsystems.com/load-cell-calibrationimportance-and-methods>. [Accès le 13 6 2025].
- [16] « Capteur de force, Mesure de force traction compression haute précision,» Sensel Measurement, [En ligne]. Available: <https://senselmeasurement.fr/fr/3-capteur-de-force>. [Accès le 24 05 2025].
- [17] « Capteur de force,» Sensel Measurement, [En ligne]. Available: <https://sensel-measurement.fr/fr/3-capteur-de-force>.
- [18] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet, documentation officielle du microcontrôleur ESP32.
- [19] «4PIN 1.3" OLED module blue color 128X64,» Websoog, 24 05 2025. [En ligne]. Available: <https://www.websoog.com/fr/industrielscientifique/280-4pin-1-3-oled-module-blue-color-128x64.html>.
- [20] «Afficheur OLED i²C Arduino (avec contrôleur SSD1306 monochrome 128×64 pixels),» Passion Electronique, 17 01 2024. [En ligne]. Available: <https://passionelectronique.fr/ecran-oled-i2c-arduino/>. [Accès le 13 6 2025].
- [21] PowerTech-DZ, «Module chargeur de batterie au lithium TP4056 18650 5V 1A Micro USB.,» [En ligne]. Available: <https://powertechdz.net/products/single/tp4056-module-chargeur-de-batterie-aulithium-18650-5v-1a-micro-usb-vente-composants-electroniqueblida-algerie-650>.
- [22] PowerLab-DZ, « Convertisseur DC-DC MT3608 Step-Up 2V-24V vers 3V28V,» [En ligne]. Available: <https://powerlab.dz/product/mt3608convertisseur-dc-dc-step-up-2v-24v-vers-3-28v/>.
- [23] La maitrise du pesage.
- [24] Meguellati M., Sahraoui B., *Étude et réalisation d'un système de contrôle des batteries d'accumulateurs*, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2022.

Bibliographie

- [25] Blender Foundation, Blender: Free and Open Source 3D Creation Suite, Version 5.1, consulté en 2026.

- [26] Maxim Integrated, DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Datasheet, Rev. 6, July 2019.

Annex

Il existe plusieurs façons de coller des pièces métalliques. Parmi les solutions, la colle rapide se distingue par ses spécificités, notamment par sa vitesse de prise.

En parallèle, les colles époxy ainsi que celles conçues pour des températures moyennes sont adaptées à d'autres types d'assemblage, en particulier lorsque la résistance mécanique et la tenue à la chaleur sont importantes.

Toutes les comparaisons entre ces colles sont pertinentes, à l'exception des quantités utilisées et des plages de température, qui varient considérablement selon les produits.

Afin de décrire les opérations d'assemblage de manière claire, nous avons opté pour une présentation sous forme de légendes accompagnant les dessins.

Cette mise en forme, bien que peu académique, permet une meilleure compréhension grâce à sa clarté et sa concision, en particulier lorsqu'il y a de nombreux personnages ou étapes à illustrer.

1ère opération : Pour nettoyer la pièce, vous pouvez utiliser du chlorothène NU ou du fréon TF. Le chlorothène NU est mieux quand on peut s'en servir, car il nettoie bien. Les chlorés sont très actifs.

- Le titane et les plastiques réagissent.
- Avec les dégraissants chlorés.
- Le fréon remplace ces produits.
- Dégraissez avec des solvants adaptés.
- Utilisez des bombes aérosols.



2ème opération : **Figure 75 :** 1ère opération de collage

Pour préparer la surface où on va mettre la jauge, il faut la polir avec un papier abrasif spécial (n° 220 ou 320).

Cela permet d'enlever les oxydations ou les défauts de la surface du matériau. Appliquez le conditionneur A, puis polissez avec le papier abrasif en gardant la surface mouillée.

Nettoyez en passant une compresse de gaze sur la surface traitée.

Il faut répéter l'opération sur l'aluminium ou l'acier, faites les repères de positionnement

de la jauge avec un crayon à mine 4H ou la pointe d'un crayon à bille. Mettez à nouveau du conditionneur A, puis frottez avec des cotons-tiges jusqu'à ce que le coton soit propre.

