République algérienne démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Dr Yahia FARES de Médéa
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'études

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Filière : Electromécanique

Spécialité : Mécatronique

Titre

Conception et réalisation d'une cellule de force avec système d'affichage des données.

Préparé par : Bouchra SLAMA
Khaoula RABAHIE

Dirigé par : Dr Nasreddine AMOURA
Dr Nacera CHERIET

Juin 2024

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos sincères remerciements à nos encadrants, Dr Nasreddine AMOURA et Dr Nacera CHRIET, pour le temps qu'il nous ont consacré tout au long de ce projet, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ilsont bien voulu nous consacrer.

Nous tenons à exprimer notre plus profonde gratitude à chacun des membres du Jury pour le temps et les efforts consacrés à l'évaluation de notre Projet de Fin d'Études.

Nous tenons à remercier chaleureusement tout le personnel du laboratoire de l'université pour leur aide et leurs orientations, M. Khider DERICHI, M. Yahia ANNIBA, M. Djamel BENKIAR et M. SADOUKI sans oublier le directeur des laboratoires, M. Sofiane MOULOUD.

Nous remercions également DrRafik EULDJI qui nous ont donné l'envie d'apprendre au travers de ses conseils et critiques tout au long de notre stage.

Nos sincères remerciements vont aux dirigeants des ateliers MOKADEM pour avoir gracieusement réaliser le prototype du capteur.

Nous sommes reconnaissantes envers nos familles pour leur amour inconditionnel, leur patience et leur encouragement. Leur soutien constant nous a donné la force de persévérer dans les moments difficiles.

Merci à nos collègues et amis, pour leur soutien moral et leurs encouragements.

Merci à toutes et à tous.

إهداء

الحمد لله حبًا وشكرًا وامتنانًا، الذي بفضله ومنّه،
ها أنا اليوم أقف على أعتاب حلم طال انتظاره،
وقد تحول إلى واقع ملموس أعتز به وأفتخر،
حلمٌ بدأ بخطوة ونما بعزيمة، واليوم يُتوج بالنجاح.

إلى من كانوا النور في ليالي الشتاء الباردة،
إلى والديّ العزيزين، اللذين غرسا فيّ بذور الأمانة والإخلاص،
وعلماني أن العزيمة والإرادة هما مفتاحا النجاح في الحياة،
إلى أمي الحنونة، التي كانت لي مثالاً للتضحية والعطاء بلا حدود،
وإلى أبي الحكيم، الذي علمني كيف أواجه التحديات بقوة وصبر،

إلى إخوتي وزوجة أخي، الذين شكلوا السند والدعم في كل خطواتي،
وكانوا لي الأصدقاء والمرشدين في مسيرتي العلمية والعملية،
إلى أصدقائي الأعزاء، الذين رافقوني في رحلة الدراسة،
وشاركوني الأحلام والطموحات، وكانوا لي العون في السراء والضراء،

إلى أساتذتي الأجلاء، الذين أناروا بصيرتي بنور العلم والمعرفة،
وساهموا في تشكيل فكري وتوجيهي نحو آفاق جديدة من الإبداع والتميز،
إلى كل من له بصمة في هذا الإنجاز، من معلمين ومربين وزملاء،
أهدي هذا العمل، تعبيرًا عن عميق امتناني وعرفاني بجميل صنيعهم،

وإلى جدي العزيز، السيد علال سلامة، العالم الجليل،
الذي رحل عن عالمنا تاركًا وراءه إرثًا من العلم والمعرفة،
والذي علمني أن الحياة مسيرة علم وعمل، وأن العلماء بناة الأمم،
أهدي هذا الإنجاز، معبرًا عن بالغ امتناني وعرفاني له،
وعدًا بأن أحمل مشعل العلم الذي أوقده في قلبي.

وأخيرًا، إلى روحي التي تحدت الصعاب،
وإلى قلبي الذي ضخ الأمل في أيامي الصعبة،
وإلى عقلي الذي لم يكلّ أو يملّ من البحث والاستكشاف،
أهدي هذا الإنجاز، باعتباره ثمرة جهودي وعرقي،
وعدًا بأن أستمر في السعي نحو التميز والرقي.

إهداء

من قال أنا لها "نالها."

لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها أن تكون

لم يكن الحلم قريبا ولا الطريق كان محفوفا بالتسهيلات

لكنني فعلتها ونلتها.

الحمد لله حباوشكرا وامتنانا، الذي بفضله ها أنا اليوم أنظر

إلى حلما طال انتظاره وقد أصبح واقعا أفتخر به.

إلى ملاكي الطاهر، وقوتي بعد الله داعمتي الأولى والأبدية "امي"

أهديك هذا الإنجاز الذي لولا تضحياتك لما كان له وجود، ممتنة لإن

الله قد اصطفاك لي من البشر أما يا خير سند وعوض.

إلى من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل

" .أبي"

إلى من قيل فيهم:

سَنَشُدُّ عَضُدَكَ بِأَخِيكَ

إلى من مد يده دون كلل ولا ملل وقت ضعفي

"أخي" أدامك الله ضلعا ثابتا لي.

إلى من آمنت بقدراتي وأمان أيامي "أختي الكبرى."

إلى من تذكرني بقوتي وتقف خلفي كظلي " زوجة أخي"

Résumés

ملخص

يركز مشروع التخرج على تصميم وتنفيذ مستشعر قوة مبتكر. من خلال دمج مقاييس الإجهاد والمكونات. الإلكترونية المتقدمة، يقيس المستشعر بدقة القوى المطبقة. سيتم اتباع منهجية تصميم صارمة، بدءًا من اختيار المكونات إلى برمجة المتحكم الدقيق. سيتم إجراء اختبارات شاملة للتحقق من موثوقية ودقة المستشعر على نطاقمن الأحمال. يمثل هذا المشروع مساهمة كبيرة في مجال مستشعرات القوة، مما يفتح آفاقًا لتطبيقات متنوعة في المجالات الصناعية والطبية والبحثية.

الكلمات الرئيسية: خلية القوة، الحمولة، التشوه، المتحكم الدقيق

Résumé

L'objectif de ce projet de fin d'études de master est la conception et la réalisation d'un capteur de force innovant. En intégrant des jauges de contrainte et des composants électroniques avancés, le capteur mesure avec précision les forces appliquées. Une méthodologie de conception rigoureuse sera suivie, du choix des composants à la programmation du microcontrôleur. Des tests approfondis pour valider la fiabilité et la précision du capteur sur une plage de charges seront effectués. Ce projet représente une contribution significative dans le domaine des capteurs de force, ouvrant des perspectives d'application diverses dans les domaines industriel, médical et de recherche.

Mots clés : Cellule de force, charge, déformation, microcontrôleur

Abstract

The objective of this master's thesis project is the design and implementation of an innovative force sensor. By integrating strain gauges and advanced electronic components, the sensor accurately measures the applied forces. A rigorous design methodology will be followed, from the selection of components to the programming of the microcontroller. Extensive testing will be conducted to validate the reliability and accuracy of the sensor over a range of loads. This project represents a significant contribution to the field of force sensors, opening up various application prospects in industrial, medical, and research domains.

Keywords: Loadcell, load, strain, microcontroller

Sommaire

REMERCIEMENTS **2**

RESUMES **5**

SOMMAIRE **6**

LISTE DES SYMBOLES **9**

LISTE DES FIGURES **10**

INTRODUCTION GENERALE **11**

PROBLEMATIQUE 12

L'OBJECTIVITE 12

CHAPITRE I GENERALITES SUR LES CELLULES DE CHARGE **13**

I.1 DEFINITION 14

I.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT 14

I.3 CARACTERISTIQUES 15

I.4 TYPES DE CELLULES DE CHARGE 15

I.4.1 Cellules de charge à jauges de contrainte *16*

I.5 DOMAINES D'UTILISATION 19

I.6 CONCLUSUION 20

CHAPITRE II GENERALITES SUR LES JAUGES **21**

II.1 INTRODUCTION 22

II.2 LA CONTRAINTE 22

II.2.1 Définition de la contrainte *22*

II.2.2 Les différents types de contraintes mécaniques *22*

II.2.3 Contrainte de traction-compression *23*

II.2.4 Contrainte de flexion *24*

II.2.5 Contrainte de torsion *24*

II.3 LA DEFORMATION 25

II.3.1 Définition de la déformation *25*

II.3.2 Différents types de déformations *25*

II.4 LES PROPRIETES MECANIQUES 25

II.4.1 Module d'Young et coefficient de Poisson *25*

II.5 LES JAUGES EXTENSOMETRIQUES 26

II.5.1 Jauge de contrainte *26*

II.5.2 Facteur de jauge *27*

II.5.3 Les différents types de jauges de contraintes : ... *27*
II.5.4 Jauges de déformation ... *28*
II.6 CONDITIONNEMENT DES JAUGES ... 30
II.6.1 Définition du pont de Wheatstone ... *30*
II.6.2 Principe de fonctionnement ... *32*
II.6.3 Méthodes de mesure pour les jauges résistives : ... *34*
II.6.4 Position des jauges dans un pont complet et mesure du rapport déformations / réaction électrique en traction/compression uni axiale : ... *36*
II.6.5 Position des jauges et mesure de déformations en flexion ... *36*
II.6.6 Caractéristiques et avantage de la jauge de contrainte dans le pont de Wheatstone ... *37*
II.7 CONCLUSION ... 37

CHAPITRE III CONCEPTION ET REALISATION DE L'ACQUISITION ... 38

III.1 INTRODUCTION ... 39
III.2 STRUCTURE GENERALE DU SYSTEME ELECTRONIQUE A REALISER ... 39
III.3 TECHNIQUE DE MONTAGE D'UNE JAUGE (TYPE DE MONTAGE) ... 40
III.4 MONTAGE DE JAUGE ... 40
III.5 AMPLIFICATEUR ... 41
III.5.1 Principe de fonctionnement ... *42*
III.5.2 Schéma de connexion ... *42*
III.6 CARTE ARDUINO UNO ... 42
III.6.1 Définition ... *42*
III.6.2 Caractéristiques ... *43*
III.6.3 Les différentes cartes ARDUINO ... *44*
III.7 LE LOGICIEL ... **ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
III.8 MATLAB ... 45
III.9 CONNEXION CARTE ARDUINO AVEC MATLAB ... 45
III.10 CONCLUSION ... 46

CHAPITRE IV REALISATION ET CALIBRAGE DU PROTOTYPE ... 47

IV.1 INTRODUCTION ... 48
IV.2 CONCEPTION MECANIQUE DE LA CELLULE DE CHARGE TYPE PANCAKE ... 48
IV.2.1 Description du capteur ... *48*
IV.2.2 Caractéristiques mécaniques de l'alliage utilisé ... *48*
IV.2.3 Le collage des jauges ... *49*
IV.3 2 REALISATION DU CABLAGE ... 51
IV.4 CONNECTION DU CAPTEUR A L'AMPLIFICATEUR ET A LA CARTE ARDUINO ... 51
IV.4.1 Matériel Nécessaire ... *51*
IV.5 CALIBRAGE DU CAPTEUR ... 52
IV.5.1 Étapes de Réalisation ... *52*

IV.5.2 Valeurs mesurées. *55*
IV.5.3 Les caractéristiques du capteur *56*
IV.6 CONCLUSION 56
CONCLUSION GENERALE **58**
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES **59**
ANNEXES **60**
ANNEXE 1 ANALYSE STATIQUE DU CAPTEUR DE CHARGE SOUS SOLIDWORKS 61
CHAPITRE V TABLE OF CONTENTS **62**
DESCRIPTION **62**
MODEL INFORMATION **63**
STUDY PROPERTIES **64**
UNITS **64**
MATERIAL PROPERTIES **65**
LOADS AND FIXTURES **66**
STUDY RESULTS **68**
ANNEXE 2 DESSINS DE DEFINITION 72

Liste des symboles

Δl : Allongement

K : Raideur

σ : Contrainte

ε : Déformation

υ : Coefficient de Poisson

ε_l : Déformation latérale

ε_{ll} : Déformation longitudinale.

k : Facteur de jauge

R: Résistance électrique

E : Module d'Young

V_{out} : Tension de sortie

V_{in} : Tension d'entrée

ΔR : Variation des résistances

L : Longueur initiale

Liste des figures

FIGURE I-1CELLULES DE CHARGE EN COMPRESSION 16

FIGURE I-2CELLULE DE CHARGE EN TRACTION 16

FIGURE I-3 CELLULES DE CHARGE DE TYPE S 17

FIGURE I-4 CELLULES DE CHARGE EN ANNEAU 17

FIGURE I-5 CELLULES DE CHARGE A CISAILLEMENT 18

FIGURE I-6 CELLULES DE CHARGE ET DE FLEXION 18

FIGURE I-7 CELLULE DE CHARGE A TORSION 18

FIGURE I-8 CELLULES DE CHARGE HYDRAULIQUE 19

FIGURE I-9 CELLULES DE CHARGE PIEZOELECTRIQUE 19

FIGURE II-1COURBE CONTRAINT-DEFORMATION POUR UN ALLIAGE METALLIQUE 22

FIGURE II-2 EPROUVETTE D'ESSAI DE TRACTION. 23

FIGURE II-3 POUTRE DE FLEXION. 24

FIGURE II-4 EPROUVETTE D'ESSAI DE TORSION. 25

FIGURE II-5 SCHEMA DE PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT D'UNE JAUGE DE CONTRAINTE 27

FIGURE II-6 SCHEMA DE PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT D'UNE JAUGE DE DEFORMATION 29

FIGURE II-7 MONTAGE DE WHEATSTONE. 30

FIGURE II-8 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU PONT DE WHEATSTONE 32

FIGURE II-9SCHEMA DE PRINCIPE DU MONTAGE PONT SIMPLE 33

FIGURE II-10SCHEMA DE PRINCIPE DU MONTAGE DEMI-PONT 33

FIGURE II-11 SCHEMA DE PRINCIPE DU MONTAGE PONT COMPLET. 34

FIGURE II-12: POSITION DES JAUGES DANS UN PONT COMPLET POUR LA MESURE DES DEFORMATIONS EN TRACTION, COMPRESSION ET EN FLEXION 36

FIGURE III-1**:** DIFFERENTS BLOCS DU SYSTEME 39

FIGURE III-2 AMPLIFICATEUR HX711 42

FIGURE III-3 SCHEMA D'UNE CARTE ARDUINO UNO 44

FIGURE III-4 TABLEAU DE DEFERENT TYPE DE ARDUINO UNO 45

FIGURE V-1CAPTEUR PANCAKE 48

FIGURE V-2 MONTAGE LA JAUGE 49

FIGURE V-3 JAUGE EXTESIONMETRIQUE 50

FIGURE V-4 LES INSTRUMENTS NECESSAIRES POUR MONTER LE CAPTEUR 50

FIGURE V-5 MONTAGE DE JAUGE SUR LE CAPTEUR 50

FIGURE V-6 CAPTEUR DE FORCE PANCAKE 51

FIGURE V-7 SCHEMA ELECTRIQUE DE CAPTEUR 52

FIGURE V-8 MACHINE DE COMPRESSION 53

FIGURE V-9 ETALONNAGE DE CAPTEUR 54

FIGURE V-10 COURBE D'ETALONNAGE DU CAPTEUR 56

Introduction générale

Dans le monde moderne, les capteurs jouent un rôle essentiel dans notre vie quotidienne, aux systèmes de surveillance environnementale, en passant par les applications industrielles complexes, les capteurs sont les yeux, les oreilles et parfois même les mains de la technologie moderne. En effet, ils sont les interfaces vitales entre le monde physique et le monde numérique, convertissant une multitude de phénomènes physiques en signaux électriques interprétables par les systèmes informatiques.

Un capteur peut être défini comme dispositif qui transforme une grandeur physique (température, pression, …etc.) en signal électrique telle qu'une tension électrique, une hauteur de mercure, un courant électrique ou la déviation d'une aiguille.

L'évolution rapide des technologies conduit à des progrès significatifs dans la conception et la fabrication des capteurs, rendant possible la détection de phénomènes de plus en plus subtils et complexes. Par exemple, les capteurs utilisés dans les applications médicales, l'industrie, Surveillance et sécurité …etc.

Les capteurs se présentent sous une variété de formes et de fonctions, chacun conçu pour détecter et mesurer différents types de stimuli physiques. Voici quelques types de capteurs les plus courants :

Capteurs de température, Capteurs de pression, Capteurs de lumière, Capteurs de gaz, Capteurs de force Capteurs de niveau…etc.

Chaque type de capteur utilise un principe particulier pour convertir le mesurande en un signal électrique, ou électronique pouvant être traité et interprété par d'autres composants ou systèmes. La sélection du type de capteur dépendra de la grandeur physique à mesurer, des conditions environnementales et des exigences de précision et de sensibilité de l'application.

Par exemple : le capteur de force est un dispositif utilisé pour mesurer la force appliquée à un objet. Elle est couramment utilisée dans les balances, les systèmes de pesage et les applications de contrôle de la force. Les cellules de charge fonctionnent en convertissant la force appliquée en signal électrique proportionnel, ce qui permet de mesurer avec précision la force exercée sur l'objet.

Au cours de ce travail, nous verrons :

Au chapitre I : quelques notions sur les cellules de charge, leurs principes de fonctionnement, leurs caractéristiques, leurs types, et le domaine d'utilisation.

Dans le deuxième chapitre, nous aborderons les généralités sur les jauges ainsi que leurs différents types et montages. Nous expliquerons le principe de fonctionnement des jauges, en citant les divers types de jauges et leurs caractéristiques. Nous discuterons également de leur

conditionnement afin de réaliser un système de mesure des forces et des déformations. Ce chapitre sera particulièrement utile pour les étudiants en génie civil et en génie mécanique dans l'étude des contraintes. Cette réalisation nous permettra également d'explorer de près l'étude et la conception de capteurs intelligents à l'aide d'un microcontrôleur pour mesurer la déformation d'un pont. Nous étudierons différents types de ponts de mesure, tels que le pont de Wheatstone. Le chapitre suivant sera consacré à la réalisation d'une cellule de charge, composée d'un pont de Wheatstone, d'une carte Arduino et d'autres accessoires (affichage, acquisition des données avec d'autres applications). Nous inclurons une brève description de la carte Arduino UNO, de son microcontrôleur et de l'amplificateur d'instrumentation.

Le dernier chapitre présente la partie pratique, qui illustre en détail le processus de réalisation du capteur. Il inclut des étapes précises de l'assemblage du matériel, des tests de calibration, et des essais de performance. Les méthodes employées pour intégrer le pont de jauge avec la carte Arduino, configurer l'affichage, et effectuer l'acquisition des données seront expliquées pas à pas. Ce chapitre mettra en évidence les défis rencontrés et les solutions apportées, offrant ainsi une vision complète du développement pratique du capteur.

