

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE APPLIQUEE ET OPTIQUE

MEMOIRE

Présenté par :

Mr. BACHA Abdelhadi

Mr. AZIZI Hadj

Pour l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Instrumentation et métrologie

Thème

**Etude et réalisation d'un dispositif de mesure des
contraintes mécanique par jauges à résistance électrique.**

Soutenu le devant la commission d'examen

Dr A. Dahane	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Président
Dr M. Taheri	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Examineur
Dr. M CHAIB	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Encadreur
Dr. A GOURBI	Institut des Sciences et Techniques Appliquées Université Oran 1	Co-encadreur
Mr S SLIMANE	Centre de Développement des Satellites	Co-encadreur

Année Universitaire 2024-2025

Résumé

Dans un contexte où la précision des mesures mécaniques devient un enjeu crucial pour les domaines de l'aéronautique, de l'automobile, du génie civil et de la maintenance industrielle, ce mémoire s'inscrit dans une démarche de conception et de réalisation de deux dispositifs de mesure basés sur l'utilisation de jauges de contrainte à résistance électrique. Le recours à des solutions locales et didactiques dans ce domaine représente une alternative stratégique face à l'absence d'infrastructures spécialisées en instrumentation de mesure en Algérie.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir, fabriquer et valider deux dispositifs expérimentaux : une clé dynamométrique électronique permettant la mesure en temps réel du couple de serrage, et un banc didactique dédié à l'étude expérimentale des contraintes mécaniques (traction, flexion, torsion). Ces dispositifs visent à répondre à la fois à des besoins pédagogiques pour la formation des étudiants en instrumentation, et à des besoins techniques pour le contrôle des assemblages mécaniques.

Le projet repose sur l'intégration de capteurs à jauge de contrainte montés en pont de Wheatstone, associés à des modules de conditionnement de signal (HX711), et pilotés par des microcontrôleurs Arduino Nano. Les données sont ensuite affichées en temps réel sur des écrans OLED ou LCD I2C, permettant une lecture directe des mesures de couple ou de déformation. La partie électronique a été modélisée, simulée et réalisée sous forme de circuits imprimés à l'aide du logiciel EasyEDA, avec un soin particulier apporté à la miniaturisation et à la fiabilité des composants.

La validation métrologique a été assurée par une série d'essais d'étalonnage effectués à l'aide de capteurs de référence, selon une méthodologie rigoureuse permettant de déterminer les incertitudes de mesure, la répétabilité, et la linéarité des dispositifs développés. Ces essais ont permis de confirmer la précision et la stabilité du système dans différentes configurations d'effort.

Le travail présenté couvre ainsi trois volets complémentaires : une étude théorique approfondie des principes mécaniques et électromécaniques liés aux jauges de contrainte, une conception matérielle complète allant de l'idée à la réalisation physique, et enfin une validation expérimentale basée sur des normes métrologiques. Ce mémoire ambitionne de démontrer que des solutions fiables, pédagogiques et reproductibles

peuvent être conçues localement pour la mesure des efforts mécaniques, tout en contribuant à la formation pratique dans le domaine de l'instrumentation.

DÉDICACES

BACHA Abdelhadi

« Ce travail est dédié à toute la famille Bacha, en particulier à mes très chers parents, à ma petite sœur Siham, à mes frères, ainsi qu'à toute ma grande famille ».

AZIZI Hadj

*« Je dédie ce travail à ma famille, source de mon courage et de ma motivation. Un remerciement tout particulier à **mes parents**, pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien inconditionnel tout au long de mon parcours ».*

Remerciement

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

Tout d’abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur **Slimane Sid Ahmed** pour sa supervision, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de ce projet.

Nous remercions également Messieurs **Gourbi Abdelkader** et **Chaib Mohammed** pour leur soutien, tant scientifique que moral, ainsi que pour les conditions favorables qu’ils ont mises en place pour nous permettre de travailler dans les meilleures circonstances.

Nos remerciements s’adressent également à l’ensemble des enseignants qui nous ont transmis leurs connaissances. Nous remercions particulièrement **Monsieur Yazid** pour ses explications claires sur les méthodes de mesure et d’étalonnage, qui nous ont grandement aidés à obtenir des résultats fiables. Un grand merci aussi à **Monsieur Cheriet Amine** pour son assistance technique, à **Monsieur Djabra Hussine** pour les informations techniques concernant notre projet, ainsi qu’à **Monsieur Boudia** pour son soutien dans la réalisation pratique.

Nous exprimons également notre reconnaissance à la direction de la Fondation, pour son appui et son soutien matériel et logistique.

Enfin, nous adressons nos remerciements les plus sincères à nos familles et à nos collègues — en particulier **Mehidi Djamel**, **Allouche Sid Ahmed** et **Ferdi Abess** — pour leur soutien constant, leur patience et leurs encouragements tout au long de ce parcours. Nous espérons que ce travail, accompli avec sincérité, portera ses fruits, avec l’aide de Dieu.

Liste des abréviations

PWM: Pulse Width Modulation.

E/S: Entrées / Sorties.

SPRAM : Serial Peripheral RAM.

CPU: Central Processing Unit.

AVR: Advanced Virtual RISC.

GBW : Gain-Bande Passante.

CMRR : Common Mode Rejection Ratio.

VVF4 : Variator de Voltage Farmator 4.

EEPROM : Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory.

VDD : Analog Voltage Drain Drain.

VSUP : Voltage Supply.

AGND : Analog Ground.

PD_SCK : Power Down + Serial Clock.

DOUT : Data Out.

VBG : Voltage BandGap.

DVDD : Digital Voltage Drain Drain.

Système C.G.S : Centimètre, Gramme, Seconde.

Mt : moment de torsion.

Mf : moment de flexion.

E : module de Young.

G : module d'élasticité transversal.

σ : Contrainte normale.

τ : Contrainte tangentielle.

ε : Déformation.

Table de matières

RESUME	II
DÉDICACES	IV
REMERCIEMENT	V
LISTE DES ABREVIATIONS	VI
TABLE DE MATIERES	VII
LISTE DE FIGURES.....	VII
LISTE DE TABLES.....	VII
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : FONDEMENTS THEORIQUES DE LA MESURE DES CONTRAINTES MECANIQUES.....	4
1.1 Introduction.....	4
1.2 Généralités sur les contraintes et les déformations :.....	4
1.2.1 Notions de contrainte et de déformation :.....	4
1.2.2 État de contraintes (contraintes normales et tangentielles) :.....	6
1.2.3 Sollicitations mécaniques :	6
1.3 Jauges de contrainte à résistance électrique :.....	9
1.3.1 Historique :.....	9
1.3.2 Définition de jauge de contrainte :.....	9
1.3.3 Principe de fonctionnement :	10
1.3.4 Effets perturbateurs :.....	14
1.3.5 Conditionnement de la mesure :	15
1.3.6 Mesure des Sollicitations par les jauges de la contrainte :.....	16
1.4 Applications industrielles.....	20
Applications industrielles des jauges de contrainte	21
1.5 Conclusion :	22
CHAPITRE 2 : DESCRIPTION DES DISPOSITIFS DE MESURE	23
2.1 Introduction :.....	23
2.2 Principe de mesure du couple de serrage :.....	23
2.2.1 Définition de la clé dynamométrique :.....	23
2.2.2 Fonctionnement de clé dynamométrique :.....	24

Table de matières

2.2.3 Matériel utilisé :	24
2.2.3 Chain de mesure :	25
2.3 Banc didactique de jauges de contrainte :	26
2.3.1 Définition de La carte d'acquisition du banc didactique des jauges de contraintes :	26
2.3.2 Le banc didactique des jauges de déformation :	26
2.3.3 Les objectifs pédagogiques :	27
2.3.4 Les caractéristiques techniques :	27
2.3.5 Matériel utilisé :	28
2.3.6 Chaîne de mesure :	28
2.3.7 Description de l'éprouvette :	29
2.4 Description de matériel utilisé :	31
2.4.1 Module hx711 :	31
2.4.2 Capteur de pesage :	36
2.4.3 Arduino nano.....	40
2.4.4 Afficheur bleu OLED 128 × 64	42
2.4.5 Clé à cliquet	45
2.4.6 Jauge de contrainte.....	48
2.4.7 Afficheur LCD I2C :	51
2.4.8 Convertisseur mt 3608 :	53
2.4.9 Module charge tp4056 :	54
2.5 Conclusion	54
CHAPITRE 3 : CONCEPTION, REALISATION ET ANALYSE DES RESULTATS.....	56
3.1 Introduction :	56
3.2 Conception et réalisation de clé dynamométrique :	56
3.2.1 Réalisation de partie électronique :	57
3.2.2 Réalisation de partie mécanique :	62
3.2.3 Partie calibrage.....	66
3.3 Réalisation de la carte d'acquisition de banc didactique :	82
3.3.1 Conception et réalisation de la carte électronique :	83
3.4 Collage et le soudage de la jauge de contrainte :	87
3.4.1 Le matériel utilisé :	87
3.4.2 Nettoyage et traçage de la pièce :	88
3.4.3 Collage :	88
3.4.4 Soudage :	89