1. Nettoyez à nouveau avec le conditionneur A.
2. Faites une seule passe avec chaque compresse de gaze.

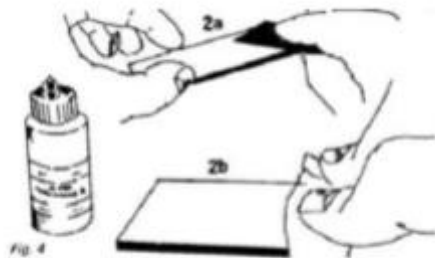


Figure 76 : 2ème opération de collage

3ème opération :

Mettez du neutraliseur 5 sur la surface où vous voulez mettre la jauge.

Ne pas laisser sécher, nettoyez avec des coton-tiges, ne laissez pas s'évaporer le produit, cela pourrait empêcher la colle de coller efficacement, utilisez les compresses de gaze pour absorber le liquide.



Figure 77 : 3ème opération de collage

4ème opération :

Enlever la jauge de son étui à l'aide de précelles et la déposer sur une surface de verre chimiquement propre ou sur la boîte plastique des jauges, coté à coller en dessous. Pour les colles AE-10 et GA-2, utiliser 10 à 12 cm de ruban adhésif, centrer la jauge sur le ruban et relever le « scotch », sous un faible angle en entraînant la jauge au dos. Pour la colle AE 15, le ruban mylar est préférable en prévision du traitement thermique supérieur à appliquer.

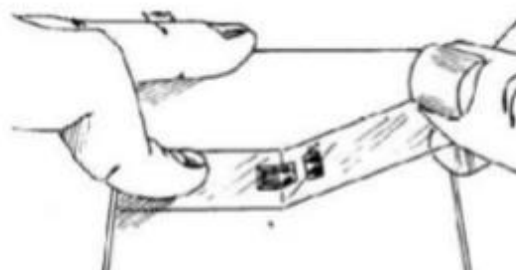


Figure 78 : 4ème opération de collage.

5ème opération :

Collez la jauge là où il y a des points de repère sur le support.

Si les repères ne sont pas alignés, relevez le ruban en le tournant un peu et remplacez la jauge comme avant jusqu'à ce que les repères soient bien alignés.

Fixez le ruban sur la structure sans salir la jauge.

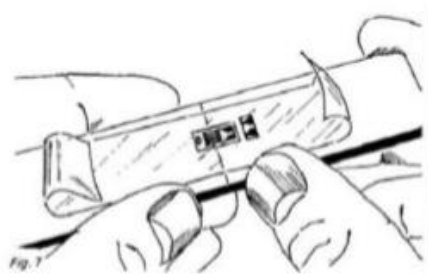


Figure 79 : 5ème opération de collage.

6ème opération :

Soulevez le ruban d'un côté seulement, sous un angle d'environ 45° par rapport à la surface, jusqu'à ce que la jauge et les cosses du relais soient libérées de la structure puis fixez le ruban.

Dans certains cas, cette opération peut être difficile en raison du manque de place.

Si cela se produit, maintenir le ruban adhésif au niveau de la jauge avec un doigt pendant l'opération d'encollage.

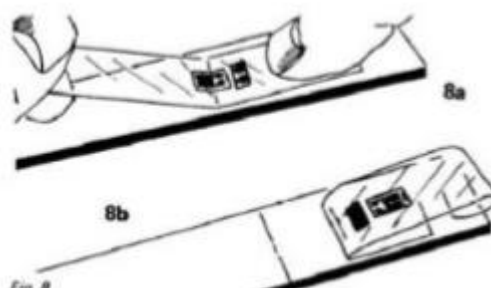


Figure 80 : 6ème opération de collage.

7ème opération :

Enduire très légèrement le catalyseur, le verso de la jauge et de la plaquette de cosses-relais. Il en faut très peu le pinceau est bien égoutté sur le bord du flacon. Faites-le avec soin.