Problématique

La conception et la réalisation d'un capteur de force efficace nécessitent une méthodologie rigoureuse. La problématique principale est de choisir les composants appropriés (jauges de contrainte, amplificateurs, filtres, etc.) et de les intégrer de manière à obtenir des mesures précises et fiables tout en minimisant les coûts. La programmation du microcontrôleur pour traiter et afficher les données de manière efficace constitue également un défi crucial. Enfin, des tests approfondis doivent être menés pour valider la fiabilité et la précision du capteur sur une large gamme de charges, garantissant ainsi son utilité dans diverses applications.

Objectif

L’objectif principal de ce travail est de concevoir et réaliser un capteur de force fonctionnant en traction et compression. Munis de jauges de contraintes et d’instruments d’acquisition, nous avons imaginé un capteur à jauges d’extensomètre rependant mieux au type de sollicitation du corps d’épreuve qui est un cylindre branché à la canalisation hydraulique de la machine de traction. La variation de résistance de la jauge, qui résulte de son allongement, nous permet de connaitre précisément la sollicitation exercée sur le corps d’épreuve, donc de l’effort appliqué sur l’éprouvette.

Chapitre I Généralités sur les cellules de charge

I.1 Définition

Une cellule de charge est un capteur utilisé pour mesurer la force ou la charge exercée sur elle. Elle est généralement composée d'un élément de déformation, tel qu'un métal extensible ou une jauge de contrainte, qui se déforme sous l'effet de la force appliquée. Cette déformation est mesurée et convertie en signal électrique proportionnel à la force appliquée. Les cellules de charge sont largement utilisées dans diverses applications de pesage et de mesure de force, allant des balances de cuisine aux balances industrielles utilisées dans les usines et les entrepôts. Elles sont également utilisées dans des applications telles que le contrôle de processus industriels, les tests de matériaux, la surveillance de la charge dans les structures, etc. La précision, la sensibilité et la plage de mesure des cellules de charge peuvent varier en fonction de leur conception et de leur utilisation spécifique. Elles sont disponibles dans une gamme de tailles et de capacités pour répondre à différents besoins de mesure de force.

I.2 Principe de fonctionnement

Une cellule de charge est un capteur de force utilisé pour mesurer la force ou la pression dans diverses applications. Lorsqu'elle est associée à un Arduino et à un amplificateur, elle peut être utilisée pour mesurer avec précision la force appliquée sur elle.

Voici le principe de fonctionnement général d'une cellule de charge :

Pont de Wheatstone : Elle contient des jauges de contrainte qui varient leur résistance électrique en fonction de la force appliquée. Lorsqu'une force est appliquée sur la cellule, elle se déforme légèrement, ce qui modifie la résistance des jauges de contrainte.

Amplificateur : La variation de la résistance des jauges de contrainte est généralement très faible et nécessite donc d'être amplifiée pour être mesurée avec précision par l'Arduino. L'amplificateur amplifie ce signal faible pour le rendre plus facile à mesurer.

Arduino : est utilisé pour lire la tension de sortie de l'amplificateur. Cette tension est proportionnelle à la force appliquée sur la cellule de charge. En utilisant les fonctions de lecture analogique de l'Arduino, on peut convertir cette tension en une valeur numérique.

Étalonnage : Avant d'utiliser le système, il est souvent nécessaire de l'étalonner. Cela implique de mesurer la sortie de la cellule de charge pour différentes forces connues, puis de créer une formule pour convertir les lectures de tension en valeurs de force.

Traitement des données : Une fois que les valeurs de force sont obtenues à partir de la tension mesurée, on peut traiter selon les besoins d’application. Cela peut inclure l'affichage des valeurs

sur un écran, le contrôle des autres dispositifs en fonction de la force mesurée, ou l'enregistrement des données pour une analyse ultérieure.

En combinant les jauge, un amplificateur et un Arduino, on peut créer un système de mesure de force polyvalent et précis pour une variété d'applications telles que la pesée, le contrôle de tension, la détection de charge, etc.

I.3 Caractéristiques

Une cellule de charge est un capteur de force utilisé pour mesurer la force, la tension ou le poids. Voici quelques caractéristiques courantes associées aux cellules de charge :

Capacité de charge : C'est la charge maximale que la cellule de charge peut mesurer sans compromettre sa précision. Elle est généralement exprimée en unités de force telles que les newtons (N) ou les kilogrammes (kg).

Sensibilité : C'est la variation de la sortie électrique de la cellule de charge par unité de variation de la force appliquée. Elle est généralement exprimée en mV/V (millivolts par volt) ou en microvolts par volt (µV/V).

Précision : La précision d'une cellule de charge se réfère à sa capacité à mesurer avec exactitude la force appliquée. Elle peut être exprimée en pourcentage de la charge nominale ou en nombre de divisions de l'échelle.

Linéarité : Il s'agit de la capacité de la cellule de charge à produire une sortie proportionnelle à la force appliquée sur toute la plage de mesure. Une cellule de charge linéaire produira une réponse linéaire à une force appliquée.

Hystérésis : C'est la différence entre les sorties électriques de la cellule de charge lorsqu'une charge croissante et décroissante est appliquée. Une hystérésis plus faible indique une réponse plus stable de la cellule de charge.

Température de fonctionnement : Les caractéristiques de la cellule de charge peuvent varier en fonction de la température. La plage de température dans laquelle la cellule de charge fonctionne efficacement est donc une caractéristique importante à considérer.

Robustesse mécanique : Une cellule de charge doit être suffisamment robuste pour résister aux chocs et aux vibrations. Cela garantit sa durabilité dans divers environnements industriels.

Protection contre les surcharges : Certains types de cellules de charge sont conçus pour résister aux surcharges sans subir de dommages permanents.

I.4 Types de cellules de charge

Il existe plusieurs types de cellules de charge, chacun adapté à des applications spécifiques en fonction de leurs caractéristiques et de leurs performances. Voici quelques- types les plus courants :

I.4.1 Cellules de charge à jauges de contrainte

Ce sont les cellules de charge les plus courantes. Elles utilisent des jauges de contrainte, des fils minces de métal, collés ou soudés à la surface d'un élément de mesure. Lorsque la force est appliquée, la déformation de l'élément de mesure modifie la résistance électrique des jauges de contrainte, ce qui est mesuré pour déterminer la force appliquée.

Les cellules de charge à jauges de contrainte sont utilisées pour mesurer la force, la pression, le poids ou le couple dans diverses applications industrielles et scientifiques. Voici quelques types courants de cellules de charge à jauges de contrainte :

I.4.1.1 Cellules de Charge en compression

1. **Description** : Conçues pour mesurer des forces appliquées directement sur la surface de la cellule.
2. **Applications** : Pesage industriel, tests de matériaux, structures de ponts, presses hydrauliques.
3. **Caractéristiques** : Corps robuste souvent en acier inoxydable ou aluminium, configuration de pont de Wheatstone pour une sensibilité accrue.



Figure I-1Cellules de charge en compression

I.4.1.2 Cellules de Charge en Traction

1. **Description** : Conçues pour mesurer des forces de traction (tirage) .
2. **Applications** : Essais de traction, dispositifs de levage, surveillance de câbles.
3. **Caractéristiques** : Design étroit et allongé pour s'adapter aux forces de tirage, jauges de contrainte positionnées pour maximiser la détection des forces de traction.



Figure I-2 Cellule de charge en traction

I.4.1.3 Cellules de Charge de Type S

1. **Description** : Cellules de charge en forme de "S" qui peuvent mesurer à la fois des forces de compression et de traction.
2. **Applications** : Balances, essais de machines, systèmes de levage et de grutage.
3. **Caractéristiques** : Design compact et polyvalent, facile à installer dans différents systèmes



Figure I-3 Cellules de Charge de Type S

I.4.1.4 Cellules de Charge en Anneau (Donut Load cells)

1. **Description** : Cellules de charge en forme d'anneau avec un trou au centre pour les applications où la force est appliquée autour d'un élément de montage.
2. **Applications** : Mesure de force autour d'axes, applications de serrage, tests de boulons et de vis.
3. **Caractéristiques** : Forme circulaire adaptée aux forces centrées, robustesse et précision dans des environnements industriels.



Figure I-4 Cellules de charge en Anneau

I.4.1.5 Cellules de charge de cisaillement

1. **Description** : Utilisées pour mesurer les forces de cisaillement plutôt que les forces directes de compression ou de traction.
2. **Applications** : Surveillance des forces dans les ponts, structures et machines, mesures de couple.
3. **Caractéristiques** : Jauges de contrainte placées pour détecter les déformations de cisaillement, design résistant aux conditions environnementales difficiles.



Figure I-5 Cellules de charge de cisaillement

I.4.1.6 Cellules de charge de flexion

1. **Description** : Ces cellules permettent d'appliquer la force sur une sortie flexible, et sont généralement utilisées pour ajuster les fixations adjacentes sur la surface de la sortie.
2. **Applications** : Essais de matériaux, surveillance de structures, mesure de dynamique de charge.
3. **Caractéristiques** : Conception permettant la correction d'un port sous charge, afin qu'il soit utilisé dans des applications ou la flexion soit en mode déformation principale.



Figure I-6 Cellules de charge et de flexion

I.4.1.7 Cellules de charge de torsion

Description :il est important que le couple applique sa hache sur le produit qui blesse la cellule.

Applications : tests de couples sur lignes de transmission, analyse des rotations de machines, surveillance de couples dans les systèmes industriels.

Caractéristiques : jauges de lieux contrastés pour détecter la déformation par torsion, robustesse et précision pour les applications de mesure de couple.



Figure I-7 Cellule de charge de torsion

I.4.1.8 Cellules de charge hydraulique

Elles mesurent la force en utilisant la pression hydraulique pour détecter la déformation d'un élément sensible à la force.



Figure I-8 Cellule de charge Hydraulique

I.4.1.9 Cellules de charge Piézoélectrique

Elles mesurent la force en convertissant la pression mécanique en une charge électrique à l'aide de matériaux piézoélectriques.



Figure I-9 Cellule de charge Piézoélectrique

I.5 Domaines d'utilisation

L'utilisation des cellules de charge peut être très diversifiée en fonction des besoins spécifiques de l'application.

Voici quelques exemples courants d'utilisation des cellules de charge :

Pesage industriel : Les cellules de charge sont largement utilisées dans les balances industrielles pour peser des matériaux en vrac, des produits finis ou des véhicules.

Automatisation industrielle : Elles sont intégrées dans des systèmes automatisés pour contrôler et surveiller les processus de fabrication, tels que le dosage de matériaux, le remplissage de réservoirs ou la mesure de la tension dans les bandes de matériau.

Tests de matériaux : Les cellules de charge sont utilisées dans les laboratoires pour mesurer la force nécessaire pour déformer, plier ou casser différents matériaux lors de tests de résistance et de durabilité.

Applications médicales : Elles sont utilisées dans les équipements médicaux pour mesurer le poids des patients, la force musculaire lors de la réhabilitation ou le contrôle de la force appliquée lors de la chirurgie robotique.

Agriculture et environnement : Les cellules de charge sont utilisées dans les systèmes de pesage de récoltes, de contrôle du niveau d'irrigation ou de surveillance de la charge dans les silos agricoles.

Sécurité et contrôle d'accès : Elles peuvent être utilisées dans les portiques de sécurité pour détecter les charges excessives, les systèmes de contrôle d'accès pour surveiller le nombre de personnes entrant ou sortant d'un bâtiment, ou dans les systèmes de sécurité des ascenseurs pour contrôler la charge maximale autorisée.

Construction et génie civil : Elles sont utilisées dans les essais de résistance des structures, la surveillance de la charge sur les ponts, les barrages ou les bâtiments, ainsi que dans les systèmes de pesage de camions sur les chantiers de construction.

Équipements sportifs et de conditionnement physique : Elles peuvent être intégrées dans des équipements de musculation pour mesurer la force exercée par l'utilisateur, ou dans des équipements sportifs pour mesurer la force d'impact lors d'événements sportifs.

I.6 CONCLUSUION

En résumé, les cellules de charge sont utilisées dans une grande variété d'applications où la mesure précise de la force, du poids ou de la tension est nécessaire, voici quelques avantages de cellule de charge :

Précision : Les cellules de charge peuvent offrir une mesure précise de la force, du poids ou de la tension, ce qui en fait des capteurs fiables pour de nombreuses applications.

Polyvalence : Elles peuvent être utilisées dans une grande variété d'applications, des balances industrielles aux équipements médicaux en passant par les tests de matériaux.

Fiabilité : Avec des conceptions robustes et une durabilité élevée, les cellules de charge peuvent fonctionner de manière fiable dans des environnements industriels difficiles.

Facilité d'intégration Elles peuvent être facilement intégrées dans des systèmes automatisés ou des équipements existants grâce à leur compatibilité avec de nombreux types d’interfaces de communication.

Chapitre II Généralités sur les jauges

II.1 Introduction

Les capteurs de jauge de contrainte sont des dispositifs essentiels dans le domaine de la mesure et de la surveillance des contraintes et des déformations. Utilisés dans diverses industries, de l'aéronautique à la construction civile.

II.2 La contrainte

II.2.1 Définition de la contrainte

On peut définir simplement la contrainte comme étant une force appliquée à une certaine. Tout solide possède une force qui lui est propre pour résister à la contrainte.

Lorsque la contrainte dépasse la résistance du matériel, l'objet est déformé et il s'ensuit dans la forme et/ou le volume. Il existe des cas où la déformation n'est cependant pas perceptible à l'œil nu mais détectée seulement par des appareils sensibles.

Le bris d'un vase qu'on échappe par terre est permanent, alors que la déformation d'une balade de tennis due à l'impact sur la raquette est éphémère. On reconnaît trois principaux types de déformations : élastique, plastique et cassante. Le schéma qui suit montre la relation générale entre contrainte et déformation :

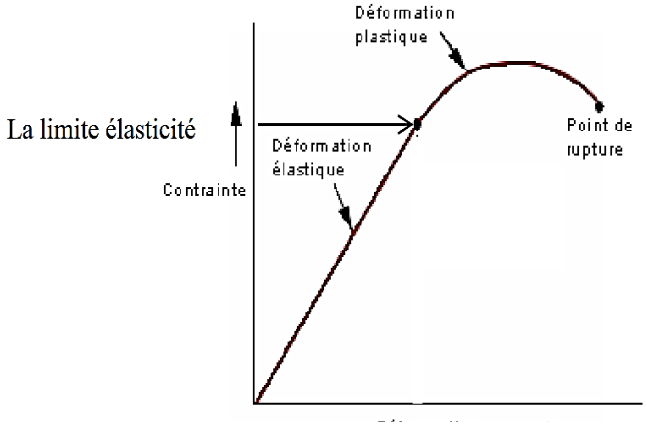


Figure II-1 Courbe contraint-déformation pour un alliage métallique

II.2.2 Les différents types de contraintes mécaniques

On peut citer trois types de contraintes de déformation élastique :

- La traction-compression.
- La flexion : peut se modéliser selon les cas comme une traction- compression ou comme un cisaillement.
- La torsion : se modélise comme un cisaillement.

II.2.3 Contrainte de traction-compression

La traction et la pression constituent les types de contraintes les plus simples.

Un état de tension mécanique homogène s'établit dans l'échantillon de traction.

Une pièce parallélépipédique de section S est soumise à une traction suivant sa plus grande dimension. Un segment longitudinal de longueur initiale L s'allongera sous l'effet de l'attraction d'une quantité delta ΔL.

L'allongement relatif (ou déformation longitudinale) sera par définition :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L}{L} \qquad (2.1)$$

Un segment transversal de longueur initiale **l** se contractera sous l'effet de la traction d'une quantité ΔI. La déformation transversale correspondante est alors :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta l}{l} \qquad (2.2)$$

L'allongement relatif ε_{zz} et la contraction ε_{xx} sont proportionnels :

$$\varepsilon_{xx} = -\nu.\varepsilon_{zz} \qquad (2.3)$$

ν : est le coefficient de poisson. C'est un nombre sans dimension et vaut approximativement 0.3 pour la plupart des alliages métalliques.

D'après la loi de Hooke la tension et l'allongement sont liés par le module d'élasticité ***E***:

$$\sigma = \frac{F}{S} = E\varepsilon \qquad (2.4)$$

Le facteur de proportionnalité (E) qui lie la contrainte à la déformation, est le module d'élasticité ou module de YOUNG.

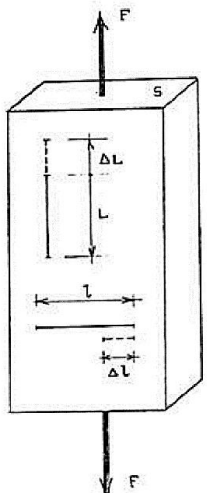


Figure II-2 Eprouvette d'essai de traction.

II.2.4 Contrainte de flexion

Ce système est similaire à une poutre maintenue fixement à une ou deux extrémités. On peut citer plusieurs systèmes mécaniques ou de construction de même type tels que :

• Plongeoirs Piscine

• Ponts

• Supports d'étagère

• Ailes d'avion

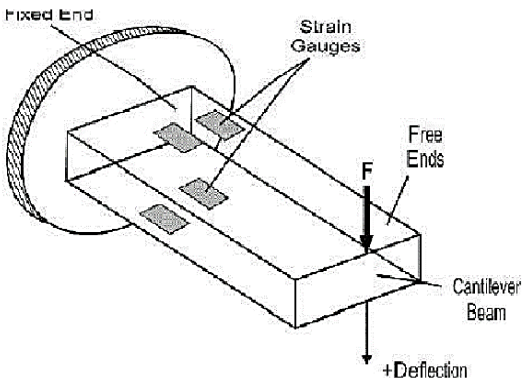


Figure II-3 Poutre de flexion.

Dans notre cas, la poutre se plie vers le bas. Quatre jauges de contrainte standards mesurent la flexion et des contraintes de compression dans l'axe de la poutre.

Pour la détermination expérimentale des contraintes de flexion, la poutre en flexion est munie de deux jauges de contrainte coté pression et coté traction.

Les jauges d'un côté sont disposées en diagonale dans le pont. Ainsi tous les changements de résistances s'additionnent et on obtient une sensibilité élevée.

La tension de sortie du pont est référenciée à la tension d'alimentation. Avec la sensibilité de la jauge, l'allongement peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\varepsilon = \frac{1}{K}\frac{V_{out}}{V_{in}} \qquad (2.6)$$

II.2.5 Contrainte de torsion

La torsion est la sollicitation subie par un corps soumis à l'action d'un couple de forces opposées agissant dans des plans parallèles et dont l'élément de réduction est un moment de force agissant dans l'axe de la poutre.

Pour la détermination de la contrainte de torsion ; l'éprouvette est menue de quatre jauges disposées suivant un angle de 45 degrés.

Les jauges sont ainsi placées dans la direction des principales tensions normales, donc dans à celle du plus fort allongement ; les jauge de contraintes de même allongement sont disposée à en diagonales dans le montage en pont.

Ainsi tous les changements de résistances s'additionnent et on obtient une sensibilité élevée.