Table de matières

3.5 Conclusion :	89
CONCLUSION GENERALE :	90
BIBLIOGRAPHIE.....	91
ANNEX : 94	
1. Opérations de collage des jauges	94
2.1 Hypothèse en RDM.....	99
2.2 Les actions mécaniques.....	101
2.3 Définition des liaisons poutre/bâti	102
2.4 Les forces extérieures	102
Plan de symétrie.....	102
Types d'actions mécaniques extérieures.....	102
3.1 Les déformations.....	103
4.1 Torseur des efforts de cohésion :	103
Définition :	103
4.2 Composantes du torseur de cohésion :	104
5.1 Définition de contrainte :	106
5.1.1 Notion des contrainte – Principe de détermination :	107
Contrainte en un point M d'une section S	107
5.1.2 Théorème de Cauchy : équilibre des vecteurs contraintes :	108
5.2 Contrainte normale :	109
5.3 Contraintes tangentiels.....	109
6. Les sollicitations :	110
6.1 Traction :	110
Essai de Traction :	111
Déformations élastiques :	111
Contraintes :	111
Loi de HOOKE :	112
6.2 Compression :	112
Essai de compression :	113
Déformations élastiques :	113
Contraintes :	113
Loi de HOOKE :	113
6.3 Cisaillement :	113
Essai de cisaillement :	115

Table de matières

Déformations élastiques :.....	116
Contraintes :.....	116
Relation entre contrainte et déformation :	116
6.4 Torsion :	116
Essai de torsion :	117
Déformations élastiques :.....	118
Contraintes :.....	118
6.5 Flexion :	119
Hypothèses :.....	119
Définition	120
Essai de flexion (domaine élastique)	120
Contraintes :.....	122
Élasticité plane :.....	122
Transformation de contraintes :	123

Liste de figures

Figure 1: Comportement (relation contrainte-déformation) de l'acier en traction simple	5
Figure 2: Contrainte normale, contrainte tangentielle.....	6
Figure 3: Traction, compression	7
Figure 4: Cisaillement	7
Figure 5: Torsion	8
Figure 6: Flexion	8
Figure 7: Dynamomètre de Simmons	9
Figure 8: Illustration de jauge de contrainte	10
Figure 9: Illustration du phénomène de déformation présent dans les jauges de contrainte	11
Figure 10: Montage pont de wheaston.....	15
Figure 11: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction et compression	17
Figure 12: montage rosette de jauge de contrainte [10]	18
Figure 13: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en cisaillement	19
Figure 14: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en flexion	20
Figure 15: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en torsion	20
Figure 16: Clé dynamométrique	23
Figure 17: Organigramme de chaine de mesure de clé dynamométrique	25
Figure 18: Carte d'acquisition de banc didactique.....	26
Figure 19: Banc didactique	27
Figure 20: Organigramme de chaîne de mesure du banc didactique.....	29
Figure 21: Panneau sandwich	30
Figure 22: (a) Panneau sandwich en nid-d'abeilles avec insert collé à la frontière. (b) Géométrie de la cellule en nid-d'abeilles.	30
Figure 23: Les forces appliquées aux panneaux pour les essais	31
Figure 24: Module hx711	31
Figure 25: Schéma fonctionnelle de hx711	32
Figure 26: Conversion data.....	34
Figure 27: Signal de Réinitialisation et mise hors tension.....	35
Figure 28: Capteur de poids	37
Figure 29: Fonctionnement du jauge de contrainte en capteur pesage	37
Figure 30: Cablage capteur poids avec hx711 [17]	40
Figure 31: Branches Arduino nano	42
Figure 32: Afficheur OLED	43
Figure 33: Raccorder un écran OLED à l'Arduino	45

Liste de figures

Figure 34: Clé à cliquet	45
Figure 35: Description de clé dynamométrique	46
Figure 36 : jauge de contrainte	48
Figure 37: Montage pont wheaston	49
Figure 38: Montage quart de pont.....	49
Figure 39: Deux jauges de contrainte	50
Figure 40: Montage en demi-pont	51
Figure 41: Motage en pont complet	51
Figure 42 : Afficheur LCD I2C	52
Figure 43 : Le branchement L'affichage_LCD avec Arduino	53
Figure 44: Convertisseur mt3608	54
Figure 45: Module charge 4056.....	54
Figure 46: Couple de serrage	57
Figure 47 : Logiciel EasyEDA	58
Figure 48 : Schéma électronique de carte d'acquisition et affichage.....	59
Figure 49 : Design de circuit PCB de circuit d'acquisition et affichage.....	59
Figure 50 : Vue 3D de circuit d'acquisition et affichage	60
Figure 51 : Carte d'acquisition et affichage	60
Figure 52 : Schéma électronique de circuit d'alimentation	61
Figure53 : Design du circuit PCB de la carte d'alimentation	61
Figure 54: Carte d'alimentation de la clé dynamométrique	61
Figure 55 : Solidworks	62
Figure 56 : La conception 3D de la clé dynamométrique	62
Figure 57: L'opération de découpe de la clé à cliquet	63
Figure 58 : Montage final de clé dynamométrique.....	63
Figure 59: Fonctionnement du boutons	64
Figure 60: L'affichage de menu	64
Figure 61 : Code arduino de clé dynamométrique	65
Figure 62 : Logiciel fusion.....	65
Figure 63 : Conception 3D de la boîte	66
Figure 64 : Capteur de couple BLM SRTT-B 5 Nm-13	67
Figure 65: Table de calibrage	68
Figure 66 : Fixation de la clé a distance 18.5 cm	69
Figure 67 : Instrument de référence	69
Figure 68 : L'affichage de mesure sur l'excel	70
Figure 69 : Courbe d'étalonnage d'essai 1	71
Figure 70 : Fixation de la clé d'essai 2.....	73
Figure 71: Courbe d'étalonnage de l'essai 2	74
Figure 72: Mesure de température et l'humidité.....	75
Figure 73 : Fixation la clé pour l'essai 3	76
Figure 74 : Courbe d'étalonnage de l'étalonnage de l'essai 3	77
Figure 75 : La courbe l'incertitude relative en déférent position	78

Liste de figures

Figure 76: Capteur de couple BLM SRTT-B 25 Nm-36	80
Figure 77: Courbe d'étalonnage de l'étape 2	81
Figure 78: Test de la clé	82
Figure 79 : Schéma électronique de la carte d'acquisition	83
Figure 80 : Design de plaque PCB	84
Figure 81 : Vue 3D de circuit d'acquisition	84
Figure 82: Carte d'acquisition	85
Figure 83 : Conception de la boîte du la carte d'acquisition de banc didactique.....	85
Figure 84: Fonctionnement du boutons	86
Figure 85: Code arduino de carte d'acquisition de banc didactique	87
Figure 86: Matériel utilisé en collage et soudage de jauge de contrainte.....	87
Figure 87 : Nettoyage et traçage de la pièce	88
Figure 88: Collage de jauge de contrainte.....	88
Figure 89 : Soudage de fils	89
Figure 90 : 1ère opération de collage	94
Figure 91 : 2ème opération de collage	95
Figure 92 : 3ème opération de collage	95
Figure 93 : 4ème opération de collage.....	96
Figure 94 : 5ème opération de collage.....	96
Figure 95 : 6ème opération de collage.....	97
Figure 96 : 7ème opération de collage.....	97
Figure 97 : 8ème opération de collage.....	98
Figure 98 : 9ème opération de collage.....	98
Figure 99 : 10ème opération de collage.....	98
Figure 100 : 11ème opération de collage	99
Figure 101 : Matériaux anistropes	100
Figure 102 : La poutre après et avans la déformation	100
Figure 103: Distribution du contraintes sur une poutre.....	101
Figure 104: Types d'actions	103
Figure 105 : Déformation d'une poutre.....	103
Figure 106 : Section d'un solide	104
Figure 107: Sommes des forces et contraintes.....	105
Figure108 : Contraintes de la solide.....	106
Figure109 : Forces appliqué sur un solide	106
Figure 110: Notion des contrainte – Principe de détermination	107
Figure 111 : Représentation des contraintes internes d'un solide	108
Figure112 : Distribution du contraintes normales	109
Figure113 : Distribution de la contrainte tangentielle.....	110
Figure 114 : L'influence de la traction sur un solide.....	110
Figure115 : Forces appliquées lors d'un essai de traction	111
Figure 116 : Graphe d'épreuve de l'essai de traction.....	111
Figure 117: Contrainte de traction	112