Sur toute leur surface, sans interruption. Si on enlève le pinceau trop brusquement, il reste trop de catalyseur là où on l'a enlevé.

Laisser sécher le catalyseur ce qui dure environ une minute aux températures normales.

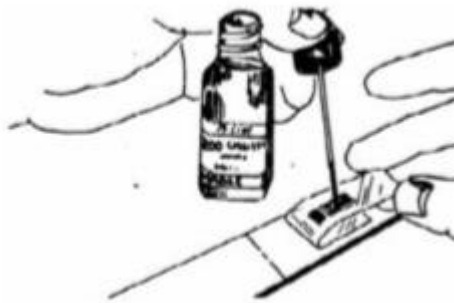


Figure 81 : 7ème opération de collage.

8ème opération :

Déposer une goutte unique de colle M200 « certifiée » à la limite du contact entre le ruban adhésif et la structure.

C'est-à-dire que la colle n'est pas encore en contact avec la jauge ni avec la plaquette de cosses-relais.



Figure 83 : 8ème opération de collage.

9ème opération :

Collez le ruban adhésif en bas de la structure.

Utilisez un tampon de gaze pour appliquer la colle en appuyant doucement pour qu'elle pénètre partout où vous voulez.

Déplacez la gaze d'un coup sec et précis.

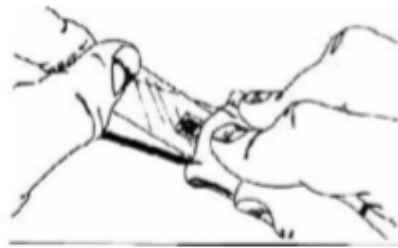


Figure 84 : 9ème opération de collage.

10ème opération

Appuyez fort avec votre pouce sur la jauge pendant une minute.

La pression du pouce fait réagir les polymères rapidement.

Si le pouce reste collé, on saura que la colle est bonne, mais que l'on n'a pas bien collé l'ensemble, comme recommandé.

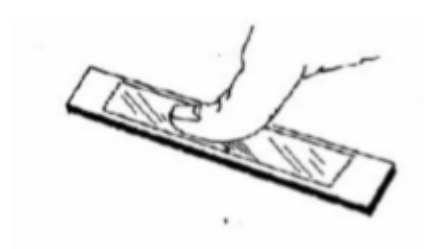


Figure 85 : 10ème opération de collage.

11ème opération :

La jauge et la plaquette sont collées.

On attend deux minutes, après quoi, on l'enlève le ruban adhésif.

Pour le retirer, penchez-le sous un angle de 180 degrés.

Cela vous permettra de séparer le ruban provisoire de la jauge et de la plaquette de cosses-relais.

Vous n'avez pas besoin de retirer le ruban adhésif au bout de deux minutes.

Si on doit faire autre chose, par exemple chauffer le fer à souder, préparer les fils

Attendez le dernier moment pour les fils, etc.

Une jauge n'a rien à gagner, mais tout à perdre si elle reste nue et exposée à l'humidité et aux poussières.

La jauge est prête : il faut la câbler, la nettoyer, la protéger et la contrôler.

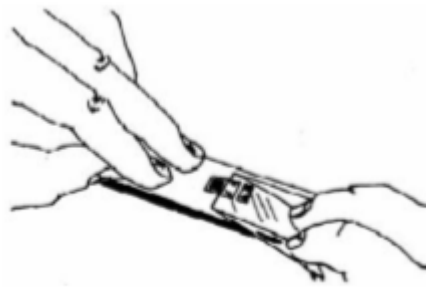


Figure 86 : 11ème opération de collage.