L'allongement peut être calculer avec la même formule utilisée pour la flexion (2.6).

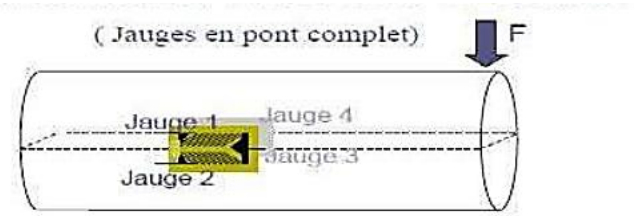


Figure II-4 Eprouvette d'essai de torsion.

II.3 La déformation

II.3.1 Définition de la déformation

Sous l'action d'un chargement, tous les corps subissent un changement de forme, de position et d'orientation entre un état initial avant application de la charge et un état final aprés son application. Les déformations caractérisent le changement de forme local en tout point du matériau, indépendamment de sa nature et de ses caractéristiques de résistance

II.3.2 Différents types de déformations

La contrainte détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres. Cette contrainte est, pour une traction simple, la force qui agit sur une unité de surface du matériau.

La déformation indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques (à l'échelle microscopique) et la structure elle-même (l'objet, à l'échelle macroscopique) ont été déformées. La déformation, pour une traction simple, est le rapport de l'allongement à la longueur initiale.

II.4 Les propriétés mécaniques

II.4.1 Module d'Young et coefficient de Poisson

Vers 1800 Young, médecin de formation, s'intéresse à l'élasticité de la cornée. En procédant à des essais de traction uni-axiale, il constate que la déformation mesurée selon l'axe de traction est proportionnelle à la contrainte appliquée. Il définit le coefficient de proportionnalité $E=\varepsilon/\sigma$. Poisson complète l'analyse en constatant que l'allongement dans la direction de l'axe de traction s'accompagne d'un raccourcissement plus faible proportionnel dans les directions perpendiculaires. Il définit le coefficient de proportionnalité :

$$\upsilon = -\frac{\varepsilon_l}{\varepsilon_{ll}} \qquad (2.7)$$

- ✓ υ : est le coefficient de Poisson
- ✓ ε_l : est la déformation latérale
- ✓ ε_{ll} : est la déformation longitudinale.

Module de Young E a la dimension d'une contrainte et se mesure généralement en GPa. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une déformation unité, soit doubler la longueur initiale. Aucun matériau ne répond linéairement à une telle contrainte, la plupart cèdent bien avant.

Le coefficient de Poisson varie entre -1 et 0.5 pour la plupart des matériaux. Un coefficient de Poisson de 0 signifie qu'il n'y a pas de changement de dimension transversale lorsque le matériau est étiré ou comprimé, ce qui est rare dans la pratique. Un coefficient de Poisson de 0.5 est associé aux matériaux incompressibles, tandis que les métaux et les polymères ont généralement des coefficients de Poisson plus bas.

II.5 Les jauges extensométriques

II.5.1 Jauge de contrainte

a. Définition

Une jauge de contrainte est généralement un mince fil ou une fine feuille métallique qui est fixée à la surface d'un matériau. Lorsque le matériau est soumis à une contrainte, il se déforme, ce qui entraîne une variation de la résistance électrique de la jauge de contrainte. Cette variation de résistance est ensuite mesurée à l'aide d'un circuit électrique pour déterminer la quantité de contrainte appliquée au matériau. Les jauges de contrainte sont utilisées dans de nombreuses applications, telles que la mesure de la tension dans les structures, la détection de force dans les capteurs de poids, et même dans les applications médicales pour mesurer la pression artérielle. C'est une technologie vraiment intéressante qui permet de mesurer avec précision les contraintes mécaniques.

II.5.1.1 Fonctionnement des jauges de contrainte

La jauge est un petit élément résistif qui est collé sur une pièce au point où on veut mesurer la déformation. Cet élément est fabriqué à l'aide d'un fil fin enroulé selon une direction préférentielle et colée a la pièce par l'intermédiaire d'un support d'isolation. Lorsque la pièce est soumise au chargement ça déformation est transférée par la colle et le support vers la jauge par conséquence une variation proportionnelle de la résistance est obtenue. Admettant que le fil va subir les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée.

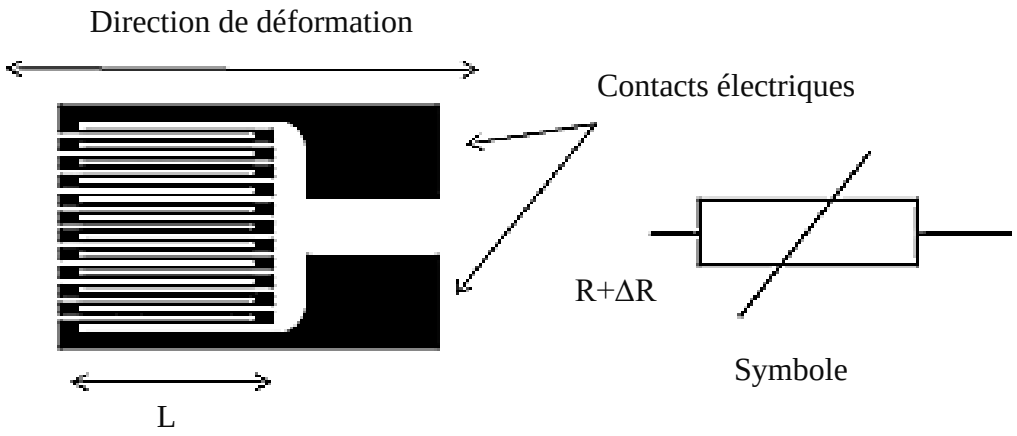


Figure II-5Schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de contrainte

II.5.2 Facteur de jauge

Le facteur de jauge K d'une jauge de contrainte est le facteur de proportionnalité entre la Variation de résistance et la déformation à mesurer :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L} \qquad (2.8)$$

Le facteur de jauge, un nombre sans dimension, est parfois aussi appelé le facteur K.

Ce facteur de jauge est déterminé pour chaque lot de production par mesure et est précisé sur chaque paquet de jauges de contrainte comme valeur nominale avec tolérance et qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques, K est environ 2. Pour les jauges semi- conductrices, la valeur absolue de k est comprise entre 100 et 200 qui ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température.

II.5.3 Les différents types de jauges de contraintes :

- ✓ **Jauges semi-conductrices :** Ces jauges utilisent des matériaux semi-conducteurs comme le silicium pour mesurer les contraintes. Elles sont moins sensibles aux variations de

température que les jauges métalliques, ce qui les rend appropriées pour une utilisation dans des environnements à températures élevées ou variables

- ✓ **Jauge métallique résistives :** Ces jauges sont fabriquées à partir de matériaux métalliques tels que le constantan, le nickel, le chrome-nickel ou l'aluminium. Elles sont généralement utilisées dans des environnements à température ambiante et sont sensibles aux variations de température, ce qui peut nécessiter une compensation.
- ✓ **Jauge Extenso métrique (jauge de contraintes en traction /compression) :** Les jauges extenso métriques sont les plus couramment utilisées et sont conçues pour mesurer la déformation linéaire due à la tension ou à la compression, sont utilisées dans une large gamme d'applications, notamment la surveillance des structures, la mesure de la contrainte dans les matériaux, les essais de matériaux, etc.
- ✓ **Jauges de cisaillement** : Les jauges de cisaillement sont spécifiquement conçues pour mesurer les déformations dues aux forces de cisaillement, elles sont utilisées dans les applications où la déformation due au cisaillement est prédominante, telles que les capteurs de couple et les essais de torsion.
- ✓ **Jauges de flexion** : Les jauges de flexion sont utilisées pour mesurer la flexion ou la courbure d'une structure soumise à une charge, elles sont souvent utilisées dans les capteurs de force, les capteurs de pesage et les capteurs de déplacement linéaire.
- ✓ **Jauges de torsion** : Les jauges de torsion sont spécialement conçues pour mesurer la torsion d'une structure ou d'un objet. Elles sont utilisées dans les capteurs de couple, les dynamomètres et d'autres applications où la torsion est une mesure importante.
- ✓ **Jauges de pression** : Les jauges de pression mesurent la déformation d'une membrane soumise à une pression, et sont utilisées pour mesurer la pression dans les capteurs de pression. Elles sont disponibles dans différentes configurations, y compris les jauges de contraintes en forme de demi-point et les jauges de contraintes en forme de plein pont.
- ✓ **Jauges de température** : Les jauges de température sont conçues pour mesurer les variations de température à l'aide de la déformation thermique d'un matériau. Elles sont utilisées dans les capteurs de température et les thermistances.

II.5.4 Jauges de déformation

Les jauges de déformation sont souvent utilisées pour mesurer la contrainte appliquée à un matériau, généralement sous forme de contrainte normale (tension ou compression). La variation de résistance d'une jauge de déformation est directement liée à la contrainte appliquée et peut être exprimée par l'équation de jauge de déformation. Voici l'équation générale pour une jauge de contrainte :

$$\Delta R = R.K.\varepsilon \qquad (2.9)$$

Où :

- ✓ ΔR : est la variation de résistance de la jauge de déformation.
- ✓ R : est la résistance initiale de la jauge de déformation (à l'état non déformé).
- ✓ K : est le facteur de jauge, qui dépend du matériau et de la géométrie de la jauge de déformation.
- ✓ ε : est la déformation de la jauge.

La déformation ε peut être calculée à partir de la variation de résistance mesurée ΔR en utilisant la loi de Hooke, qui relie la contrainte à la déformation. Pour une contrainte normale (tension ou compression), la loi de Hooke peut être écrite comme suit :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{K}\frac{\Delta R}{R} \qquad (2.10)$$

En combinant les deux équations, on peut obtenir une expression pour la contrainte σ en fonction de la variation de résistance ΔR :

$$\sigma = \frac{E}{K}\frac{\Delta R}{R} \qquad (2.11)$$

Il est important de noter que le facteur de jauge K et la longueur initiale L doivent être pris en compte pour obtenir des mesures précises de contrainte à partir de la variation de résistance de la jauge de déformation.

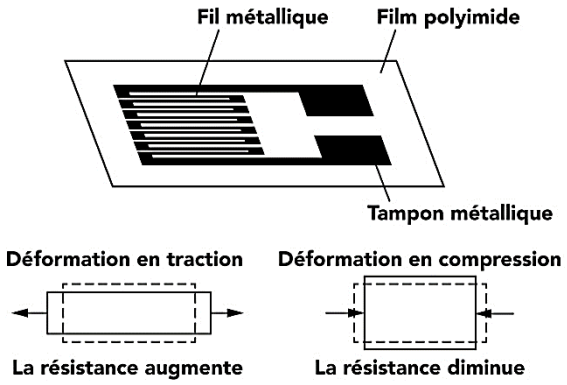


Figure II-6 Schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation

II.6 Conditionnement des jauges

II.6.1 Définition du pont de Wheatstone

Le montage d'un pont de Wheatstone est une méthode utilisée pour mesurer de petites variations de résistance électrique, souvent utilisée avec des jauges de déformation. Voici les étapes générales pour le montage d'un pont de Wheatstone :

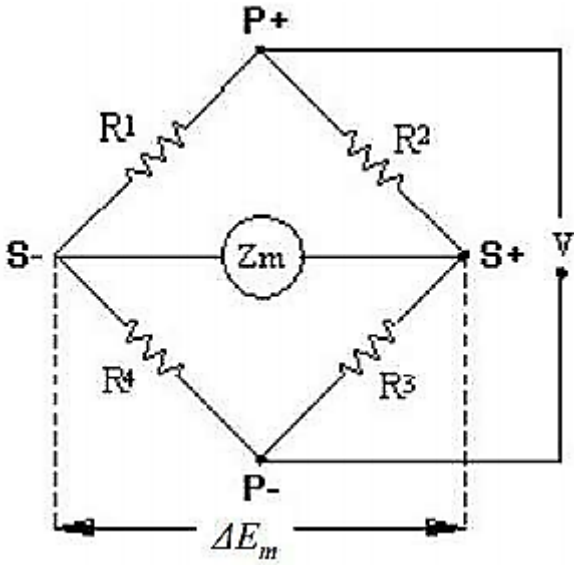


Figure II-7 Pont de Wheatstone.

- **Disposition des composants**

Rassemblez les composants nécessaires, y compris les résistances de compensation, la jauge de déformation et les fils de connexion.

Planifiez la disposition des composants sur une surface de montage, en veillant à ce que les connexions entre eux soient claires et accessibles.

- **Connexion des résistances de compensation**

Pour compenser les variations de température et autres facteurs, utilisez des résistances de compensation (également appelées résistances de pont) qui sont de valeurs similaires à celles de la jauge de déformation.

Connectez les résistances de compensation dans un pont de Wheatstone complet, avec une résistance de compensation en série avec chaque branche du pont.

Au départ, si $V_{out} = 0$

Alors :
$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \qquad (2.12)$$

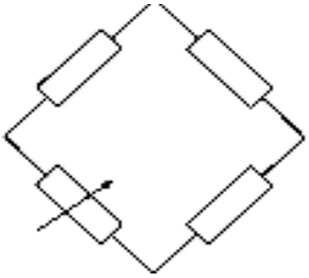
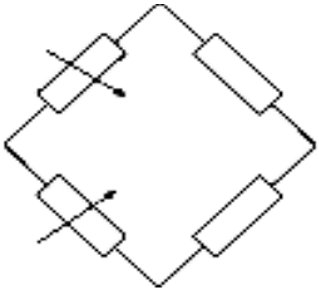
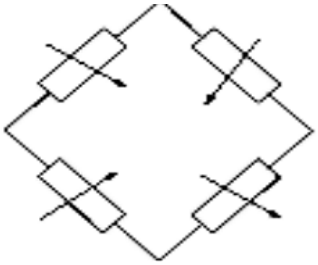
Il est important de noter quelques points clés :

- Les éléments adjacents dans le pont de Wheatstone ont des signes opposés, tandis que

les éléments opposés ont des signes identiques

- Pour des mesures très précises, il peut être nécessaire de compenser les variations de longueur des lignes, induites par la température (T), qui pourraient être de l'ordre de grandeur des mesures désirées.
- Les configurations principales de montage sont résumées dans le tableau suivant : [tableau à inclure ici]

Tableau II-1les principales configurations du pont de Wheatstone.

Montage en quart de pont	**Montage en demi-pont**	**Montage en pont complet**
		
Une seule résistance varie	Deux résistances varient : Soit des adjacentes. Soit des Opposés comportement Dépend du choix. Mais généralement si 2 Branches adjacentes	Les quatre Résistances varient selon Les configurations de montage
Montage non linéaire	Montage linéaire	Montage linéaire.
Montage sensible à la Température	Compensation de Température	Une meilleure sensibilité à la Température, Compense les efforts Parasites sont compensé)

II.6.2 Principe de fonctionnement

Le pont de Wheatstone contient quatre résistances disposées selon le schéma ci-dessous. Ce pont fonctionne par le principe représenté dans la figure ci-dessous

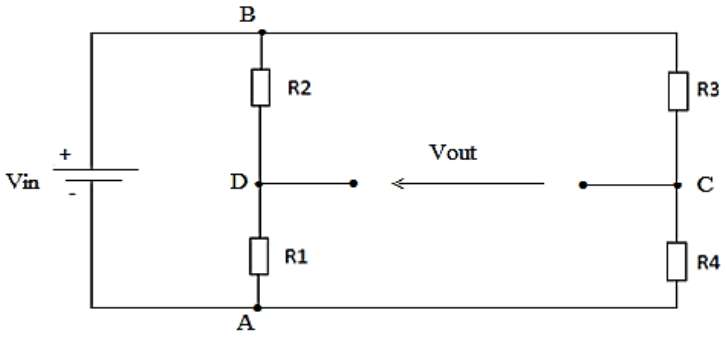


Figure II-8 Principe de fonctionnement du pont de Wheatstone

Ce qui nous intéresse dans le montage est la variation de tension entre les points C et Contenant un galvanomètre qui détecte cette variation une fois A et B sont reliés à une source de tension ou de courant. En appliquant le théorème de MILMAN en C et D, on obtient :

$$v_c = \frac{\frac{V_A}{R_4}+\frac{V_B}{R_3}}{\frac{1}{R_4}+\frac{1}{R_3}} = \frac{v_A R_3 + v_B R_4}{R_3 + R_4} \qquad (2.13)$$

$$v_c = \frac{\frac{V_A}{R_1}+\frac{V_B}{R_2}}{\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}} = \frac{v_A R_2 + V_B R_1}{R_2 + R_1}$$

Avec :

$$v_{int=V_{B-V_A}} \qquad \text{et} \qquad V_{out} = V_D - V_C$$

On a l'équation du pont

$$V_{OUT} = V_{int}\,\frac{(R1R3 + R4R2)}{(R1R2)(R3R4)} \qquad (II\text{-}1)$$

Pour que le pont soit équilibré $Vout$ = 0 a condition suivante doit être vérifiée

$$(R_1R_3 - R_2R_4) = 0 \quad (II\text{-}2)$$

a. Quart de pont (pont simple)

On prend $R_{1=}R_{2=}R_{3=}R_{4=}R$ avec $R_{1=}j_1 + \Delta R$ (ou $R_3 = j_3 + \Delta R$).

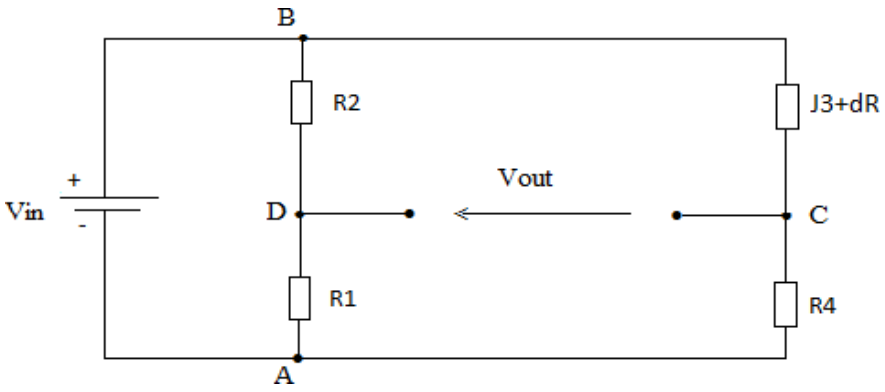


Figure II-9 Schéma de principe du montage pont simple

On obtient comme résultat :

$$V_{out} = \frac{V_{int} \cdot \Delta R}{4R} \text{ II-3)}$$

Ce montage est simple et moins couteux mais avec des inconvénients

- Une résistance est induite par la longueur de câble en cas où la jauge est éloignée des autres résistances.
- La sensibilité du capteur (qui varie proportionnellement à la tension d'alimentation)
- Une perte d'information est causée par La résistance du câblage ajouté. Par exemple, un câble de 100 mètres conduit à une variation de 10 %.
- On peut doubler la sensibilité du pont à la déformation en rendant deux jauges actives dans une configuration en demi-point.