Liste de figures

Figure 118: Forces appliquées lors d'un essai de compression	112
Figure 119 : Graphe de l'essai de compression.....	113
Figure 120 : Les forces appliquée en essai de cisaillement	114
Figure121 : La direction de la contrainte de cisaillement selon les axes x, y et z	114
Figure122 : L'influence du cisaillement sur un solide	114
Figure124 : Graphe de l'essai de cisaillement	115
Figure123 : Contrainte de cisaillement.....	115
Figure 125 : Équilibre des couples de torsion et efforts internes.....	117
Figure126 : Graphe d'essai de torsion.....	117
Figure127 : Schéma de l'essai de torsion sur une poutre sollicitation et paramètres géométriques	118
Figure 128 : Distribution des contraintes de torsion dans une section droite (S).....	119
Figure 129 : Représentation schématique des hypothèses de la flexion plane simple	120
Figure 130 : Torseur des efforts de cohésion en flexion plane	120
Figure 131 : Schéma de l'essai de flexion plane simple	121
Figure 132 : Distribution des déformations en flexion plane : allongement et raccourcissement relatif des fibres	122
Figure 133: Distribution de la contrainte normale en fonction de la fibre neutre lors de la flexion plane	122
Figure 134 : Transformation des Contraintes dans un Repère Roté	123

Liste de tables

Table1 :Les dimensions du panneau en nid-d'abeilles.....	31
Table 2 : Tableau d'impulsions PD_SCK [19]	34
Table 3 : Tableau description de graph de conversion data [19].....	35
Table 4 : Description de branches [18]	36
Table5 : Les mesures d'essai 1	70
Table6 : Information d'équation de calibrage.....	71
Table7 : calcule l'incertitude d'essai 1	72
Table8 : les mesures de l'essai 2.....	74
Table9 : calcul l'incertitude de l'essai 2	75
Table10 : les mesures de l'essai 3	76
Table11 : calcul l'incertitude de l'essai 3	77
Table 12 : l'incertitude relative en déférent position	77
Table13 : les mesures de calibrage 20Nm	80
Table14 : calcul l'incertitude de l'étape 2.....	81
Table 15 :Tableau d'appui	102
Table 16 :Tableau de sollicitation	106

Introduction générale

Dans un monde industriel en constante évolution, les exigences en matière de sécurité, de fiabilité et de performance des équipements deviennent de plus en plus rigoureuses. Dans des domaines tels que l'aéronautique, l'automobile, le génie civil ou encore le biomédical, il est essentiel de surveiller en temps réel les efforts mécaniques subis par les composants critiques. Comprendre et maîtriser les contraintes internes, les déformations et les phénomènes de fatigue constitue une étape indispensable pour garantir la durabilité des structures, prévenir les défaillances et optimiser les conceptions mécaniques.

Parmi les différentes méthodes de mesure existantes, les jauges de contrainte à résistance électrique — ou jauges extensométriques — représentent l'un des outils les plus fiables, précis et largement répandus. Leur principe repose sur une propriété physique fondamentale : la résistance électrique d'un conducteur varie légèrement lorsqu'il est soumis à une déformation. En collant une jauge sur une pièce mécanique et en mesurant les variations de résistance, il devient possible d'estimer avec précision les déformations locales, et donc les contraintes mécaniques appliquées.

Cependant, la mise en œuvre de ce type de capteur nécessite des connaissances pluridisciplinaires : mécanique des solides, électronique de conditionnement du signal, acquisition numérique et programmation. Cette transversalité fait de l'étude des jauges de contrainte un sujet à la fois riche sur le plan théorique et formateur sur le plan pratique.

Le présent mémoire, réalisé dans le cadre d'un Master en Instrumentation et Métrologie, s'inscrit pleinement dans cette approche. Il vise à étudier, concevoir et mettre en œuvre deux dispositifs expérimentaux complémentaires fondés sur l'utilisation des jauges de contrainte :

- **Une clé dynamométrique électronique**, destinée à mesurer le couple de serrage en temps réel. Contrairement aux modèles mécaniques traditionnels, la version électronique développée ici permet une lecture directe et précise du couple appliqué, offrant ainsi un outil de contrôle fiable et reproductible.
- **Un banc didactique d'étude des jauges de contrainte**, permettant d'observer les réactions d'éprouvettes soumises à différentes sollicitations (traction,

flexion, torsion). Ce banc constitue une plateforme pédagogique complète pour l'apprentissage de la mesure des contraintes et de la résistance des matériaux.

Bien que destinés à des usages distincts, ces deux systèmes reposent sur une architecture commune : les mêmes capteurs (jauges de contrainte), le même principe de mesure (pont de Wheatstone), le même module de conditionnement (HX711), ainsi que le même microcontrôleur (Arduino Nano). Cette homogénéité démontre la souplesse d'intégration des jauges extensométriques dans des environnements variés.

Les objectifs de ce travail sont multiples. Il s'agit d'abord de poser un cadre théorique rigoureux, en revisitant les principes fondamentaux de la mécanique des milieux déformables (lois de Hooke, contraintes, déformations), et les caractéristiques propres aux jauges de contrainte (facteur de jauge, sensibilité, effets thermiques, etc.). Ensuite, il convient de développer les systèmes de mesure à l'aide de composants électroniques modernes, accessibles et open-source. Enfin, ces dispositifs sont validés expérimentalement à travers des procédures de calibration, des campagnes de mesure et une confrontation aux résultats théoriques.

Ce projet s'inscrit également dans une démarche pédagogique. Les dispositifs conçus permettent une visualisation concrète et interactive de notions abstraites telles que la déformation, la contrainte et la réponse mécanique. Ils peuvent ainsi être utilisés aussi bien en formation académique qu'en contexte industriel (contrôle qualité, maintenance, optimisation de conception).

Ce mémoire s'adresse donc à un public large : étudiants, enseignants, ingénieurs, techniciens et chercheurs intéressés par la mesure des efforts mécaniques, la métrologie appliquée et l'instrumentation embarquée. Il entend démontrer que, bien que vieille de plusieurs décennies, la technologie des jauges extensométriques reste d'actualité et peut, à l'ère de l'électronique numérique et des systèmes intelligents, jouer un rôle central dans le développement de solutions innovantes, accessibles et robustes.

Le mémoire est organisé comme suit :

Chapitre 1 : Présente les fondements théoriques liés aux jauges de contrainte, aux lois mécaniques, au pont de Wheatstone, et au conditionnement du signal.

Chapitre 2 : Décrit les dispositifs conçus (clé dynamométrique et banc didactique), leurs composants matériels et leur fonctionnement.

Chapitre 3 : Détaille les étapes de réalisation, de calibration, d'expérimentation, et d'analyse des résultats, tout en discutant les performances et les perspectives d'amélioration.

Chapitre 1 : Fondements théoriques de la mesure des contraintes mécaniques

1.1 Introduction

Les jauges de contrainte à résistance électrique, communément appelées jauges extensométriques, constituent des capteurs indispensables dans le domaine de l'instrumentation et de la mesure des déformations mécaniques. Elles reposent sur le principe selon lequel la résistance électrique d'un conducteur varie lorsqu'il est soumis à une déformation. Grâce à ce phénomène, il est possible de mesurer avec précision les contraintes internes au sein d'une structure.

Ce chapitre présente les fondements théoriques de la résistance des matériaux, en particulier la relation entre déformation mécanique et variation de résistance électrique. Nous aborderons également la manière dont les jauges de contrainte permettent de mesurer différentes sollicitations mécaniques, ainsi que leurs applications en instrumentation.