Le code :

Les figures suivantes représentent le code Arduino de notre système :

```

Lastversion.ino
1  #include "HX711.h"
2  #include <Wire.h>
3
4  #include <Adafruit_GFX.h>
5  #include <Adafruit_SSD1306.h>
6
7  #include <OneWire.h>
8  #include <DallasTemperature.h>
9
10
11 // ===== PIN CONFIG =====
12
13 // HX711
14 #define DOUT 25
15 #define CLK 27
16
17 // DS18B20
18 #define ONE_WIRE_BUS 13
19
20 // TARE button
21 #define TARE_BUTTON 14
22
23
24 // OLED
25 #define SCREEN_WIDTH 128
26 #define SCREEN_HEIGHT 64
27 #define OLED_RESET -1
28
29
30 // ===== OBJECTS =====
31
32 Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET);
33
34 HX711 scale;
35
36 OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
37 DallasTemperature sensors(&oneWire);
38
39
40 // ===== SETTINGS =====
41
42 float calibration_factor = 257;
43
44
45 // ===== STABLE READ FUNCTION =====
46
47 float readStableWeight() {
48     float sum = 0;
49
50     // discard unstable first readings
51     scale.get_units(5);
52
53     // average filter
54     for(int i = 0; i < 10; i++) {
55
56         // average filter
57         for(int i = 0; i < 10; i++) {
58             sum += scale.get_units(1);
59             delay(20);
60         }
61         return sum / 10.0;
62     }
63
64
65 // ===== SETUP =====
66
67 void setup() {
68     Serial.begin(115200);
69
70     pinMode(TARE_BUTTON, INPUT_PULLUP);
71
72     Wire.begin(21, 22);
73
74     if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
75         Serial.println("OLED FAILED");
76         while(1);
77     }
78
79     display.clearDisplay();
80
81     display.clearDisplay();
82     display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
83
84     display.setTextSize(2);
85     display.setCursor(0,20);
86     display.println("Starting");
87     display.display();
88
89     scale.begin(DOUT, CLK);
90     sensors.begin();
91
92     delay(2000);
93
94     scale.set_scale();
95     scale.tare();
96     scale.set_scale(calibration_factor);
97
98     display.clearDisplay();
99     display.setTextSize(2);
100    display.setCursor(0,20);
101    display.println("READY");
102    display.display();
103
104    Serial.println("Scale Ready");
105
106 }

```

```

107
108
109
110 // ===== LOOP =====
111
112 void loop() {
113
114     // ----- TARE -----
115     if(digitalRead(TARE_BUTTON) == LOW) {
116
117         display.clearDisplay();
118         display.setTextSize(2);
119         display.setCursor(0,20);
120         display.println("TARING");
121         display.display();
122
123         scale.tare();
124
125         Serial.println("Tare done");
126
127         while(digitalRead(TARE_BUTTON)==LOW) {
128             delay(10);
129         }
130     }
131
132
133     if(scale.is_ready()) {

```

```

133     if(scale.is_ready()) {
134
135         // ----- WEIGHT -----
136         float weight = readStableWeight();
137
138         if(abs(weight) < 1.5) {
139             weight = 0;
140         }
141
142         // ----- TEMPERATURE -----
143         sensors.requestTemperatures();
144         float temperature = sensors.getTempCByIndex(0);
145
146
147         // ----- SERIAL (3 decimals) -----
148         Serial.print("Weight : ");
149         Serial.print(weight, 3);
150         Serial.println(" g");
151
152         Serial.print("Temperature : ");
153         Serial.print(temperature);
154         Serial.println(" C");
155
156
157         // ----- OLED (1 decimal only) -----
158         display.clearDisplay();
159

```

Lastversion.ino

```

160     display.setTextSize(1);
161     display.setCursor(0,0);
162     display.println("BALANCE");
163
164     display.setTextSize(3);
165     display.setCursor(0,15);
166     display.print(weight, 3); // <-- OLED 1 decimal
167     display.print(" g");
168
169     display.setTextSize(1);
170     display.setCursor(0,52);
171     display.print("Temp: ");
172     display.print(temperature);
173     display.println(" C");
174
175     display.display();
176
177 }
178 else {
179
180     display.clearDisplay();
181     display.setTextSize(2);
182     display.setCursor(0,20);
183     display.println("HX711 ERR");
184     display.display();
185
186 }

```