II.6.2.1 Montage en demi-pont

Le pont est initialement équilibré mais $J3$ varie de $+dR$ et $J4$ de $-dR$.

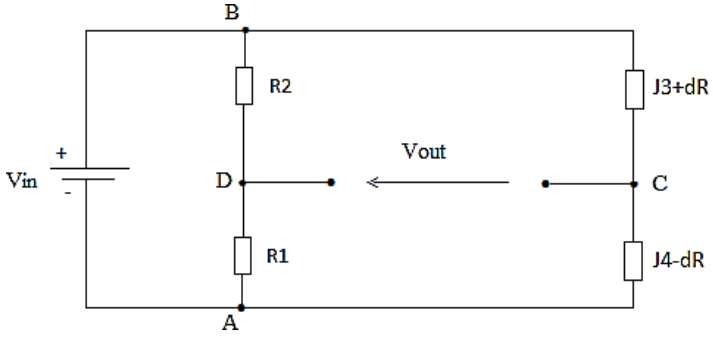


Figure II-10Schéma de principe du montage en demi-pont

On trouve :

$$V_{out} = \frac{V_{int}\Delta R}{2R} \text{ II-4)}$$

- Ce montage est utilisé souvent pour faire des corrections en température sur matériaux à mesurer.
- Il est aussi utilisé pour supprimer la composante de traction (ou compression) lors de mesures de flexion

II.6.2.2 Pont complet

Dans ce cas et en adoptant toujours la condition du pont équilibré

$J_1 et J_3 variede + \Delta R et J_2 et J_4\ de - \Delta R et J_3 = J_4 J_2 = J_1 = R$

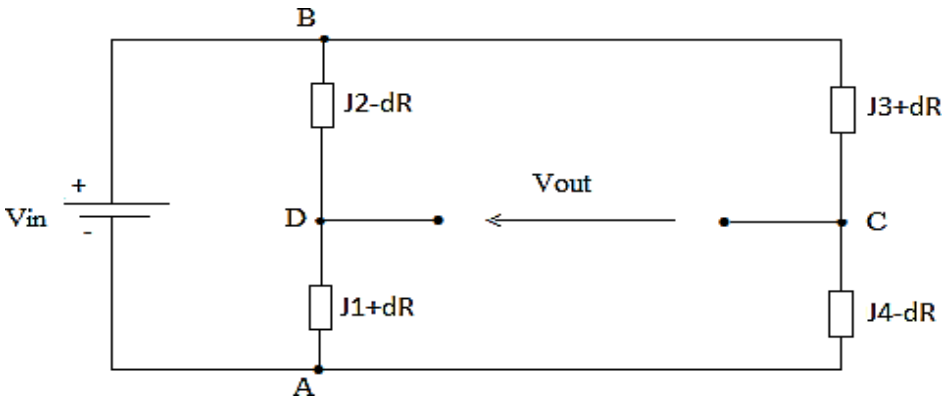


Figure II-11 Schéma de principe du montage pont complet.

Donc l'équation de base devient alors

$$V_{out} = \frac{V.\Delta R}{2R}$$

La tension de mesure est dans ce cas une fonction rigoureusement linéaire des variations de résistance.

Le pont de Wheatstone réalise l'auto-compensassions des termes quadratiques et par conséquent présente une réponse parfaitement linéaire.

Généralement, le choix du montage dépend de la géométrie du capteur.

II.6.3 Méthodes de mesure pour les jauges résistives :

Le pont de Wheatstone est un circuit qui permet de mettre en évidence une variation de résistance. Ce circuit comprend quatre résistances électriques dont une ou plusieurs peuvent être remplacées par des jauges actives.

Le pont est alimenté par une tension v_{int}(continue ou alternative). Avant l'application d'une déformation le pont est ajusté par variation des résistances, de façon que la tension de sortie v_{out}s'annule. Selon le type de pont utilisé, des potentiomètres de faible résistance doivent être branchés dans le circuit. Le pont est équilibré (v_{out}= 0) lorsque :

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_3} \rightarrow V_{out} = \mathbf{0}$$

Après remplacement deR_1 par une jauge et en laissant $R2$, $R3$ et $R4$ comme résistances fixes et équilibrées avant déformation de la jauge, la variation $\Delta R1$de $R1$ provoque un déséquilibre et la tentions de sortie V_{out}sortie devient

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \qquad \text{(II-5)}$$

Pratiquement, on utilise trois résistances ($R2$, $R3$ $etR4$) d'une valeur identique à la valeur nominale $R1$ de la jauge, qui pour les jauges métalliques, vaut typiquement 300Ω. Puis, en tenant compte que $\Delta R_1 << R_1$, la formule se présente sous une forme plus simple et la tension de sortie du pont déséquilibré devient directement proportionnelle à $\Delta R1$:

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = \frac{\Delta R_1}{4.R_1} = \frac{1}{4} K\varepsilon \qquad \text{(II-6)}$$

Comme une variation de la température provoque également une variation des résistances, la jauge et les trois résistances fixes doivent être soigneusement tenues à la température à laquelle on a équilibré le pont. Comme mesure de prévention on utilise des résistances fixes fabriquées avec le même alliage que la jauge. Ainsi les variations thermiques de toutes les 4 résistances sont identiques et ne peuvent pas déséquilibrer le pont. De plus il est une bonne pratique de coller aussi les trois résistances fixes sur l'éprouvette. Ceci peut être fait à un endroit mécaniquement non sollicité. Une autre alternative encore plus avantageuse est l'utilisation du pont complet. Il comporte directement quatre jauges actives sans résistances fixes. Elles doivent être collées sur le corps d'épreuve de façon que les variations des résistances s'additionnent et augmentent ainsi la tension de sortie.

Un pont en équilibre avec les résistances Ri et déséquilibré par les ΔRI Donne une tension de sortie $Vout$ de :

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta_{R_1}}{R_1} - \frac{\Delta_{R_2}}{R_2} - \frac{\Delta_{R_3}}{R_3} - \frac{\Delta_{R_4}}{R_4}\right) \text{II-7}$$

En désignant les déformations dans le sens des jauges à leur endroit par εi :

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = \frac{K}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \qquad \text{(II-8)}$$

II.6.4 Position des jauges dans un pont complet et mesure du rapport déformations / réaction électrique en traction/compression uni axiale :

Les jauges R1 et R3 sont arrangées suivant l'axe de la contrainte uni axiale et mesurent la déformation longitudinale alors que les jauges R2 et R4 sont disposées dans le sens orthogonale mesurent la déformation transversale.

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = \frac{K}{2}(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) = \frac{K}{2}(1+\mu)\varepsilon_{zz} \qquad \text{(II-9)}$$

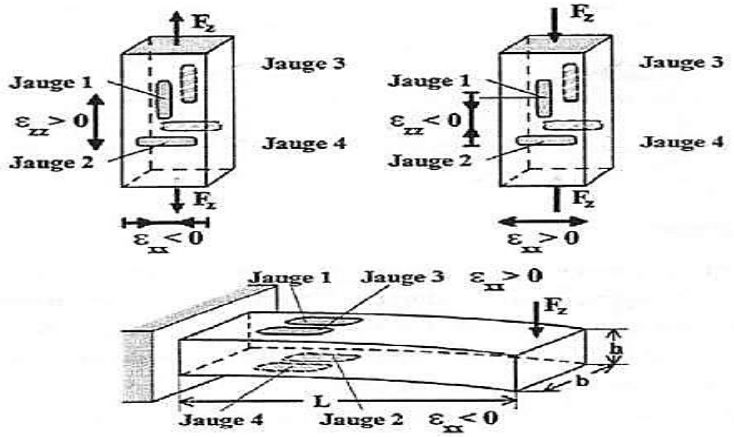


Figure II-12: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction, compression et en flexion

II.6.5 Position des jauges et mesure de déformations en flexion

Les jauges R1 et R3 sont sous traction et les jauges R2 et R4 sous compression

$$\frac{V_{out}}{V_{int}} = K\varepsilon_{zz} \text{II-10)}$$

En flexion, les quatre jauges actives augmentent donc la résolution de quatre fois par rapport à un pont, qui ne contient qu'une seule jauge active (quart de pont). D'autre arrangements comme le demi- pont avec deux jauges actives et deux résistances fixes sont évidemment possibles et s'appliquent selon les circonstances (forme de la pièce surveiller, accessibilité. Pour collage etc.). La plupart des capteurs de déplacement basés sur les jauges d'extensomètre profitent de l'avantage de la compensation de température et de la résolution élevée d'un pont complet. Le type de capteurs de déplacement préféré, constitue la lame en flexion, équipée de quatre jauges.

II.6.6 Caractéristiques et avantage de la jauge de contrainte dans le pont de Wheatstone

Le constantan est le matériau le plus utilisé pour la fabrication de jauges dont les caractéristiques sont :

- ✓ Linéaire même pour de grandes déformations.
- ✓ Grande résistance pour de petite longueur, ce qui permet de réaliser de très petites jauges.
- ✓ Très stable aux les changements de température, ce qui est très fréquent dans la mesure de déformations avec des jauges.
- ✓ Collage sur un support à étudier pour un capteur passif et nécessite donc un circuit de conditionnement.
- ✓ C'est la technique expérimentale la plus utilisée pour la mesure de contrainte pour plusieurs raisons : Fiabilité des mesures, précision obtenu, simplicité de mise en œuvre par rapport à d'autres méthodes et coût faible.

L'utilisation des jauges de contrainte se fait aussi bien en laboratoire et dans les milieux extérieurs (industrie, chantier, structures…etc.) pour la mesure de contrainte (en statique ou dynamique) pour la fabrication de capteurs ou comme indicateur de fissure ou de fatigue.

II.7 CONCLUSION

Notre système, qui intègre un pont de Wheatstone, une carte ARDUINO UNO et un amplificateur d'instrumentation, pourrait représenter une alternative moderne aux anciens systèmes de mesure analogiques pour des applications de traction, de compression, ou autres. Après un développement approprié, ce système pourrait être adapté à une variété d'autres applications.

Chapitre III Conception et réalisation de l’acquisition

III.1 Introduction

Les jauges de contraintes permettent de déterminer de manière simple et fiable la répartition des contraintes et des déformations sur des composants réel ou éprouvettes soumis à une force. Cette technique est largement utilisée dans l'analyse expérimentale des contraintes, de plus les jauges de contraintes sont très répandues dans la fabrication de capteur (pesage, de force, couple…etc.), notre système va introduire cette technique de jauge de contrainte qui permet l'étude des contraintes simples de la traction et la compression pour comparer aussi les valeurs mesurées et les valeurs calculées. Cette application permet aussi la connexion et le test des différents ponts toute en offrant une amplification de mesure à l'aide d'un amplificateur d'instrumentation qui est lié au microcontrôleur de la carte Arduino qui permet le calcul de la force et de déformation.

Ces données acquises seront traitées finalement par un programme qui permet à son tour la visualisation des outputs (force et déformation) en courbes.

III.2 Structure générale du système électronique à réaliser

Notre système, qui intègre un pont de Wheatstone, une carte ARDUINO UNO et un amplificateur d'instrumentation, pourrait représenter une alternative moderne aux anciens systèmes de mesure analogiques pour des applications de traction, de compression, ou autres. Après un développement approprié, ce système pourrait être adapté à une variété d'autres applications.

Nous proposons alors le schéma électrique suivant :

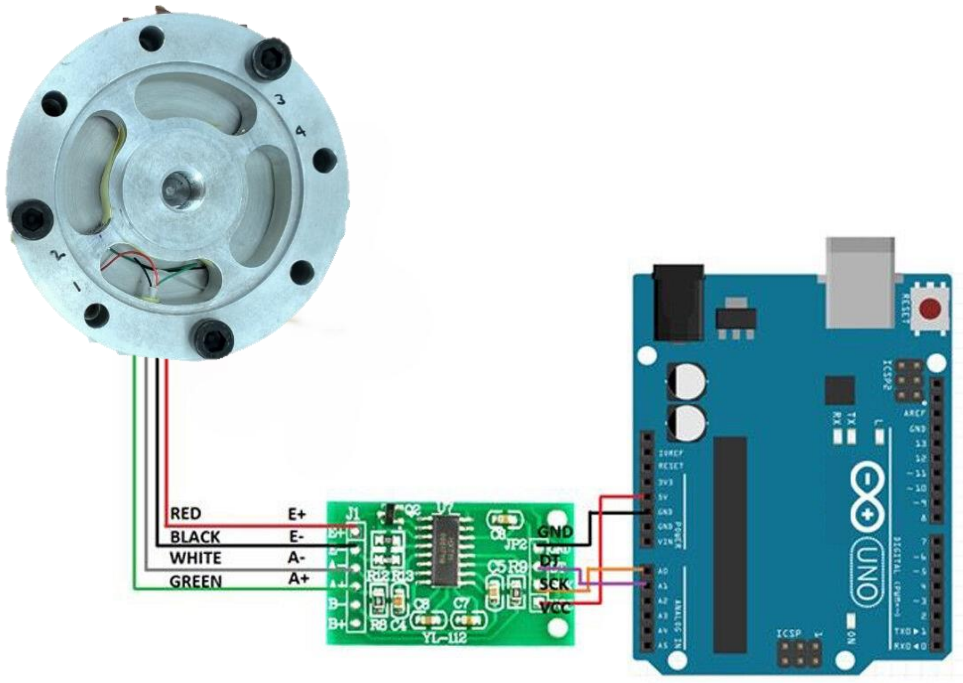


Figure III-1**:** Les différents blocs du système

III.3 Technique de montage d'une jauge (type de montage)

Il existe plusieurs techniques de montage pour fixer une jauge de déformation sur une surface.

Voici quelques-unes des techniques les plus couramment utilisées :

III.3.1.1 Collage adhésif

- Cette méthode consiste à utiliser un adhésif spécifique pour fixer la jauge de déformation sur la surface à mesurer.
- Avant d'appliquer l'adhésif, il faut s'assurer que la surface est propre et exempte de graisse ou de contaminants.
- Applique l'adhésif sur la jauge et sur la surface de montage, puis pressez la jauge fermement en place.
- Laissez l'adhésif durcir selon les instructions du fabricant avant de procéder à toute mesure.

III.3.1.2 Soudure

- Pour les surfaces métalliques, la jauge de déformation peut être soudée en place.
- Assurez-vous de sélectionner une méthode de soudure appropriée qui n'endommagera pas la jauge ou les composants sensibles.
- La soudure par points est souvent utilisée pour minimiser la chaleur appliquée à la jauge.

III.3.1.3 Fixation mécanique

- Cette méthode implique l'utilisation de boulons, de vis ou d'autres dispositifs de fixation pour maintenir la jauge de déformation en place.
- Des trous de montage sont prévus dans la jauge et la surface de montage pour permettre la fixation mécanique.
- Assurez-vous que les fixations ne perturbent pas les mesures ou n'introduisent pas de contraintes indésirables.

III.3.1.4 Colles conductrices

- Dans certaines applications, des colles conductrices peuvent être utilisées pour fixer la jauge de déformation tout en maintenant la conductivité électrique nécessaire pour les mesures.
- Ces colles spéciales assurent une adhérence forte tout en minimisant l'impact sur la mesure de la déformation.
- Dans notre montage on a utilisé Technique décollage.

III.4 Montage de la jauge

Le montage d'une jauge de déformation, également appelé montage de jauge, est une étape critique pour assurer des mesures précises des contraintes mécaniques. Voici les étapes générales pour le montage d'une jauge de déformation :

- **Préparation de la surface** : Assurez-vous que la surface sur laquelle vous allez monter la jauge de déformation est propre, sèche et exempte de toute contamination. Nettoyez la surface avec un solvant approprié pour éliminer toute graisse, poussière ou autre substance pouvant affecter l'adhérence de la jauge.

- **Choix de l’emplacement :** Déterminez l'emplacement optimal pour monter la jauge de déformation en fonction de la zone où vous souhaitez mesurer les contraintes. Assurez-vous que la surface est suffisamment plane et que la jauge peut être fixée de manière sécurisée.

- **Fixation de la jauge** : Utilisez un adhésif approprié pour fixer la jauge de déformation à la surface. Appliquez l'adhésif sur le dos de la jauge et sur la surface de montage, en suivant les instructions du fabricant de l'adhésif. Assurez-vous de positionner la jauge avec précision selon les spécifications de votre application.

- **Application de la pression** : Exercez une pression uniforme sur la jauge de déformation pour assurer un contact complet avec la surface de montage. Cela peut être fait en utilisant un rouleau de pression ou en appliquant une pression manuelle sur toute la surface de la jauge.

- **Durcissement de l'adhésif** : Laissez l'adhésif durcir selon les instructions du fabricant. Ceci est généralement nécessaire pour assurer une fixation solide de la jauge à la surface.

- **Vérification de l'installation :** Une fois l'adhésif durci, vérifiez visuellement que la jauge de déformation est solidement fixée à la surface et qu'il n'y a aucun signe de décollement ou de défaut d'installation. Assurez-vous également que la jauge est positionnée correctement selon les besoins de votre application.

- **Calibration :** Après le montage de la jauge de déformation, il est souvent nécessaire de procéder à une calibration pour s'assurer que les mesures sont précises et fiables. Cela implique de soumettre la jauge à des contraintes connues et de comparer les mesures obtenues avec les valeurs de référence.

En suivant ces étapes et en utilisant des matériaux et des techniques appropriés, vous pouvez monter une jauge de déformation de manière efficace et assurer des mesures précises des contraintes mécaniques dans votre application.

III.5 Amplificateur

L’amplificateur est un dispositif qui augmente la puissance, la tension ou le courant d'un signal électrique sans changer son contenu en informations. En d'autres termes, un amplificateur prend un signal d'entrée et produit un signal de sortie qui est une version amplifiée du signal d'entrée, tout en conservant les mêmes caractéristiques essentielles telles que la forme d'onde et la qualité du signal.

Les amplificateurs sont utilisés dans une variété d'applications pour augmenter la puissance d'un signal afin de l'amplifier au niveau nécessaire pour alimenter des haut-parleurs, transmettre des signaux sur de longues distances, améliorer la sensibilité des capteurs, etc. En résumé, un

amplificateur est un dispositif électrique qui augmente l'amplitude d'un signal électrique tout en maintenant ses propriétés de base.

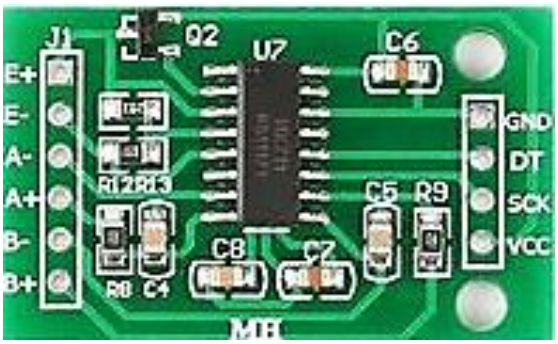


Figure III-2 Amplificateur HX711

L'amplificateur HX711 est un composant essentiel pour mesurer avec précision le poids à l'aide de capteurs de force, tels que les cellules de charge. Voici comment il fonctionne :

III.5.1 Principe de fonctionnement

- Le module HX711 est constitué d'un amplificateur et d'un convertisseur analogique-numérique (CAN).
- Il permet d'amplifier le signal provenant d'une cellule de charge.
- La cellule de charge utilise un pont de Wheatstone pour convertir l'effort appliqué en un signal analogique.