1.2 Généralités sur les contraintes et les déformations :

1.2.1 Notions de contrainte et de déformation :

1.2.1.1 Définition de la contrainte :

La contrainte est une grandeur vectorielle caractérisée par une origine, une direction, un sens et une intensité. Elle correspond au rapport entre une force F appliquée et une surface élémentaire dS sur laquelle elle agit. Son unité est le pascal (Pa) ou le bar (1 bar = 10⁵ Pa, en système C.G.S). [1]

On dit qu'une contrainte est oblique lorsqu'elle n'est pas perpendiculaire à la surface. Elle peut alors être décomposée en deux composantes [1] :

Une contrainte normale σ_n , perpendiculaire à la surface,

Une contrainte tangentielle ou contrainte de cisaillement τ , parallèle à la surface.

$$\vec{\sigma} = \frac{d\vec{F}}{dS} \dots\dots\dots (1)$$

1.2.1.2 Définition de déformation :

La déformation c'est toute opération qui conduit au changement de forme, de dimension ou de localisation d'un objet donné, depuis un état initial à un état final. Elle se mesure en comparant les longueurs initiales L_0 et finales L_1 des axes représentatifs avant et après déformation C'est ce qu'on appelle l'élongation ε avec [1] :

$$\varepsilon = \frac{L_1 - L_0}{L_0} \dots\dots\dots (2)$$

1.2.1.3 La relation entre la contrainte et la déformation :

La relation entre la contrainte et la déformation est exprimée par la loi de Hooke, qui décrit le comportement des matériaux dans le domaine élastique. Elle établit que, dans certaines limites, la déformation est proportionnelle à la contrainte appliquée. En traction ou compression simple, cette relation s'écrit [1] :

$$\sigma = E \times \varepsilon \dots\dots\dots (3)$$

La contrainte est représentée par σ , la déformation par ε .

Le module de Young est une caractéristique du matériau. Plus on force, plus le matériau se déforme. Mais tant qu'il reste dans son domaine élastique, il se déforme linéairement. Quand les demandes sont plus compliquées, cette relation devient plus générale. Elle prend en compte les déformations et les contraintes dans toutes les directions de l'espace. Pour cela, elle utilise des tenseurs. Mais elle reste basée sur le même principe de proportionnalité. Ce principe s'applique aux matériaux isotropes et homogènes. [1]

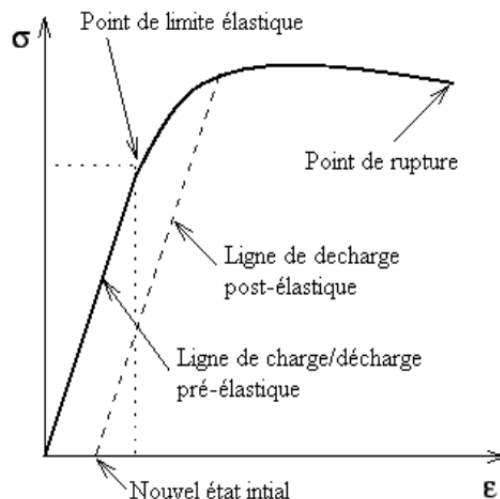


Figure 1:Comportement (relation contrainte-déformation) de l'acier en traction simple

1.2.2 État de contraintes (contraintes normales et tangentielles) :

La contrainte normale est la composante de la contrainte qui agit perpendiculairement à la surface considérée. Elle tend à étirer (traction) ou compresser le matériau. [2]

Par définition, si un élément de surface dS est coupé à angle droit et qu'une force $d\vec{F}$ s'y applique, la contrainte normale est [2] :

$$\sigma_n = \frac{d\vec{F}_\perp}{dS} \dots\dots\dots (4)$$

La contrainte tangentielle, c'est la force qui agit parallèlement à la surface. Elle fait glisser les parties du matériau les unes contre les autres.

Elle est définie par [2] :

$$\tau = \frac{d\vec{F}_\parallel}{ds} \dots\dots\dots (5)$$

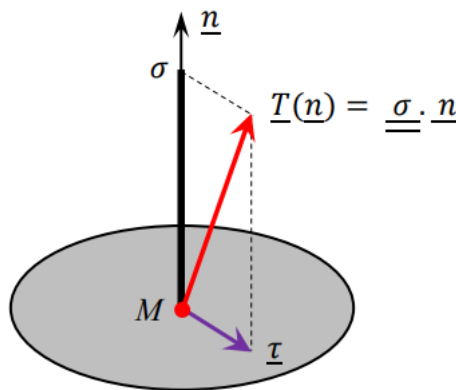


Figure 2:Contrainte normale, contrainte tangentielle

1.2.3 Sollicitations mécaniques :

Les sollicitations mécaniques, c'est l'action d'une force sur un objet ou un matériau. Elles peuvent étirer, comprimer, plier, tordre ou faire glisser les parties du matériau entre elles. Cela déforme le matériau. [2]

Traction :Une poutre est sollicitée à la traction simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à l'allonger. [3]

Compression : une poutre est sollicitée à la compression simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à la raccourcir. [3]

La déformation provoquée est décrite par la loi de Hooke, donnée par la relation :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (6)$$

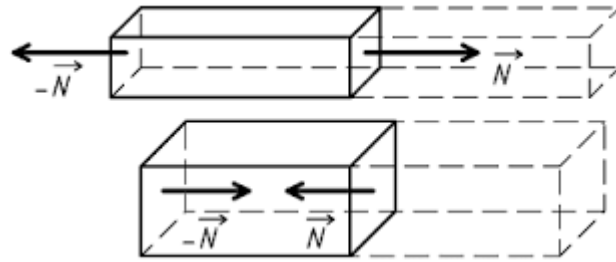


Figure 3: Traction, compression

Cisaillement : Une poutre subit une sollicitation de cisaillement simple lorsqu'elle est soumise à deux systèmes d'action de liaison qui se réduisent dans un plan (P) perpendiculaire à la ligne moyenne à deux forces directement opposées. [3]

Le cisaillement est décrit par la loi de Hooke sous la forme suivante [3] :

$$\tau = G \cdot \gamma \dots\dots\dots (7)$$

Où τ est la contrainte de cisaillement, G le module de cisaillement, et γ la déformation angulaire.

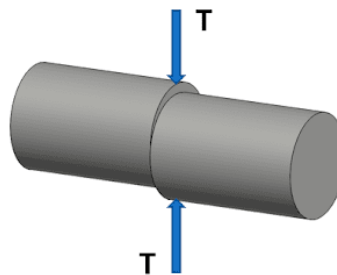


Figure 4: Cisaillement

Torsion : Une poutre est sollicitée en torsion simple lorsqu'elle est soumise à ses deux extrémités à des liaisons dont les torseurs associés se réduisent à deux torseurs couples opposés dont les moments sont parallèles à l'axe du cylindre. [3]

Formule de la contrainte en torsion (relation avec M_t) [3] :

$$\tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho}\right)} \dots\dots\dots (8)$$

Où :

- ✓ τ : contrainte de cisaillement (Pa).
- ✓ M_t : moment de torsion (N·m).
- ✓ ρ : distance au centre de l'axe (m).
- ✓ I_0 : moment polaire d'inertie (m⁴).



Figure 5: Torsion

Flexion : Une poutre est sollicitée en flexion plane simple lorsque le système des forces extérieures se réduit à un système coplanaire et que toutes les forces sont perpendiculaires à la fibre moyenne. [3]

Lorsqu'une poutre est soumise à un moment de flexion M_f , il apparaît une contrainte normale σ dans la section transversale, donnée par la formule [3] :

$$\sigma = \frac{M_f}{I_z} \cdot y \dots\dots\dots (9)$$

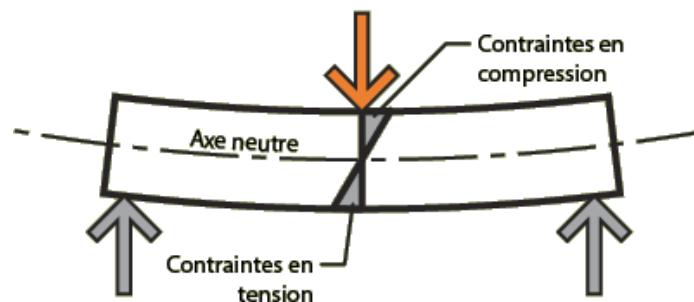


Figure 6: Flexion

1.3 Jauges de contrainte à résistance électrique :

1.3.1 Historique :

Les mesures des contraintes sont le fait de Lord Kelvin, qui a mené des expériences sur les propriétés électromécaniques des matériaux en 1856, où il a découvert que l'allongement d'un matériau conducteur augmentait sa résistance électrique. Cet effet peut aussi s'expliquer par une résistance accrue des circuits électriques à haute température, mais cette découverte n'a pas trouvé d'applications pratiques immédiates. Dans les années 1930, les scientifiques Simmons et Roge ont développé les premières mesures de contrainte dans les laboratoires du MIT et de Caltech, où l'appareil était connu sous le nom de dynamomètre, constitué d'un corps en papier enveloppé dans un fil de cuivre. En 1952, Sanders et Roh ont mis au point la première jauge de contrainte utilisant une technologie à grille fine par gravure optique, ce qui a permis d'améliorer la précision de la jauge en contrôlant avec précision la résistance du fil, ainsi qu'en réduisant sa taille, ce qui l'a rendu plus efficace dans les applications d'ingénierie. Grâce à ces développements, les mesures de contraintes actuelles sont devenues un outil essentiel en ingénierie et en mécanique, utilisées pour mesurer les contraintes dans différentes structures et matériaux afin d'assurer leur sécurité et leur efficacité. [4] [5]

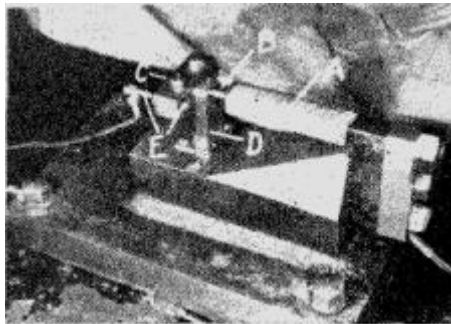


Figure 7: Dynamomètre de Simmons

1.3.2 Définition de jauge de contrainte :

La jauge de contrainte est l'un des outils les plus importants de la technique de mesure électrique appliquée à la mesure de quantités mécaniques. Comme leur nom l'indique, elles sont utilisées pour la mesure de contrainte. [5] [6] [4]

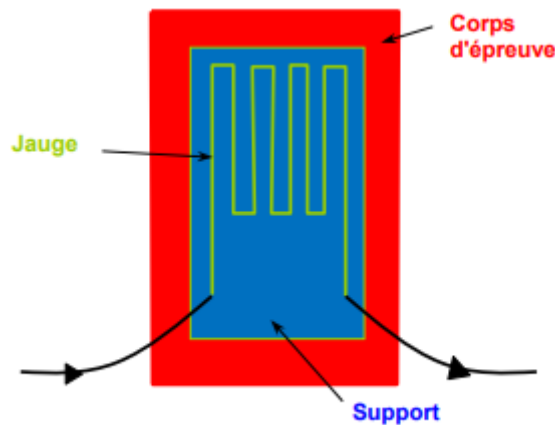


Figure 8: Illustration de jauge de contrainte

- **La jauge :** Circuit métallique peu épais (de l'ordre du μm), ayant une résistance électrique qui varie lorsqu'il subit une déformation. La jauge doit être apte à résister à haute température et à l'usure. La jauge de contrainte est fixée sur un support. [6] [5]
- **Le support :** Il sert de lien entre le corps d'épreuve et la jauge. Il doit donc être souple et isolant. Ce support est en résine. La fabrication de la jauge et du support est identique à celle des circuits imprimés. [6] [5]
- **Le corps d'épreuve :** C'est le corps qui subira la déformation. Il doit être souple et élastique. Le support est fixé dessus. Il faut éviter de sortir de sa gamme de déformation élastique pour éviter tout risque de déformation permanente. [6] [5]

1.3.3 Principe de fonctionnement :

Dans sa forme la plus simple, jauge de contrainte se compose de fil très fin 2 microns d'épaisseur conducteur est collé sur une surface de support. Cette couche fine est disposée selon une forme particulière, où les poils filetés sont principalement alignés sur la direction de mesure. Comme le fil est fermement fixé à la surface, il est exposé aux mêmes distorsions que la surface montée, ce qui permet une mesure précise des changements de contrainte. [4] [6] [5]

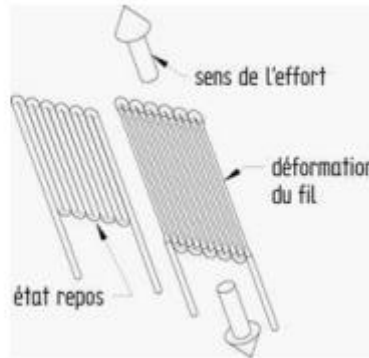


Figure 9: Illustration du phénomène de déformation présent dans les jauges de contrainte

Théorie de piézorésistive : L'effet piézorésistive explique le changement de la résistivité électrique d'un matériau lorsqu'il est soumis à des contraintes mécaniques. L'effet a été découvert en 1856 par William Thompson

(Communément connu sous le nom de Lord Kelvin) et plus tard par J. S. Smith pour Germanium and Silicon. Lorsqu'un matériau piézorésistive est déformé, le changement relatif $\frac{dR}{R}$ en résistance électrique est induite par un composant géométrique et électronique et peut être décrite par : [4]

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \dots\dots\dots (10)$$

Où l est la longueur de la résistance, S sa section et ρ sa résistivité.

$\frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} \Rightarrow$ Géométrique est $\frac{d\rho}{\rho} \Rightarrow$ électronique.

Les changements de dimensions induits par compression ou extension du matériau sont la cause de la composante géométrique, tandis que le composant électronique est causé par les propriétés de la structure de bande du matériau. [4]

La résistance d'un fil conducteur est définie par la loi de Pouillet :

$$R = \frac{\rho l}{S} \dots\dots\dots (11) [4]$$

$$\ln R = \ln \rho + \ln l - \ln S \dots\dots\dots (12)$$

$$\Rightarrow \frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{dS}{S} + \frac{d\rho}{\rho} \dots\dots\dots (13)$$

Selon la Loi sur la conservation des volumes, le changement relatif de l'espace est associé au coefficient de Poisson ν :

On a :

$$\frac{dS}{S} = -2\nu \frac{dl}{l} \dots\dots\dots(14)$$

Donc :

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \frac{dl}{l} + \frac{d\rho}{\rho} \dots\dots\dots(15)$$

En conclue que le changement de résistance est en relation avec le changement de la résistivité et changement géométrique. [4]

En structure atomique :

D'après la théorie de la physique atomique, la résistivité au niveau atomique est régie par l'équation suivante :

$$\rho = \frac{2mV_0}{ne^2\lambda} \dots\dots\dots(16)$$

- m est la masse d'un électron (constante).
- V_0 est la vitesse moyenne des électrons.
- n est la densité des électrons dans le conducteur, en particulier

$$n = \frac{N_0}{Sl} \dots\dots\dots(17)$$

avec N_0 le nombre total d'électrons dans le conducteur, S et l sont les dimensions du conducteur.