III.5.2 Schéma de connexion

- Le module HX711 communique avec le microcontrôleur (comme Arduino) via deux broches digitales : SCK (horloge) et DOUT (données).
- Il est alimenté en 5V.
- La cellule de charge est reliée au module HX711 par 4 fils standard :
- Excitation+ (E+) ou VCC (rouge)
- Excitation- (E-) ou GND (noir ou jaune)
- Output+ (O+), Signal+ (S+) ou Amplifier+ (A+) (blanc) O-, S-, ou A- (vert ou bleu)

III.6 CARTE ARDUINO UNO

III.6.1 Définition

Une carte Arduino est une plateforme de prototypage électronique open-source basée sur du matériel et un logiciel flexible et facile à utiliser. Les cartes Arduino sont équipées de

microcontrôleurs et de ports d'entrée/sortie (E/S) qui permettent aux utilisateurs de contrôler des objets physiques et de communiquer avec divers capteurs et périphériques.

Le système Arduino donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Plus précisément, pour programmer des systèmes électroniques.

Le système Arduino permet de :

• contrôler les appareils domestiques.

• fabriquer votre propre robot.

• faire un jeu de lumières.

• communiquer avec l'ordinateur.

• télécommander un appareil mobile (modélisme)

Le système Arduino est composé de deux choses principales : le matériel et le logiciel.

Pour les essais pratiques et le prototypage, nous avons choisi d'utiliser la Carte Arduino Uno pour trois raisons :

Sa capacité de communication avec Simulink/Matlab

Ses performances, 32kB de mémoire flash, 14 entrées/sorties dont 6 PWM, vitesse d'horloge 16Mhz et un port de communication USB.

Son prix abordable, pour la dernière version d'Arduino UNO.

III.6.2 Caractéristiques

La carte Arduino UNO est l'une des cartes de développement les plus populaires de la famille Arduino. Voici une description détaillée de ses caractéristiques **:**

1 L'alimentation : La carte ARDUINO UNO peut être alimentée par le câble USB, ou par un bloc secteur externe connecté grâce à une prise « Jack » de 2,1mm ou bien par un bloc de piles dont le raccordement est réalisé par l'intermédiaire des « GND » et « Vin » du connecteur d'alimentation. L'alimentation extérieure doit présenter une tension comprise entre 7 à 12V.

2 Microcontrôleur : La carte Arduino Uno est basée sur un microcontrôleur ATMega328P de la société ATMEL. Ce microcontrôleur fonctionne à une vitesse de 16 MHz et dispose de 32 ko de mémoire flash pour le stockage du programme, 2 ko de RAM et 1 ko d'EEPROM pour le stockage de données non volatiles.

3 Ports d'entrée/sortie (E/S) : Elle possède un total de 14 broches numériques, dont 6 peuvent être utilisées en tant que sorties PWM (modulation de largeur d'impulsion) pour contrôler la luminosité des LED ou la vitesse des moteurs, et 6 peuvent être utilisées en tant qu'entrées analogiques pour lire des capteurs.

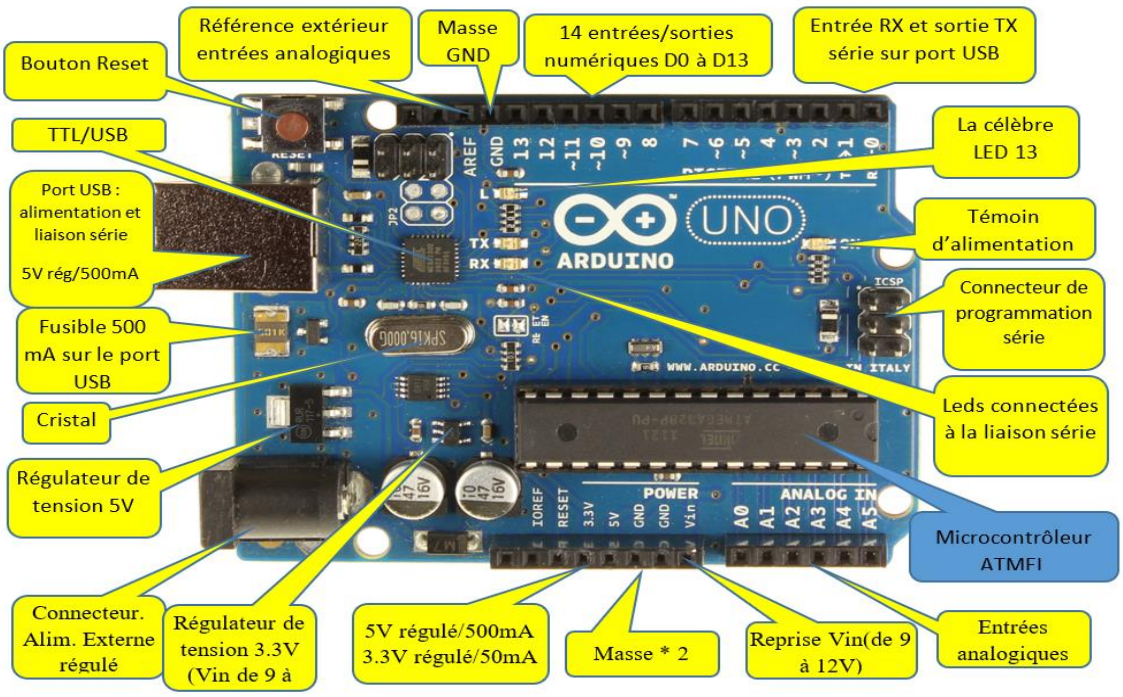


Figure III-3Schéma d'une carte Arduino UNO

4. Interfaces de communication : La carte Arduino Uno est équipée d'une interface USB qui permet de la connecter à un ordinateur pour téléverser des programmes et pour la communication série avec d'autres périphériques. Elle dispose également d'un connecteur d'alimentation externe pour une alimentation via une source externe (habituellement entre 7V et 12V).

5. Compatibilité : Elle est compatible avec une large gamme de capteurs, actionneurs et autres modules disponibles sur le marché, ce qui la rend très polyvalente pour la réalisation de projets électroniques.

6. Facilité d'utilisation : La carte Arduino Uno est très conviviale, même pour les débutants en électronique et en programmation. Elle est supportée par un large éventail de ressources en ligne, y compris des tutoriels, des exemples de code et une documentation complète.

7. Open-source : La carte Arduino Uno est basée sur des logiciels et du matériel open-source, ce qui signifie que son schéma électrique, son agencement des composants et son code source sont disponibles gratuitement, ce qui permet aux utilisateurs de les modifier et de les adapter à leurs besoins spécifiques

III.6.3 Les différentes cartes ARDUINO

Le tableau ci-dessous donne une liste de quelques cartes ARDUINO, ainsi que leurs principales caractéristiques.

NOM	PROCESSEUR	VOLTAGE	VITESSE CPU	ENTREES/ SORTIES ANALOG.	E-S DIGITALES/ PWM	EEPROM (kB)	SRAM (kB)	FLASH	UART
UNO	ATMEGA 328	5V/7-12V	16MHz	6/0	14/6	1	2	32	1
DUE	AT91SAM3X8E	3.3V/7-12V	84MHz	12/2	54/12	-	96	512	4
LEONARDO	ATmega32u4	5V/7-12V	16MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	1
MEGA 2560	ATmega2560	5V/7-12V	16MHz	16/0	54/15	4	8	256	4
MEGA ADK	ATmega2560	5V/7-12V	16MHz	16/0	54/15	4	8	256	4
MICRO	ATmega32u4	5V/7-12V	16MHz	12/0	20/7	1	2.5	32	1
MINI	ATMEGA 328	5V/7-9V	16MHz	8/0	14/6	1	2	32	-
NANO	ATMEGA 328/ ATMEGA 168	5V/7-9V	16MHz	8/0	14/6	0.512	1/ 2	16/ 32	1

Figure III-4 Tableau comparatif de quelques cartes Arduino®

III.7 ARDUINO IDE

"Arduino IDE" (Integrated Développement Environnement) est un environnement de développement open-source utilisé pour écrire et téléverser du code sur des cartes de développement Arduino. Vous pouvez le télécharger gratuitement sur le site officiel d'Arduino (arduino.cc) et l'installer sur votre ordinateur. Avec Arduino IDE, vous pouvez programmer des cartes Arduino en utilisant le langage C/C++.

III.8 Matlab

Matlab est un environnement de programmation et de calcul numérique utilisé dans divers domaines scientifiques et d'ingénierie. Il permet de résoudre des problèmes complexes en combinant des algorithmes, des visualisations et des outils de développement. MATLAB est particulièrement populaire pour son utilisation dans le traitement du signal, l'analyse de données, la modélisation mathématique et la simulation.

III.9 Connexion carte Arduino avec MATLAB

La connexion d'une carte Arduino avec MATLAB implique l'utilisation de l'interface série (port série) pour transférer des données entre l'Arduino et l'ordinateur exécutant MATLAB.

Voici les étapes détaillées pour connecter une carte Arduino avec MATLAB :

1. Installation du support MATLAB pour Arduino :

Tout d'abord, nous devront installer le package MATLAB Support Package for Arduino Hardware. Cela peut être fait en utilisant l'Add-On Explorer dans MATLAB. Recherchez "Arduino" dans l'Add-On Explorer et suivez les instructions pour installer le support.

2. Programmation de l'Arduino :

Nous écrirons un code sur notre Arduino pour effectuer les tâches souhaitées, telles que la lecture de capteurs. Ensuite, nous assurons d'inclure des instructions pour communiquer avec l'ordinateur via le port série

3. Connexion physique :

Connectez l’Arduino à l'ordinateur à l'aide d'un câble USB.

4. Configurer la connexion dans Matlab :

Nous utilisons la fonction `Arduino () ` pour créer un objet représentant Arduino.

Nous devons spécifier le port série auquel notre Arduino est connecté.

5. Interaction avec l'Arduino depuis Matlab :

Vous pouvez maintenant interagir avec votre Arduino depuis Matlab en utilisant des fonctions spéciales fournies par le support Arduino de Matlab.

Cela lira la tension sur la broche analogique A0 de votre Arduino et l'affichera dans la fenêtre de commande MATLAB.

6. Fermeture de la connexion :

Une fois que vous avez terminé, assurez-vous de fermer correctement la connexion avec l'Arduino en utilisant la fonction `Clear` pour libérer les ressources.

III.10 Conclusion

Notre système composé d'un pont de jauge, d'une carte Arduino Uno et d'amplificateurs d'instrumentation, constitue une alternative aux anciens systèmes de mesure analogiques pour les applications de traction, de compression, et autres. Ce système pourrait également être adapté à d'autres applications après développement.

Chapitre IV Réalisation et calibrage du prototype

IV.1 Introduction

Dans le domaine des essais mécaniques, la mesure précise des déformations est cruciale pour évaluer les contraintes et les forces. L'extensomètre est aujourd'hui la technique la plus fiable et précise pour ce type de mesure, utilisant divers capteurs constitués de jauges extensométriques. Dans ce projet, une cellule de charge, formée par un pont de jauges, est conçue pour mesurer des charges statiques, il est contenu deux parties : partie mécanique et partie électrique.

IV.2 Conception mécanique de la cellule de charge type Pancake

IV.2.1 Description du capteur

-Forme et Structure : le capteur pancake est caractérisé par sa forme plate et circulaire, ressemblant à une crêpe (d'où son nom). Cette conception permet de répartir uniformément les charges appliquées.

-Matériaux : il est fabriqué à partir de l'aluminium, offrant une résistance élevée à la déformation et à la corrosion.

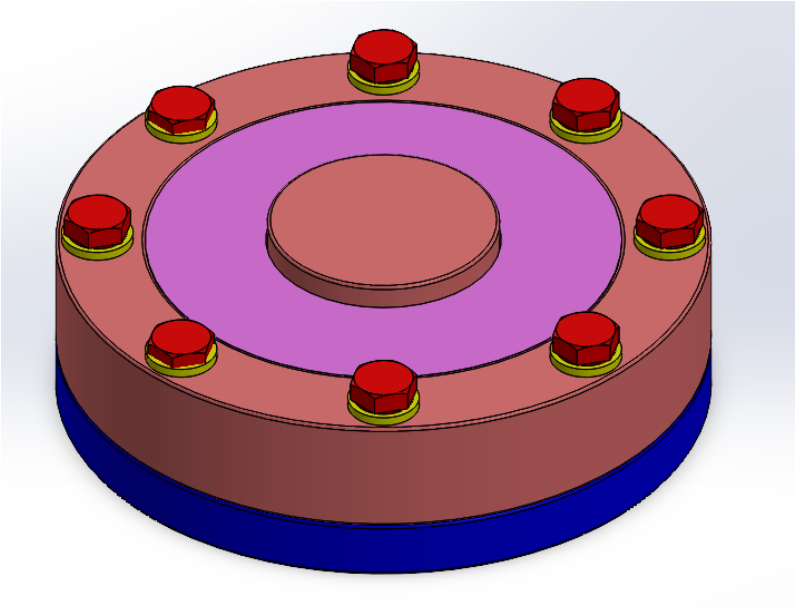


Figure IV-1 Vue en perspective du capteur

IV.2.2 Caractéristiques mécaniques de l'alliage utilisé

L'aluminium 5083 H116 est un alliage de la série 5000, principalement utilisé pour ses excellentes propriétés mécaniques et de résistance à la corrosion, particulièrement dans des environnements marins.

Voici les caractéristiques mécaniques principales de cet alliage dans l'état de traitement H116 :

Caractéristiques Mécaniques de l'Aluminium 5083 H116 :

1. Limite d'élasticité (Re) : 215 MPa

2. Résistance à la traction (Rm) : 335 MPa
3. Allongement à la rupture : Environ 12% à 14%, selon l'épaisseur du matériau
4. Dureté Brinell (HB) : Environ 75 à 95 HB
5. Module d'élasticité : 70 GPa
6. Densité : 2660 kg/m³

Composition chimique :

- Magnésium (Mg) : 4,0 à 4,9%
- Manganèse (Mn) : 0,4 à 1,0%
- Chrome (Cr) : 0,05 à 0,25%
- Fer (Fe) : ≤ 0,4%
- Silicium (Si) : ≤ 0,4%
- Autres éléments : trace

IV.2.3 Le collage des jauges

La partie de collage des jauges est particulièrement une étape très importante, il fautrespecter les points indispensables suivant :

- **Préparation de l'état de surface :** tout d'abord faire un nettoyage grossier de la surface. Ensuite faire un nettoyage fin et répéter le nettoyage, jusqu'à ne plus avoir de trace de saleté sur le tampon.
- **Préparation de la jauge et cosses relais :** Préparer une bande adhésive disposée en angle sur la jauge et la cosse relais, aligner la jauge sur la marque et fixer avec une bande adhésive, la jauge et la cosse relais doivent être manipulées avec une pince.
- **Collage avec colle :** verser une goutte de colle et étaler aussitôt uniformément le produit sans exercer de pression. Rabattre la jauge aussitôt avec une feuille téflon en appliquant une pression uniforme d'environ une minute sur l'ensemble. Après la prise de la colle, la bande adhésive peut être enlevée de l'ensemble jauge et cosse relais.

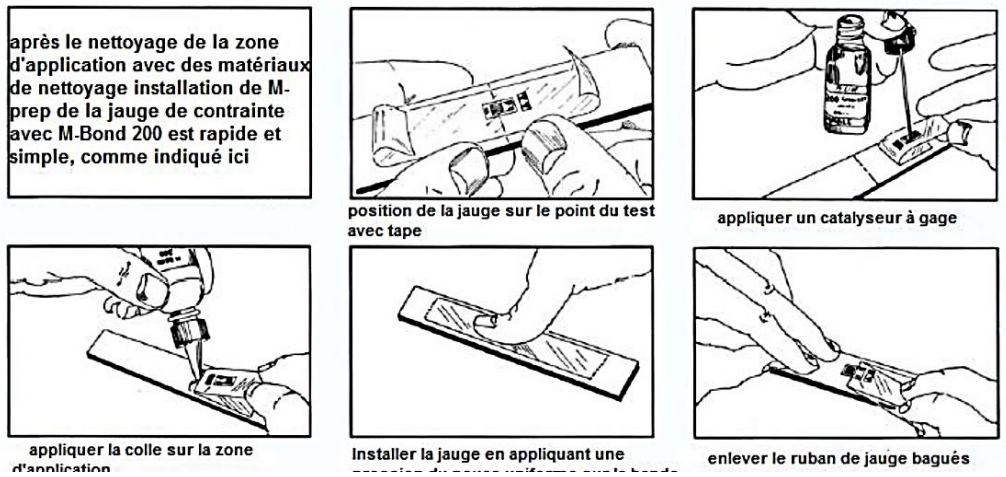


Figure IV-2Montage de la jauge



Figure IV-3 La jauge utilisée



Figure IV-5Instruments utilisés pour le montage des jauges

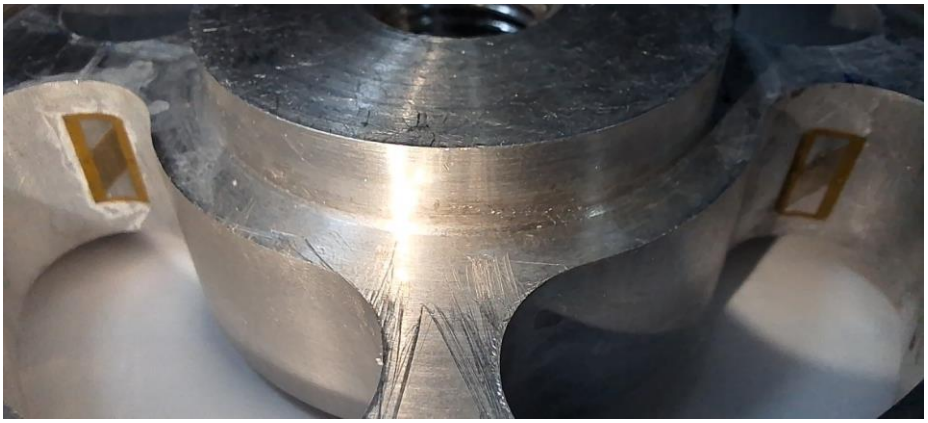


Figure IV-4Collage des jauges à leurs emplacements sur le capteur

IV.3 2 Réalisation du câblage

Une fois les jauges fixées, un câble de cuivre isolé, de 0.1 mm de diamètre, est utilisé pour connecter les 04 jauges et former le pont de Wheatstone.