- e est la charge d'un électron (constante).
- λ est la distance moyenne de parcours d'un électron entre deux collisions. [4]

En remplace l'équation de n en l'équation de ρ trouve que :

$$\rho = \frac{2mV_0Sl}{N_0e^2\lambda} \dots\dots\dots(18)$$

La formulation différentielle de l'équation donne :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dV_0}{V_0} + \frac{dS}{S} + \frac{dl}{l} - \frac{dN_0}{N_0} - \frac{d\lambda}{\lambda} \dots\dots\dots(19)$$

et on a :

$$\frac{dS}{S} = -2v \frac{dl}{l} \dots\dots\dots(20)$$

donc :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dV_0}{V_0} + (1 - 2v) \frac{dl}{l} - \frac{dN_0}{N_0} - \frac{d\lambda}{\lambda} \dots\dots\dots(21)$$

Nous remplaçons cette équation en l'équation de $\frac{dR}{R}$ nous avons trouvons que :

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dl}{l} + \frac{dV_0}{V_0} - \frac{dN_0}{N_0} - \frac{d\lambda}{\lambda} \dots\dots\dots(22)$$

La sensibilité de la jauge est sa fonction de transfert à savoir la variation relative de résistance sur la variation relative de longueur. [4]

$$\frac{dR}{R} \frac{l}{dl} = 2 + \left(\frac{dV_0}{V_0} - \frac{dN_0}{N_0} - \frac{d\lambda}{\lambda} \right) \frac{l}{dl} \dots\dots\dots(23)$$

Par cette équation, nous notons que la sensibilité se compose de deux parties :

- ❖ Partie fixe : qui est 2, résultant de la déformation géométrique de la sonde (dilatation longitudinale).
- ❖ Partie variable : dépend des propriétés du matériau, c.-à-d. l'effet de facteurs électroniques tels que la vitesse moyenne des électrons V_0 , le nombre total d'électrons dans le conducteur N_0 la distance moyenne de parcours d'un électron entre deux collisions λ . [4]

La formule ne contient pas le coefficient de Young ou le coefficient de Boisson, ce qui signifie que la sensibilité de la jauge n'est pas affectée par les propriétés mécaniques du matériau, mais dépend plutôt des propriétés électroniques. Ainsi, les jauges peuvent être utilisés dans une large gamme de forces applicables, tant que la substance reste dans sa plage flexible sans entrer en distorsions permanentes. [4]

Pour avoir une utilisation linéaire de fonctionnement de la jauge, le matériau doit respecter la condition suivante :

$$k = \left(\frac{dV_0}{V_0} - \frac{dN_0}{N_0} - \frac{d\lambda}{\lambda} \right) \frac{dl}{l} \dots\dots\dots (24)$$

Lorsque la condition est respectée, le facteur $\frac{\frac{dR}{R}}{\frac{dl}{l}}$ est appelé facteur de jauge GF.

Donc:

$$GF = \frac{dR}{R} \frac{1}{\varepsilon} \dots\dots\dots (25)$$

$$\Rightarrow \frac{\Delta R}{R} = GF \cdot \varepsilon \dots\dots\dots (26)$$

avec :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (27)$$

1.3.4 Effets perturbateurs :

1.3.4.1 Température :

La température induit d'une part, la dilatation différentielle entre jauge et support, et d'autre part, des effets thermoélectriques liés à un écart de température entre deux points de raccordement. Pour minimiser l'influence de la température, on peut utiliser une configuration en double pont. Une jauge active, soumise à la déformation et aux variations de température, et une jauge passive soumise uniquement aux variations de température. En pratique, pour corriger les dérives de pente (sensibilité) en température, on place dans les deux branches d'alimentation une résistance en Nickel pur. Ces résistances vont modifier la tension d'alimentation aux bornes du pont de manière à compenser la dérive thermique. La dérive du signal à vide est un autre phénomène lié à la température (sans contrainte mécanique sur le corps d'épreuve). Cette dérive est aléatoire et est intrinsèque au pont de jauges. La correction se fait sur une branche du pont (dépendant du sens de la dérive) par l'ajout d'un bobinage de cuivre (lui-même va occasionner une dérive contraire à celle des jauges) [5].

1.3.4.2 Hystérésis :

Un capteur présente un phénomène d'hystérésis si l'information qu'il délivre est différente suivant que les mesures sont effectuées sous charge croissante ou décroissante. Cette source d'erreur est donc particulièrement gênante dans le cas de cycles de mesures avec montée et descente en charge répétées, ou en fonctionnement dynamique. L'hystérésis peut être positive ou négative. Contrairement à l'écart de linéarité, il n'est pas aussi simple de la compenser avec l'électronique de mesure. Il s'agit en effet d'une caractéristique liée aux matériaux constituant le corps d'épreuve et à la liaison corps d'épreuve-détecteur. Les aciers inoxydables, par exemple,

présentent une hystérésis positive importante et des traitements thermiques sont nécessaires afin de limiter ce phénomène [5].

1.3.4.3 Erreur de linéarité :

Un capteur présente une erreur de linéarité lorsque la courbe force-signal capteur n'est pas une droite parfaite. L'erreur de linéarité d'un capteur de force dépend du design du capteur (par exemple, lorsque la force croît, la répartition des forces varie ce qui influence la linéarité), mais aussi du choix des jauges. L'erreur de linéarité est toujours à minimiser. En production de série, le capteur est calibré en passant par deux points : le zéro et la force nominale. En minimisant l'erreur de linéarité, cette calibration suffit. Si l'erreur de linéarité est importante, il est nécessaire de passer par plusieurs points intermédiaires d'étalonnages [5].

1.3.5 Conditionnement de la mesure :

Le système de conditionnement concerne à la fois l'alimentation des jauges et le traitement de la mesure. Le conditionnement de la mesure se base sur un pont de Wheatstone. Ce dispositif a été inventé en 1833 by Samuel Hunter Christie et surtout amélioré par Sir Charles Wheatstone. A l'origine, le pont est utilisé pour mesurer des résistances inconnues. C'est aussi le cas dans l'utilisation des jauges de contrainte où les variations de courant sont relativement faibles pour être mesurées. L'utilisation de ponts de Wheatstone est attestée dès l'invention des jauges de contraintes par Simmons. Les jauges ont des valeurs de résistance normalisées : 120Ω 350Ω et 1000Ω étant les valeurs les plus courantes. [5] [4]

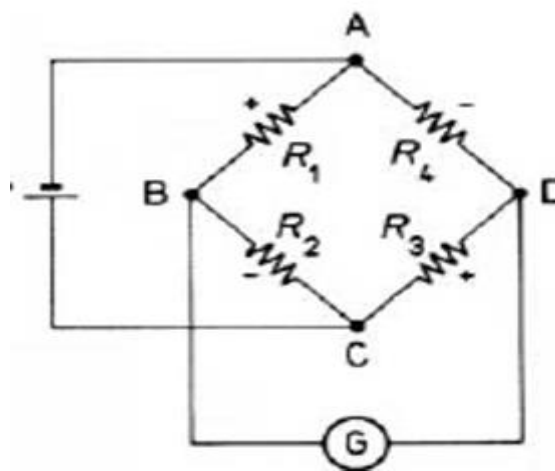


Figure 10: Montage pont de wheaston

Le pont de Wheatstone a comme loi de tension associée :

$$V_s = \left(\frac{R_2}{R_1+R_2} - \frac{R_3}{R_3+R_4} \right) V_e \dots\dots\dots(28)$$

Le pont est équilibré ($V_e = 0$) lorsque :

$$\frac{R_2}{R_1+R_2} = \frac{R_3}{R_3+R_4} \dots\dots\dots(29)$$

Si seul $R_2=R$ est variable (**jauge**) et les autres des résistance fixes.

À partir de la linéarisation, il y a :

$$V_s = V_e \cdot \left(V_s(0) + \left(\frac{\partial V_s}{\partial R} \cdot \Delta R \right) \right) \dots\dots\dots(30)$$

$$\Rightarrow V_s = V_e \cdot \left(V_s(0) + \frac{R_1}{(R_1+R)^2} \Delta R \right) \dots\dots\dots(31)$$

$\Rightarrow$ on a en l'équilibre $V_s(0) = 0$ et $R = R_1$ donc :

$$V_s = V_e \frac{\Delta R}{4R} = V_e \frac{GF}{4} \varepsilon \dots\dots\dots(32)$$

$$\Rightarrow \varepsilon = \frac{4V_s}{V_e \cdot GF} \dots\dots\dots(33)$$

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

$$V_s = V_e (V_s(0) + \left(\frac{\partial V_s}{\partial R_1} \cdot \Delta R_1 + \frac{\partial V_s}{\partial R_2} \cdot \Delta R_2 + \frac{\partial V_s}{\partial R_3} \cdot \Delta R_3 + \frac{\partial V_s}{\partial R_4} \cdot \Delta R_4 \right)) \dots\dots\dots(34)$$

$$V_s = V_e \cdot \left(-\frac{\Delta R_1}{4R_1} + \frac{\Delta R_2}{4R_2} + \frac{\Delta R_3}{4R_3} - \frac{\Delta R_4}{4R_4} \right) \dots\dots\dots(35)$$

$$\Rightarrow \frac{4V_s}{V_e \cdot GF} = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) [5] [4] \dots\dots\dots(36)$$

1.3.6 Mesure des Sollicitations par les jauges de la contrainte :

1.3.6.1 Mesure de Sollicitation traction et compression :

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 orthogonal et mesurent la déformation transversale. [5]

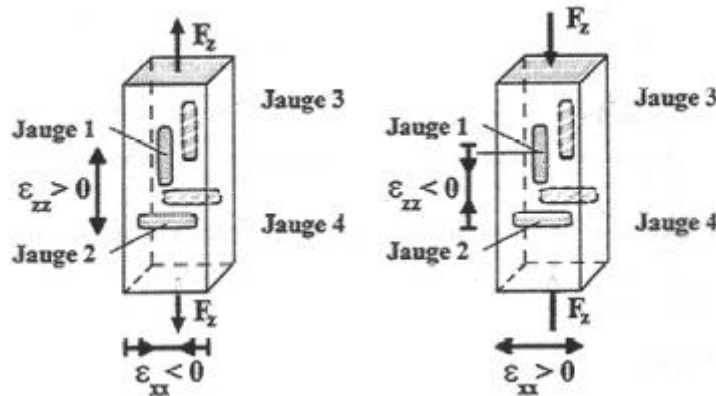


Figure 11: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction et compression

On a:

$$\frac{4Vs}{Ve.GF} = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \dots\dots\dots(37)$$

avec $\varepsilon_1, \varepsilon_3 \rightarrow \varepsilon_z$ et $\varepsilon_2, \varepsilon_4 \rightarrow \varepsilon_x$

donc:

$$\frac{2Vs}{Ve.GF} = (\varepsilon_z - \varepsilon_x) \dots\dots\dots(38)$$

avec $\varepsilon_z = -\nu\varepsilon_x$

$$\Rightarrow \varepsilon_z = \frac{2Vs}{Ve.GF(1+\nu)} \dots\dots\dots(39)$$

1.3.6.2 Mesure contrainte de cisaillement :

On peut mesurer la déformation de cisaillement (γ_{xy}) en utilisant simplement deux jauges de contrainte orientées à des angles différents, en particulier symétriquement autour d'un axe. Le cisaillement est alors proportionnel à la différence des déformations normales mesurées par ces jauges. [7] [8] [3] [9]

Déformations mesurées et transformation de jauge

On note le tenseur de déformation :

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \varepsilon_{xy} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_y \end{bmatrix} [8] [7] \dots\dots\dots(40)$$

Par changement de base (rotation d'un angle θ)

$$\Rightarrow \boldsymbol{\varepsilon}' = \mathbf{R} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} \mathbf{R}^T = \begin{bmatrix} \varepsilon_{x'} & \varepsilon_{x'y'} \\ \varepsilon_{y'x'} & \varepsilon_{y'} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(41)$$

On obtient :

$$\varepsilon_{x'} = \varepsilon_{\theta} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta + \varepsilon_{xy} \sin 2\theta \quad [8] [10] \dots\dots\dots(42)$$

avec:

$$\varepsilon_{xy} = \frac{\gamma_{xy}}{2} [8] [7] [9] \dots\dots\dots(43)$$

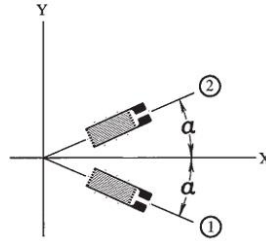


Figure 12: montage rosette de jauge de contrainte [10]

Lorsque deux jauges de contrainte sont orientées à des angles quelconques θ_1, θ_2 par rapport à un repère X-Y, et que ce repère est arbitrairement orienté par rapport aux axes principaux, les déformations mesurées par ces jauges ($\varepsilon_1, \varepsilon_2$) peuvent s'exprimer comme :

$$\varepsilon_1 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_1 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_1 \dots\dots\dots(44)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} + \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} \cos 2\theta_2 + \frac{\gamma_{xy}}{2} \sin 2\theta_2 \dots\dots\dots(45)$$

En soustrayant ces deux équations, on peut extraire le cisaillement γ_{xy} :

$$\gamma_{xy} = \frac{2 \left[\varepsilon_1 - \varepsilon_2 - \frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2} (\cos 2\theta_1 - \cos 2\theta_2) \right]}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2} \dots\dots\dots(46)$$

Si les jauges sont orientées symétriquement autour d'un axe (par exemple, l'axe X), alors :

$$\cos 2\theta_1 = \cos 2\theta_2 \dots\dots\dots(47)$$

→ le terme en $\varepsilon_x - \varepsilon_y$ disparaît, et la formule se simplifie :

$$\gamma_{xy} = \frac{2(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sin 2\theta_1 - \sin 2\theta_2} \dots\dots\dots(48)$$

Si les angles sont opposés $\theta_1 = \alpha, \theta_2 = -\alpha$, alors :

$$\gamma_{xy} = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{\sin 2\alpha} \dots\dots\dots(49)$$

- Si les deux jauges sont espacées de 90° , alors $2\alpha = 90^\circ \Rightarrow \sin 2\alpha = 1$

Donc :

$$\gamma_{xy} = \varepsilon_1 - \varepsilon_2 \dots\dots\dots(50)$$

$$\tau = G \cdot \gamma_{xy} \dots\dots\dots(51)$$

Et

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \dots\dots\dots(52)$$

Donc :

$$\tau = \frac{E}{2(1+\nu)} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \dots\dots\dots(53)$$

- Cela permet une lecture directe du cisaillement à partir de la différence des deux jauges.
- Ce montage est connu comme un rosette en cisaillement à 90° (shear rosette).

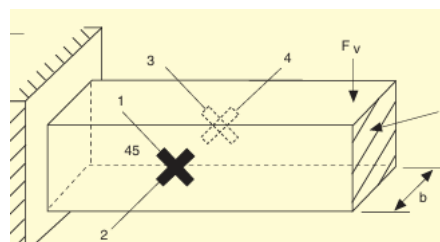


Figure 13: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en cisaillement

1.3.6.3 Mesure contrainte de flexion :

La contrainte de flexion est mesurée lorsqu'un matériau est soumis à un moment fléchissant, ce qui provoque une déformation en traction sur une face et en compression sur l'autre. Pour la mesurer, on positionne des jauges de contrainte sur les faces opposées de la pièce, généralement à proximité des extrémités où les moments sont les plus élevés. Les jauges détectent la déformation linéaire, qui est proportionnelle à la contrainte via le module d'élasticité E . [5] [9] [7]

On a :

$$Mf = \frac{\sigma \cdot I}{y} \dots\dots\dots(54)$$

$$Mf = \frac{E.Vs.I}{y.Ve.GF} \text{ et } \delta(x) = \iint \frac{Vs(x)}{I.Ve.GF} dx dx + \text{const}_1 x + \text{const}_2 \dots \dots \dots (55)$$

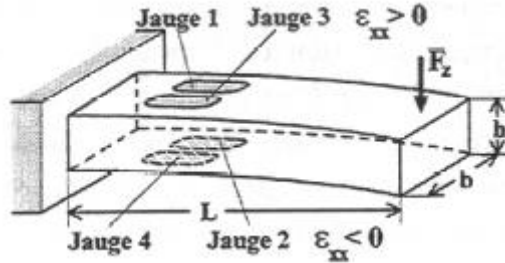


Figure 14: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en flexion

1.3.6.4 Mesure contrainte de torsion :

La contrainte de torsion apparaît lorsqu'un couple est appliqué à une pièce, entraînant une rotation autour de son axe. Pour la mesurer, des jauges de contrainte sont placées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe longitudinal, car c'est dans cette orientation que le cisaillement dû à la torsion est maximal. En détectant ces déformations angulaires, on peut calculer la contrainte de torsion τ , puis le couple exercé Mt . (5) [9]

On a:

$$\tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho}\right)} = \frac{E}{2(1+\nu)} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \dots \dots \dots (56)$$

$$\Rightarrow Mt = \frac{I_0 \cdot E}{2\rho(1+\nu)} (\epsilon_1 - \epsilon_2) \dots \dots \dots (57)$$

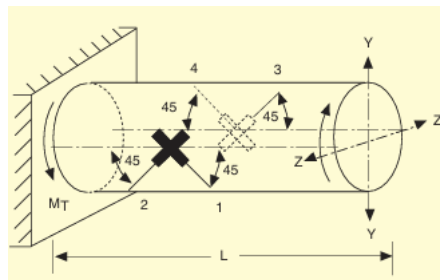


Figure 15: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en torsion

1.4 Applications industrielles :

Principaux domaines d'application des jauges de contrainte

Applications industrielles des jauges de contrainte

Utilisées pour la mesure de force, de couple, de pression et de déformation dans les machines, les lignes de production et les systèmes automatisés. [6] [11]