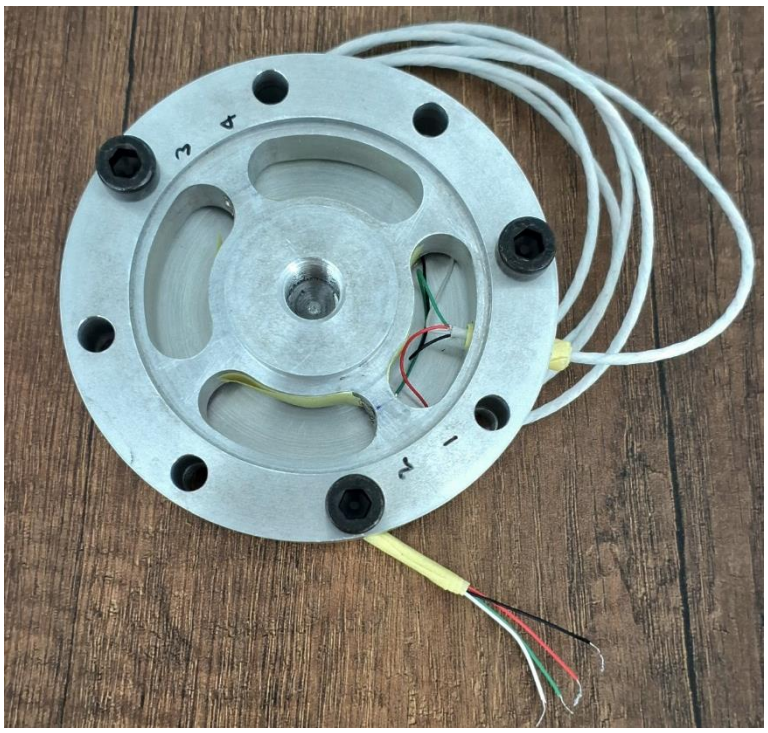


Figure IV-6Le capteur après réalisation des différents câblages du pont

IV.4 Connection du capteur à l'amplificateur et à la carte Arduino

IV.4.1 Matériel Nécessaire

- **Capteur de Force :** le capteur est équipé des jauges de contraintes en pont de Wheatstone.
- **Amplificateur de Signal HX711** : Cet amplificateur est couramment utilisé pour les applications de pesage et est compatible avec Arduino.
- **Arduino Uno :** pour transfert les données**.**
- **Câblage et connecteurs** : Pour connecter le capteur et l'amplificateur à l'Arduino.
- **Bread board et fils de connexion** : Pour faciliter les connexions.
- **Alimentation** : Source d'alimentation appropriée pour l'Arduino et les composants (généralement une connexion USB pour l'Arduino

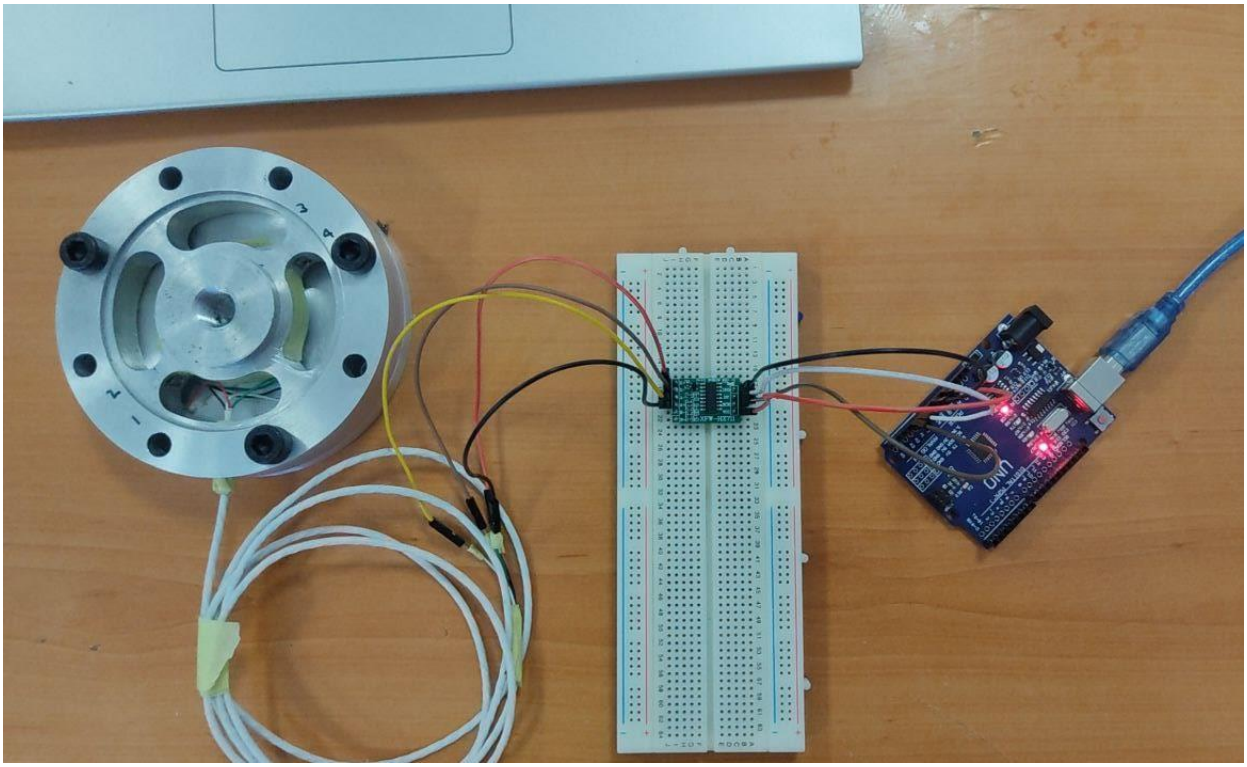


Figure IV-7Image du capteur connecté à la carte Arduino

IV.5 Calibrage du capteur

Pour le calibrage du capteur de force nous avons utilisé une machine de traction pour appliquer des forces précises de compression et assurer la précision et la fiabilité des mesures. Voici comment procéder à l'étalonnage :

IV.5.1 Étapes de Réalisation

1. Connexion du Capteur et de l'Amplificateur
2. Programmation de l'Arduino
3. Procédure d'Étalonnage

- **Initialisation** : Configurez la machine de traction et placez le capteur.
- **Application des charges** : Appliquez des charges connues et enregistrez les valeurs brutes lues par l'Arduino.
- **Analyse des données** : Tracez un graphique des valeurs brutes contre les charges et déterminez le facteur de calibration par régression linéaire

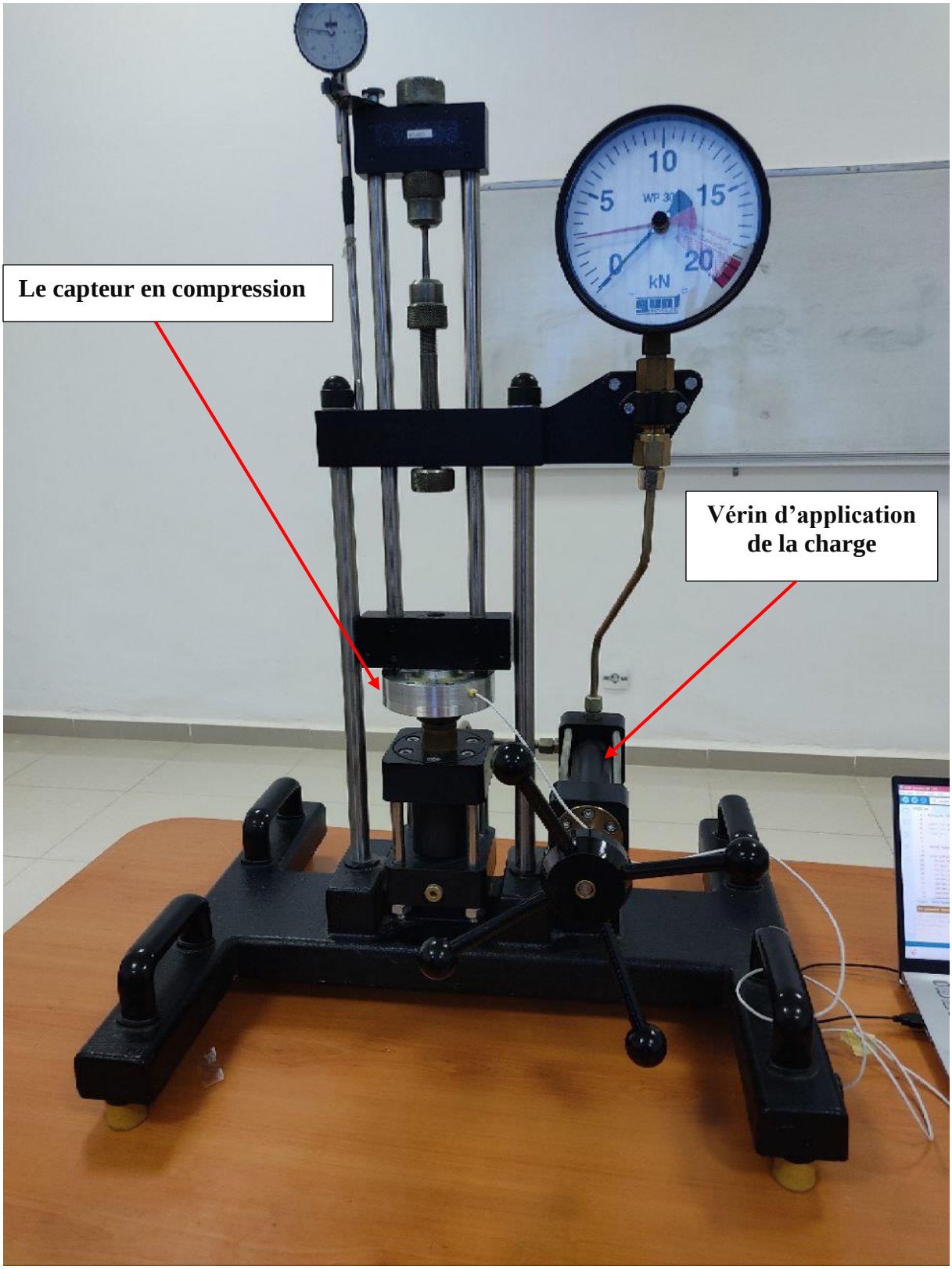


Figure IV-8 Machine de compression utilisée pour l'opération d'étalonnage

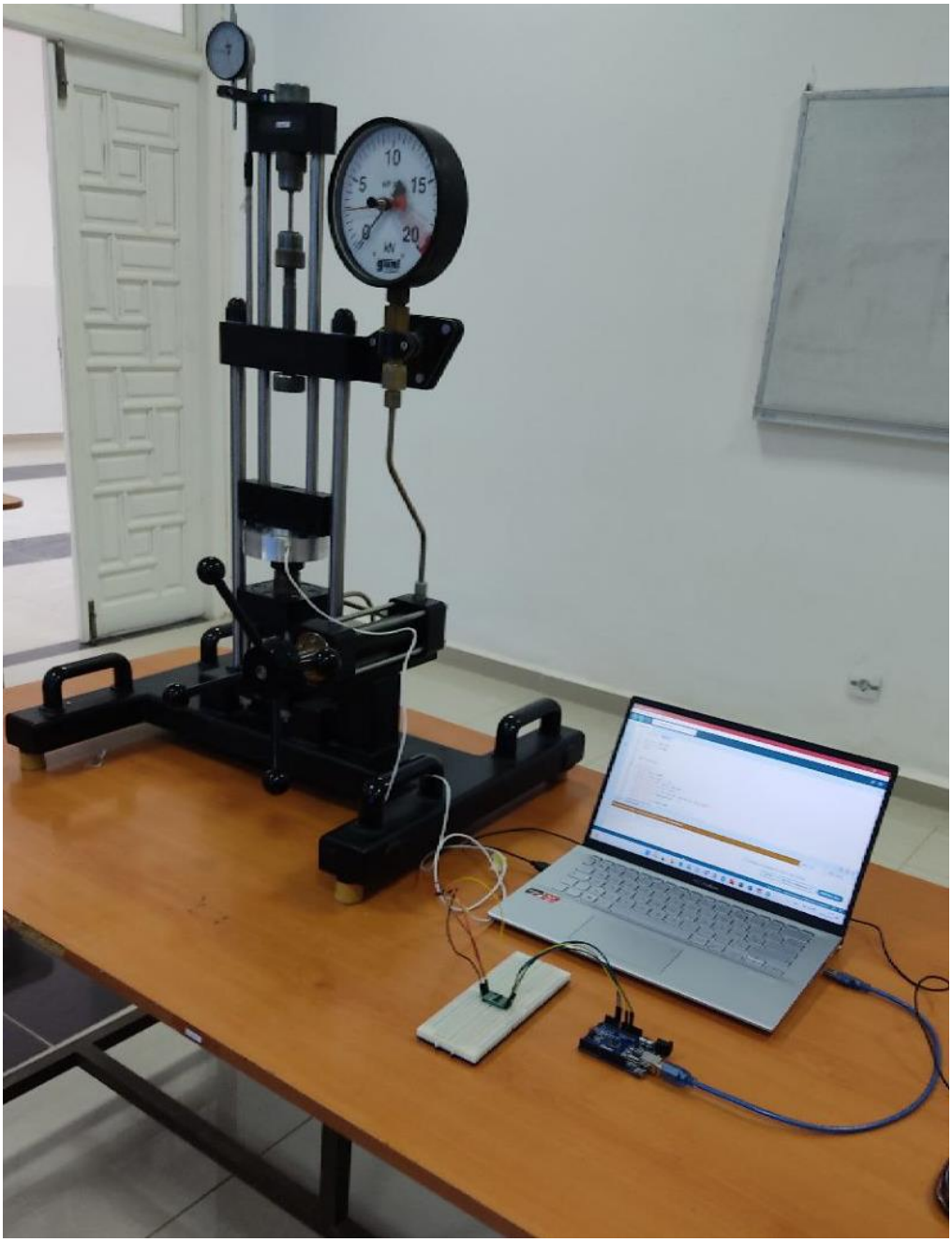


Figure IV-9 Étalonnage du capteur par application de charges successives

IV.5.2 Valeurs mesurées.

Le tableau 5.1 donne les valeurs des tensions mesurées pour chaque charge appliquée. La figure V.10 trace les valeurs obtenues sous forme de graphe, auquel une courbe de tendance est ajoutée.

Charge (kN)	Tension (mV)
0.5	**102.5**
1.0	**204.0**
1.5	**306.6**
2.0	**422.0**
2.5	**532.0**
3.0	**636.0**
3.5	**746.0**
4.0	**858.0**
4.5	**969.0**
5.0	**1082.0**
5.5	**1167.0**
6.0	**1280.0**

Tableau IV-1Valeurs mesurées

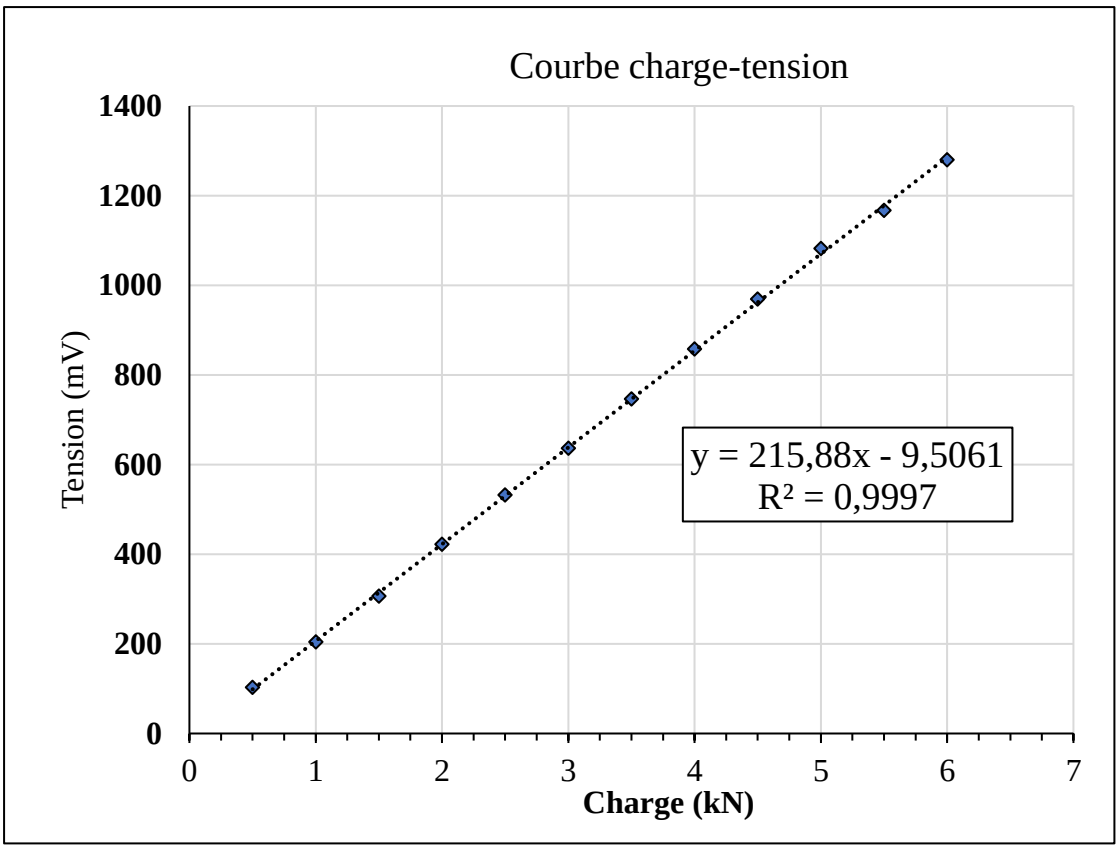


Figure IV-10 Courbe d'étalonnage du capteur

IV.5.3 Les caractéristiques du capteur

IV.5.3.1 Etendue de la mesure

La plage des valeurs du poids est :

$$P_{\min} = 0.5kN$$

$$P_{\max} = 25.0kN$$

IV.5.3.2 Courbe de tendance

$$V(mV) = 215.88 * P(kN) - 9.5061$$

IV.5.3.3 La linéarité :

Coefficient de corrélation : $R^2 = 99.97\%$

IV.5.3.4 La sensibilité :

Après avoir effectué plusieurs essais de charge-décharge du capteur, nous avons observé une sensibilité de 0.1 kN.

IV.6 CONCLUSION

D'après les calculs théoriques et les résultats de capteur on voit qu'il y a une correspondance entre l'expérimental et le numérique.

D’après la superposition des courbes de variation de la différence des contraintes principales obtenues expérimentalement et numériquement, nous remarquons qu’il y a une concordance des résultats et que les courbes se superposent

Conclusion générale

La conception et la réalisation d’une cellule de charge dans le cadre de ce projet de fin d'études a représenté un défi stimulant et enrichissant. À travers ce travail, nous avons exploré en profondeur les principes fondamentaux de la mécanique des matériaux, de l'électronique et de la métrologie.

En ce qui concerne la conception mécanique, nous avons dû prendre en compte des facteurs tels que la résistance des matériaux, la géométrie optimale et la robustesse structurelle pour assurer des performances fiables de notre cellule de charge. Les outils de modélisation et de simulation ont été essentiels pour valider notre conception avant la fabrication.

Du côté de l'électronique, nous avons développé des circuits de conditionnement de signal et d'amplification adaptés aux spécifications de nos capteurs de contrainte. La précision et la stabilité des mesures dépendaient en grande partie de la qualité de ces circuits, ce qui a nécessité une attention particulière aux détails et une expertise en électronique analogique.

En ce qui concerne la métrologie, nous avons mis en œuvre des techniques de calibration précises pour garantir l'exactitude et la reproductibilité des mesures. Cela impliquait des procédures rigoureuses de caractérisation de la cellule de charge dans différentes conditions de charge et environnements.

Malgré les défis techniques rencontrés tout au long du projet, nous sommes parvenus à concevoir et à fabriquer un capteur de force fonctionnel, capable de mesurer avec précision les forces appliquées. Ces résultats sont prometteurs et ouvrent la voie à des applications potentielles dans divers secteurs industriels, tels que l'automatisation, le contrôle de qualité et la robotique.

En conclusion, ce projet nous a permis d'acquérir une expérience précieuse dans le domaine de l'ingénierie mécanique, de l'électronique et de la métrologie. Il nous a également enseigné l'importance de la collaboration interdisciplinaire, de la résolution de problèmes et de la rigueur scientifique dans la réalisation de projets académiques complexes.

Références Bibliographiques

[1] https://www.framboiseetcompagnie.fr/etude-electronique-de-la-carte-arduino/#Materiel%20

[2] sensors/a/fonction-strain-sensors

[3] E. Alibi et S. Jawadi « Conception et réalisation d'un enregistreur de données »,

[4] Rapport de projet de fin d'études, Université Virtuelle de Tunis, 2011.

[5] Nacera CHERIET et Mme Mounira ASSAD « Conception et réalisation un dispositif de mesure des déformations à base de jauges extensométriques » 2016

[6] S. BELKHEIR, A. BENYAHIA « Conception et réalisation d'un système de mesure de charges mécaniques adapté à un dispositif de compression à base d'un microcontrôleur »2022

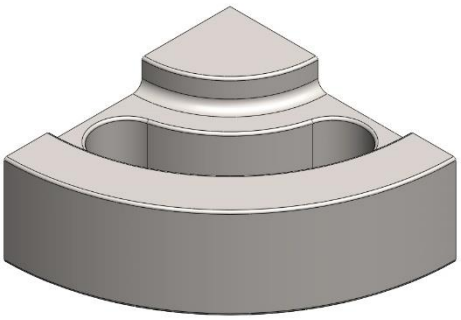
[7]https://www.omega.co.uk/techref/pdf/Strain-gauge-application-info/how-to-position-strain-gauges.pdf

[8] Arduino avec cellule de charge et amplificateur HX711 (balance numérique) (raspberryme.com)

[9] Capteur de force - Arduino (arduinofactory.fr)

ANNEXES

ANNEXE 1 Analyse statique du capteur de charge sous SolidWorks



Simulation of Load_Cell_WEB

Date: jeudi 13 juin 2024

Designer: SLAMA_REBAHI_AMOURA

Study name: Static 1

Analysis type:Static

*Chapitre V*Table of Contents

DESCRIPTION 62

ASSUMPTIONS ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

MODEL INFORMATION 63

STUDY PROPERTIES 64

UNITS 64

MATERIAL PROPERTIES 65

LOADS AND FIXTURES 66

CONNECTOR DEFINITIONS ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

CONTACT INFORMATION ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

MESH INFORMATION ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

SENSOR DETAILS ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

RESULTANT FORCES ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

BEAMS ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

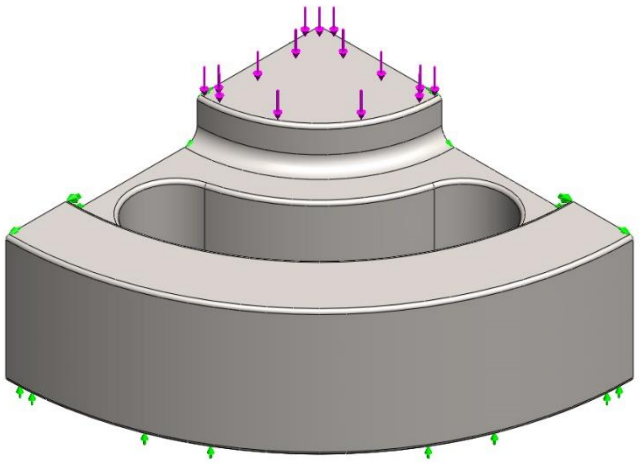
STUDY RESULTS 68

CONCLUSION ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.

Description

No Data

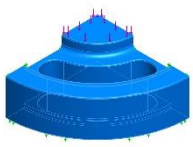
Model Information



Model name: Load_Cell_WEB

Current Configuration: Diam_8

Solid Bodies

Document Name and Reference	Treated As	Volumetric Properties	Document Path/Date Modified
Fillet1 	Solid Body	Mass:0,0714803 kg Volume:2,68723e-05 m^3 Density:2 660 kg/m^3 Weight:0,700507 N	D:\Enseignement_MEDEA\PFE_23_24\Pancake Load cell\PFE_Work_By_AMOURA\Pancake_Load_Cell_V02\Load_Cell_WEB.SLDPRT May 26 22:48:35 2024

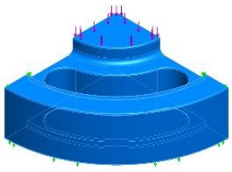
Study Properties

Study name	Static 1
Analysis type	Static
Mesh type	Solid Mesh
Thermal Effect:	On
Thermal option	Include temperature loads
Zero strain temperature	298 Kelvin
Include fluid pressure effects from SOLIDWORKS Flow Simulation	Off
Solver type	FFEPlus
Inplane Effect:	Off
Soft Spring:	Off
Inertial Relief:	Off
Incompatible bonding options	Automatic
Large displacement	Off
Compute free body forces	On
Friction	Off
Use Adaptive Method:	Off
Result folder	SOLIDWORKS document (D:\Enseignement_MEDEA\PFE_23_24\Pancake Load cell\PFE_Work_By_AMOURA)

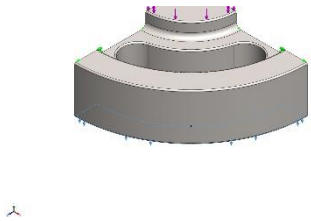
Units

Unit system:	SI (MKS)
Length/Displacement	mm
Temperature	Kelvin
Angular velocity	Rad/sec
Pressure/Stress	N/m^2

Material Properties

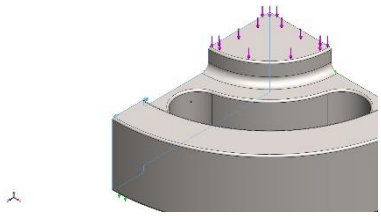
Model Reference	Properties	Components
	Name: **Al 5083 H116** Model type: **Linear Elastic Isotropic** Default failure criterion: **Max von Mises Stress** Yield strength: **2,15e+08 N/m^2** Tensile strength: **3,35e+08 N/m^2** Compressive strength: **3,35e+08 N/m^2** Elastic modulus: **7e+10 N/m^2** Poisson's ratio: **0,32** Mass density: **2 660 kg/m^3** Shear modulus: **2,6e+10 N/m^2** Thermal expansion coefficient: **2,4e-05 /Kelvin**	**SolidBody 1(Fillet1)(Load_Cell_WEB)**
Curve Data:N/A		

Loads and Fixtures

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Roller/Slider-1		**Entities:** 1 face(s) **Type:** Roller/Slider

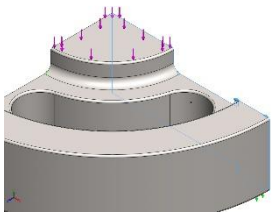
Resultant Forces

Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-33,4015	4 999,99	-24,2293	5 000,16
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Symmetry-1		**Entities:** 1 face(s) **Type:** Symmetry

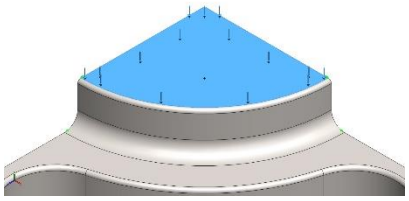
Resultant Forces

Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	-0,13746	62,3923	5,61372	62,6445
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Fixture name	Fixture Image	Fixture Details
Symmetry-2		**Entities:** 1 face(s) **Type:** Symmetry

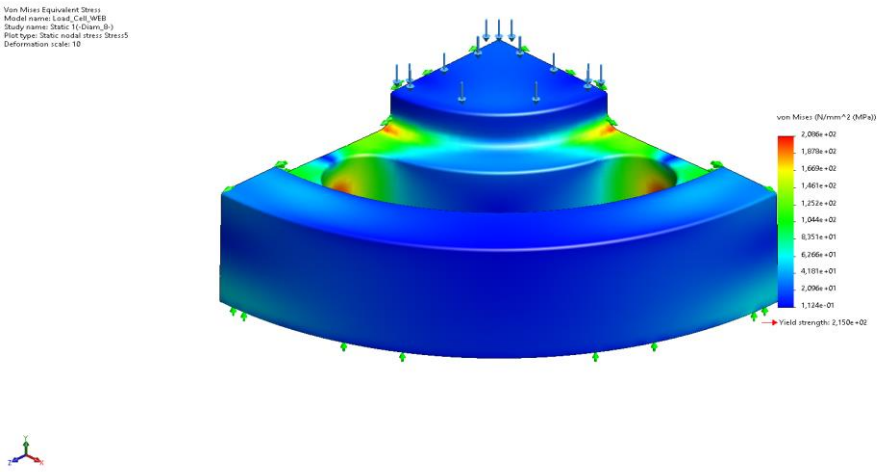
Resultant Forces

Components	X	Y	Z	Resultant
Reaction force(N)	5,69851	63,1229	0,206047	63,3799
Reaction Moment(N.m)	0	0	0	0

Load name	Load Image	Load Details
Force-1		**Entities:** 1 face(s) **Type:** Apply normal force **Value:** 5 000 N

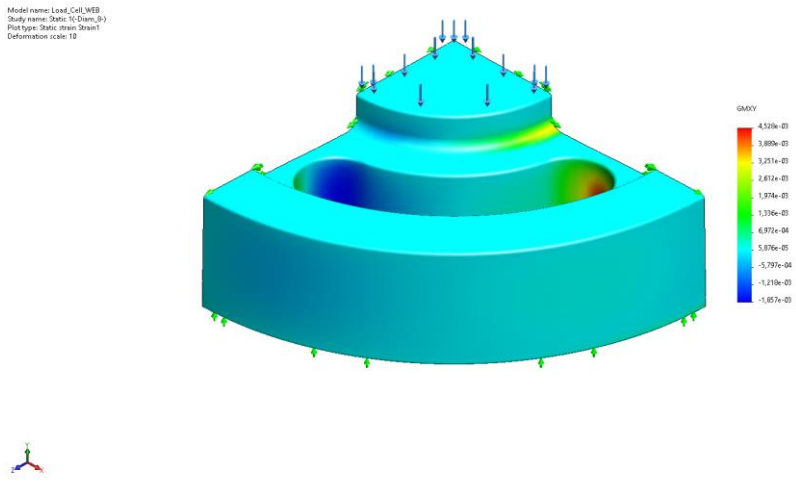
Study Results

Name	Type	Min	Max
Stress5	VON: von Mises Stress	1,124e-01N/mm^2 (MPa) Node: 77078	2,086e+02N/mm^2 (MPa) Node: 2111



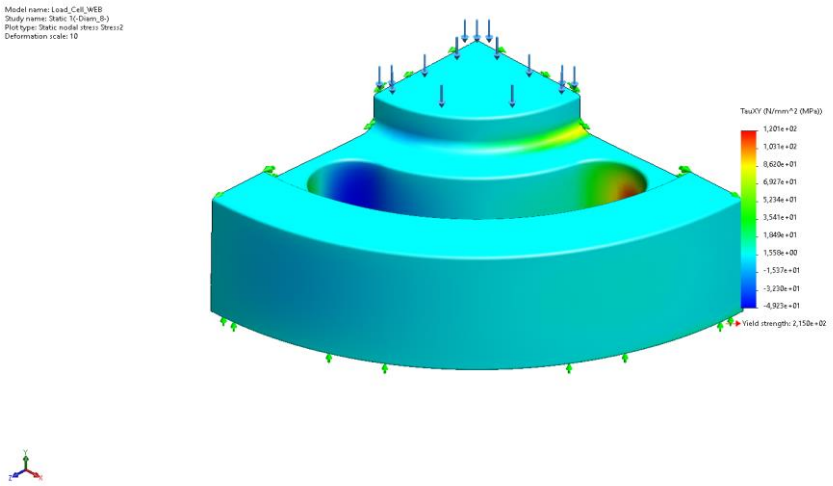
Load_Cell_WEB-Static 1-Stress-Stress5

Name	Type	Min	Max
Strain1	GMXY: Shear in Y Dir. on YZ Plane	-1,857e-03 Node: 63102	4,528e-03 Node: 102



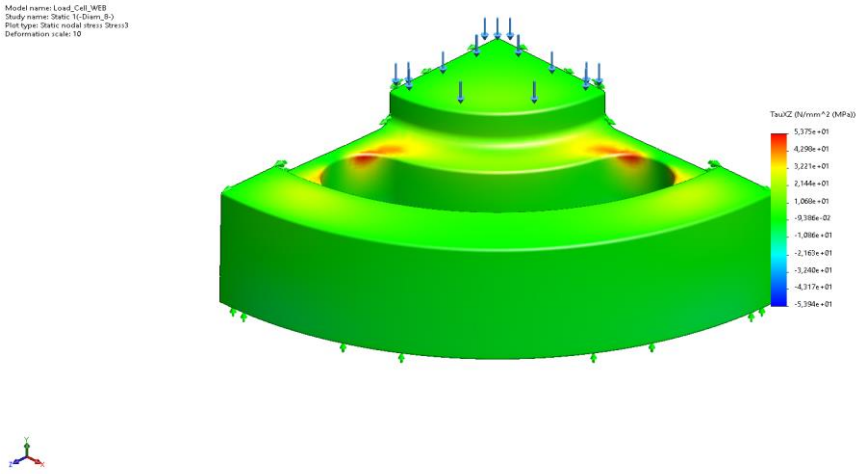
Load_Cell_WEB-Static 1-Strain-Strain1

Name	Type	Min	Max
Stress2	TXY: Shear in Y Dir. on YZ Plane	-4,923e+01N/mm^2 (MPa) Node: 63102	1,201e+02N/mm^2 (MPa) Node: 102



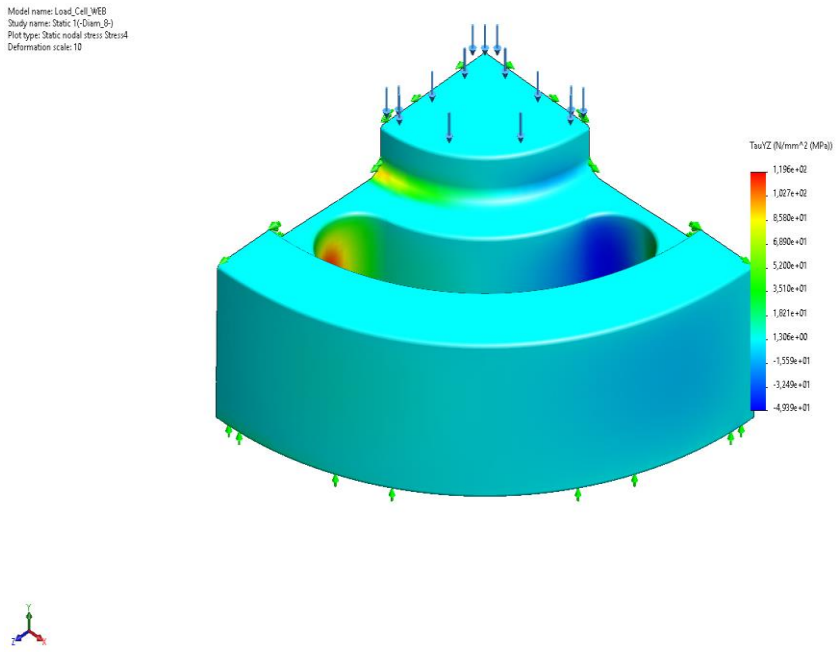
Load_Cell_WEB-Static 1-Stress-Stress2

Name	Type	Min	Max
Stress3	TXZ: Shear in Z Dir. on YZ Plane	-5,394e+01N/mm^2 (MPa) Node: 34	5,375e+01N/mm^2 (MPa) Node: 72



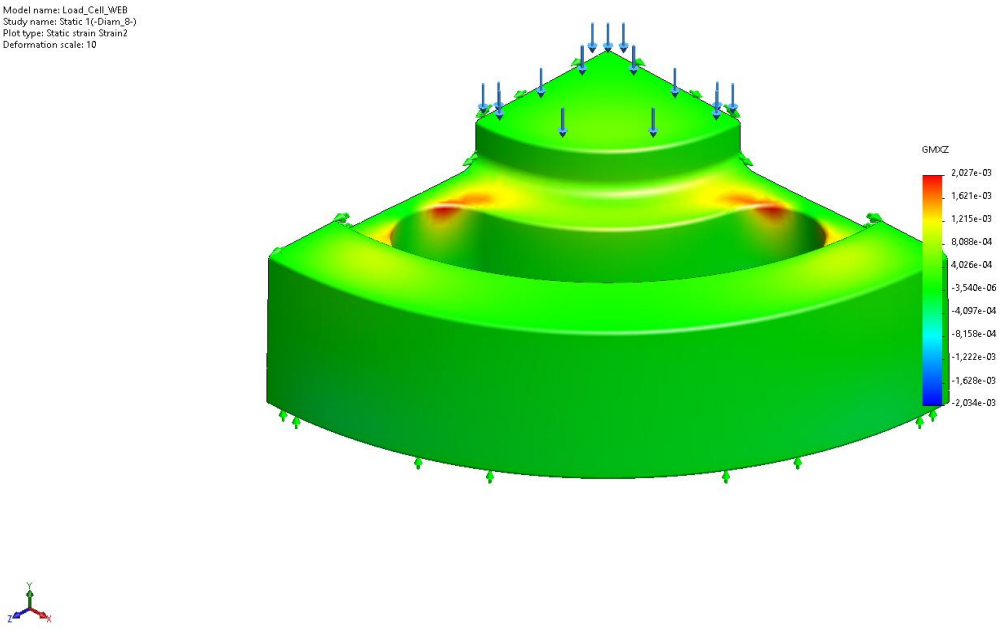
Load_Cell_WEB-Static 1-Stress-Stress3

Name	Type	Min	Max
Stress4	TYZ: Shear in Z Dir. on XZ Plane	-4,939e+01N/mm^2 (MPa) Node: 79705	1,196e+02N/mm^2 (MPa) Node: 2537



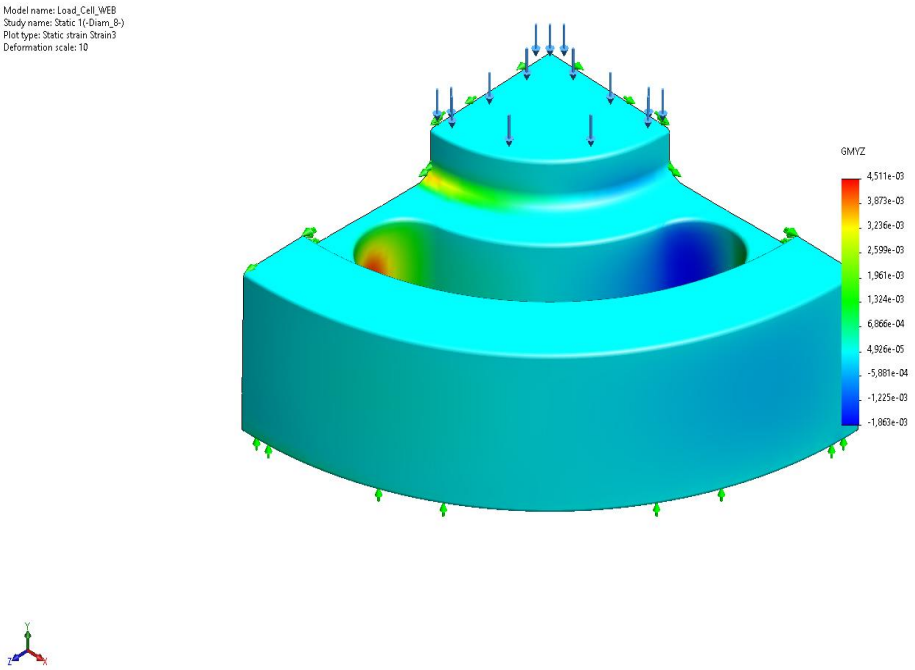
Load_Cell_WEB-Static 1-Stress-Stress4

Name	Type	Min	Max
Strain2	GMXZ: Shear in Z Dir. on YZ Plane	-2,034e-03 Node: 34	2,027e-03 Node: 72



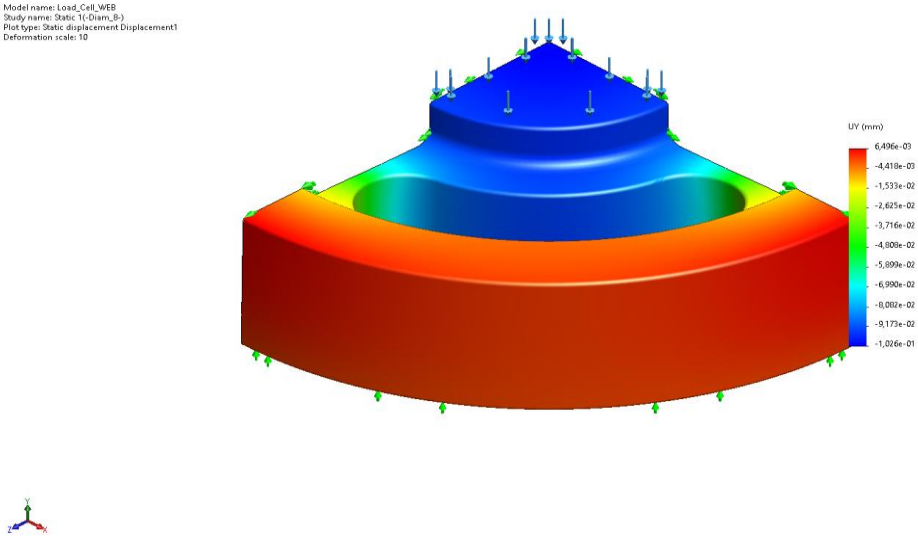
Load_Cell_WEB-Static 1-Strain-Strain2

Name	Type	Min	Max
Strain3	GMYZ: Shear in Z Dir. on XZ Plane	-1,863e-03 Node: 79705	4,511e-03 Node: 2537



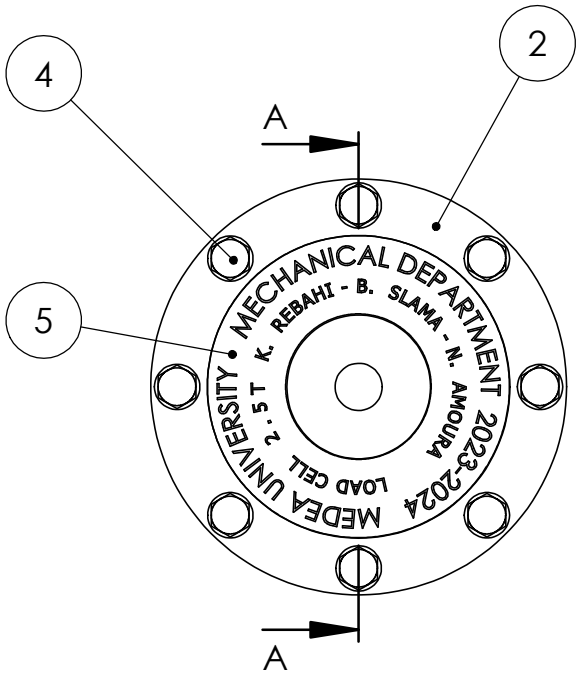
Load_Cell_WEB-Static 1-Strain-Strain3

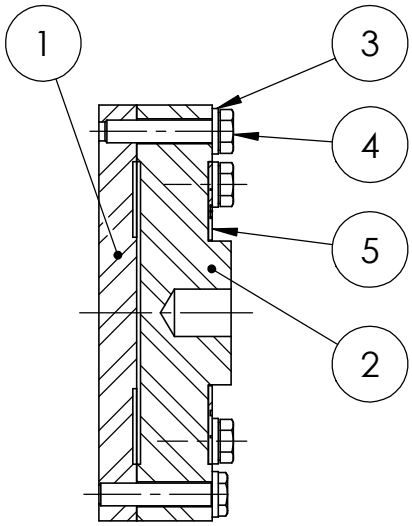
Name	Type	Min	Max
Displacement1	UY: Y Displacement	-1,026e-01mm Node: 58753	6,496e-03mm Node: 502



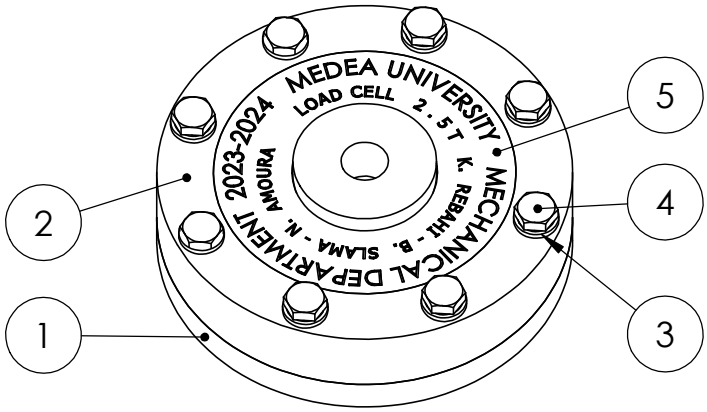
Load_Cell_WEB-Static 1-Displacement-Displacement1

ANNEXE 2 Dessins de définition



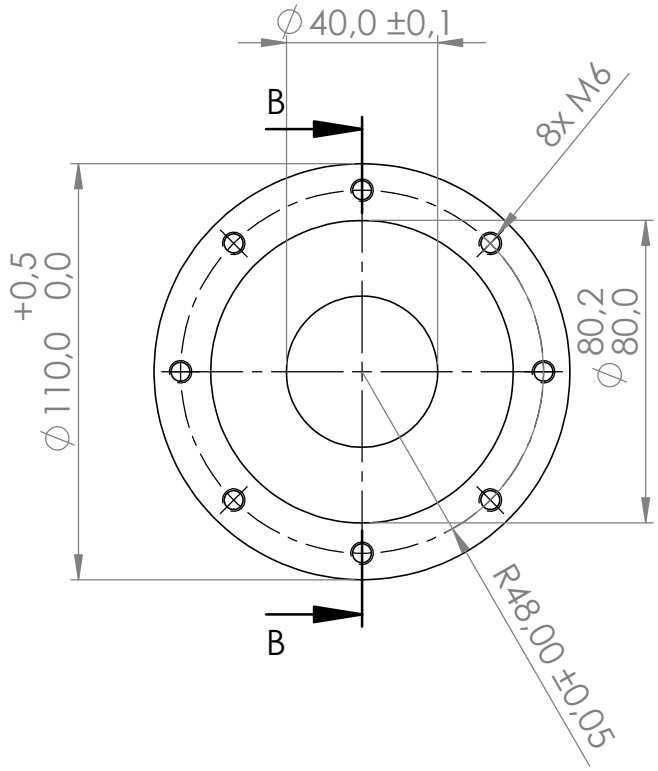


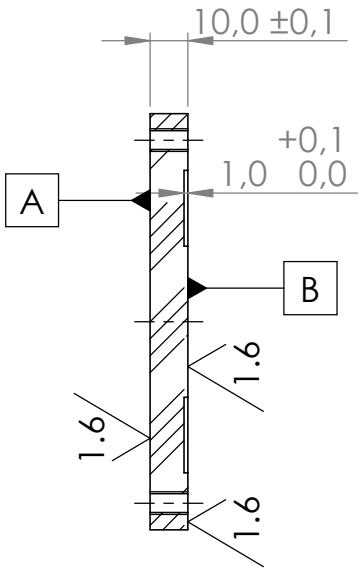
SECTION A-A



No. ARTICLE	NUMERO DE PIECE	DESCRIPTION	QTE
1	Base		1
2	Web		1
3	Washer ISO 7089 - 6		8
4	ISO 4014 - M6 x 30 x 18-N		8
5	Cover		1

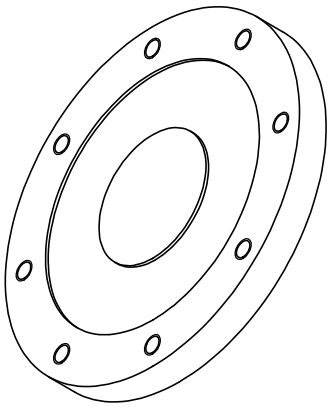
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE	TITRE:		
AUTEUR	Slama-Rebahi			Pancake Loadcell		
VERIF.	AMOURA					
APPR.	AMOURA		14/06/24			
FAB.						
QUAL.				MATERIAU:	No. DE PLAN	A4
				Al 5083 H116	Dessin d'ensemble	
				MASSE: 0.735 kg	ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1



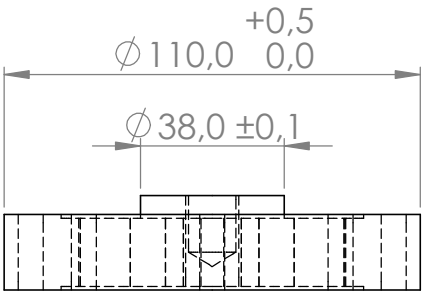


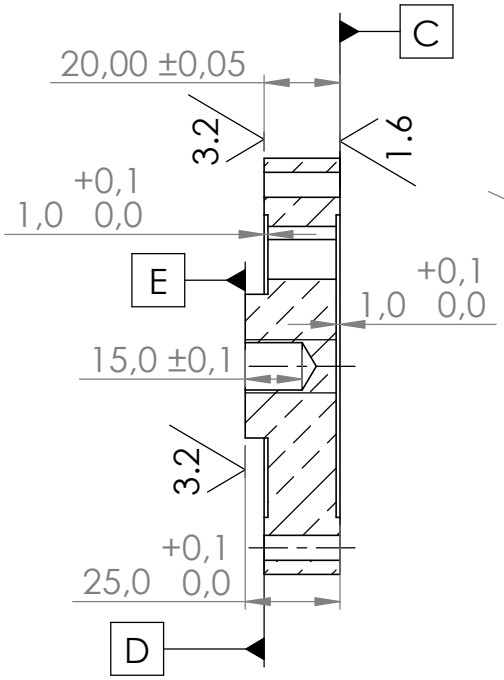
//	0.05	A	B

SECTION B-B

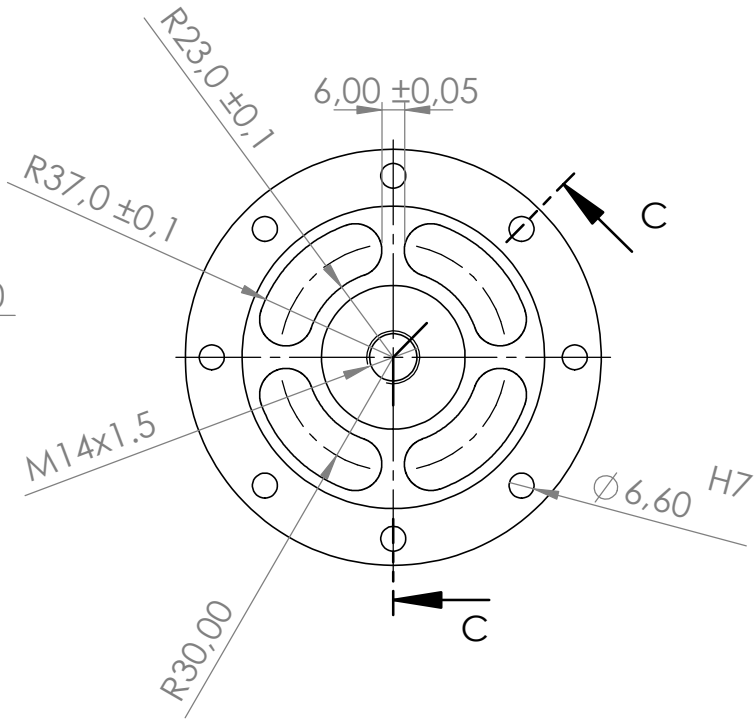


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION	
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:	
AUTEUR	Slama-Rebahi					Pancake Loadcell	
VERIF.	AMOURA						
APPR.	AMOURA		14/06/24				
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
				Al 5083 H116		The base	
				MASSE: 0.240 kg		ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1



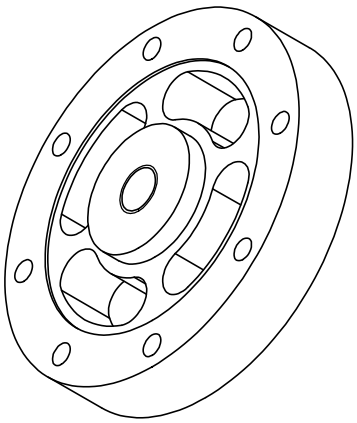


SECTION C-C



//	0.05	C	D

//	0.05	C	E



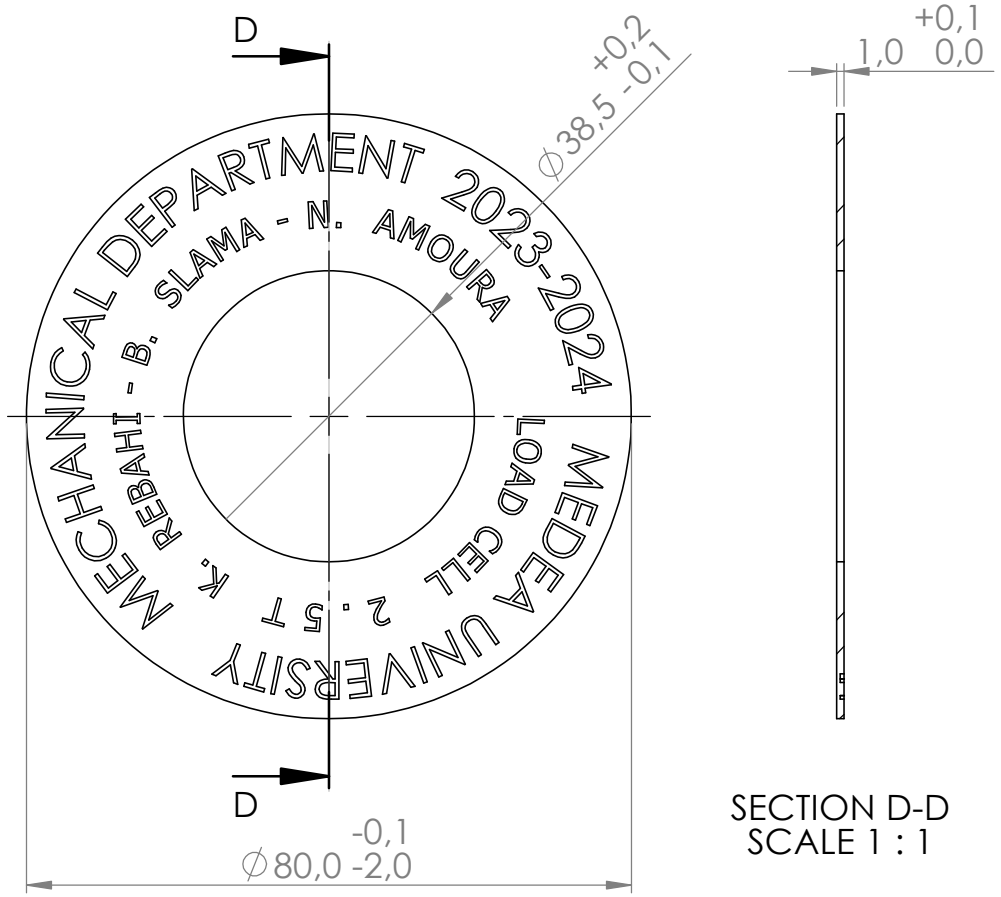
SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:	FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION

	NOM	SIGNATURE	DATE
AUTEUR	Slama-Rebahi		
VERIF.	AMOURA		
APPR.	AMOURA		14/06/24
FAB.			
QUAL.			

TITRE:

Pancake Loadcell

MATERIAU:	No. DE PLAN	
Al 5083 H116	The web	A4
MASSE: 0.240 kg	ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1



SECTION D-D
SCALE 1 : 1

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
	NOM	SIGNATURE	DATE			TITRE:	
AUTEUR	Slama-Rebahi					Pancake Loadcell	
VERIF.	AMOURA						
APPR.	AMOURA		14/06/24				
FAB.							
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN	A4
				ANSI 316 Steel		The cover	
				MASSE: 0.240 kg		ECHELLE:1:2	FEUILLE 1 SUR 1