1. Applications aérospatiales des jauges de contrainte

Employées pour surveiller les contraintes sur les ailes, fuselages, trains d'atterrissage, et moteurs d'avion ou de fusée. [6] [11]

2. Applications automobiles des jauges de contrainte

Utilisées pour analyser la résistance des châssis, les suspensions, les composants moteurs et les systèmes de freinage. [6] [11]

3. Applications ferroviaires des jauges de contrainte

Permettent de surveiller les contraintes dans les rails, les essieux, les bogies et les structures des wagons pour assurer la sécurité. [6] [11]

4. Applications maritimes des jauges de contrainte

Utilisées dans la surveillance des coques de navires, des systèmes de propulsion et des structures soumises à des charges dynamiques en mer. [6] [11]

5. Applications en génie civil des jauges de contrainte

Servent à surveiller les déformations dans les ponts, bâtiments, barrages, tunnels et autres infrastructures. [6] [11]

6. Applications médicales et en santé des jauges de contrainte

Employées dans les dispositifs biomédicaux comme les prothèses, les orthèses, et pour la mesure de la pression corporelle ou musculaire.

7. Applications domestiques des jauges de contrainte [6] [11]

Intégrées dans des appareils électroménagers (balances de cuisine, machines à laver intelligentes, etc.) pour détecter la charge ou le poids. [6] [11]

1.5 Conclusion :

Les jauges de contrainte à résistance électrique, ou jauges extensométriques, permettent de mesurer les déformations mécaniques en exploitant la variation de leur résistance sous contrainte. Après avoir présenté les bases théoriques reliant déformation et résistance, le chapitre suivant traitera des aspects pratiques : sélection des jauges selon les applications, choix des matériaux, circuits de conditionnement du signal, ainsi que modélisation et simulation du système, afin d'assurer une intégration efficace dans les domaines industriels et scientifiques.

Chapitre 2 : Description des dispositifs de mesure

2.1 Introduction :

Ce deuxième chapitre parle de la partie pratique du projet. Avant, le chapitre 1 expliquait les idées théoriques des jauges de contrainte et des sollicitations mécaniques. Il explique les choix technologiques et matériels faits pour créer la clé dynamométrique électronique et la carte électronique du banc didactique. Chaque composant est analysé en fonction de ses caractéristiques, de son rôle dans l'acquisition ou le traitement du signal, et de son intégration dans l'architecture globale du système. On s'intéresse surtout à la façon dont le module HX711, les jauges de contrainte, l'Arduino Nano, l'afficheur OLED, le capteur de force et l'afficheur LCD I2C fonctionnent. Une modélisation montre comment les différents éléments du dispositif interagissent.

2.2 Principe de mesure du couple de serrage :

2.2.1 Définition de la clé dynamométrique :

La clé dynamométrique sert à serrer les vis, boulons et écrous avec la bonne force. Elle est très importante pour que les assemblages mécaniques soient fiables et sûrs. Elle garantit une bonne force de serrage, ce qui évite les serrages insuffisants (qui peuvent provoquer des desserrages) et les serrages excessifs (qui peuvent endommager les composants). Cet outil est donc indispensable dans de nombreux domaines industriels où il est crucial que le serrage soit précis et répétable pour assurer les performances mécaniques sur le long terme. [12]



Figure 16: Clé dynamométrique

2.2.2 Fonctionnement de clé dynamométrique :

La clé dynamométrique est un outil important pour serrer les vis, écrous et boulons avec la bonne force. Certains mécaniciens expérimentés serrent au feeling, mais cette méthode est approximative. Elle peut convenir pour des opérations peu sensibles, mais elle présente des risques à long terme : usure prématurée, détérioration des pièces mécaniques, des vis ou des écrous. [13]

Avec une clé dynamométrique, vous pouvez serrer chaque composant comme il faut. Comme ça, vous évitez de l'abîmer. Elle assure un serrage parfait, ni trop serré, ni trop lâche. [13]

Dépend de la force sur le manche et de la longueur de la clé. [13]

La poignée a un indicateur mécanique connecté à une échelle graduée. Quand le couple cible est atteint, il faut arrêter de serrer le boulon. [14]

Pour aider le couple appliqué, ces outils ont souvent une échelle ou un écran.

On peut les calibrer pour indiquer le couple en lb·ft (livre-pied), lb·in (livre-pouce) ou N.m (newton-mètre). [13] [15]

2.2.3 Matériel utilisé :

Le matériel utilisé en notre projet de clé dynamométrique :

- Arduino nano.
- Amplificateur HX711.
- Clé à cliquet.
- Capteur force 20 Kg.
- Afficheur bleu OLED 128×64 .
- Batterie lithium.
- Module charge Tp4056.
- Convertisseur booste mt3608.
- Buzzer.
- LED.
- Les boutons poussoirs.

2.2.3 Chain de mesure :

Cet organigramme représente la chaîne de mesure de la clé dynamométrique :

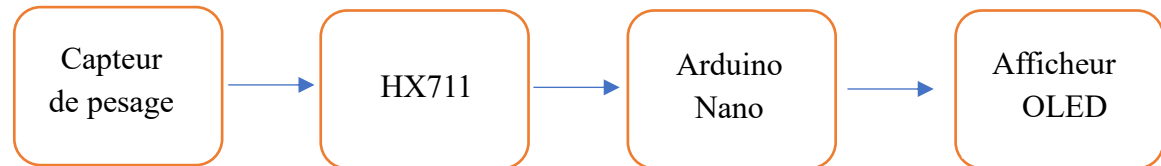


Figure 17: Organigramme de chaîne de mesure de clé dynamométrique

Cette chaîne de mesure est faite pour une clé dynamométrique électronique. Elle permet de mesurer et d'afficher le couple de serrage avec précision. Le système commence par un capteur de pesage ou de force. Il convertit l'effort mécanique en signal électrique. Le signal est traité par le module HX711, qui amplifie et numérise les signaux des jauges de contrainte. Cela permet une mesure précise et stable. L'Arduino Nano, le cerveau du système, reçoit les données numériques du HX711, les interprète (en les convertissant par exemple en newton-mètre ou en d'autres unités de couple) et les envoie vers un afficheur OLED pour une visualisation claire et instantanée. L'écran OLED a une haute résolution et peut être lu même dans l'obscurité, tout en consommant peu d'énergie.

Fonctionnement détaillé :

- Le capteur de pesage/force transforme la force en signal. Il est souvent équipé d'une jauge de contrainte.
- L'HX711 transforme le signal analogique en données numériques que l'Arduino peut utiliser.
- Arduino Nano :
Faire les calculs nécessaires pour mesurer le couple et gérer l'affichage
- Écran OLED : affiche le couple en direct, avec des unités, des alertes si le seuil est dépassé.

2.3 Banc didactique de jauges de contrainte :

2.3.1 Définition de La carte d'acquisition du banc didactique des jauges de contraintes :

Le module de mesure du banc didactique des jauges de contraintes utilise un pont de Wheatstone pour connecter des jauges de contraintes standards. Cet appareil électronique convertit les signaux en valeurs utilisables. Il affiche directement les déformations et les tensions sur un écran numérique. [5]

Il a trois boutons de réglage pour s'adapter facilement à chaque utilisateur.

- Le premier bouton permet de sélectionner le facteur de jauge (compris entre 1,9 et 2,3), selon les caractéristiques du capteur utilisé.
- Le deuxième bouton permet de choisir le type de pont de Wheatstone : quart, demi ou pont complet, selon l'architecture de mesure choisie.
- Le troisième bouton sert à équilibrer le pont. Cela permet de garantir une lecture précise et fiable des variations de contrainte.



Figure 18: Carte d'acquisition de banc didactique

2.3.2 Le banc didactique des jauges de déformation :

Le banc d'étude des jauges de déformation est un outil pédagogique qui montre comment fonctionnent les jauges de déformation à résistance électrique. Il permet de comprendre comment mesurer les déformations mécaniques, de comparer différents

types de sollicitations (traction, torsion, flexion) et d'étudier le comportement mécanique de diverses structures instrumentées avec des jauges. [5]

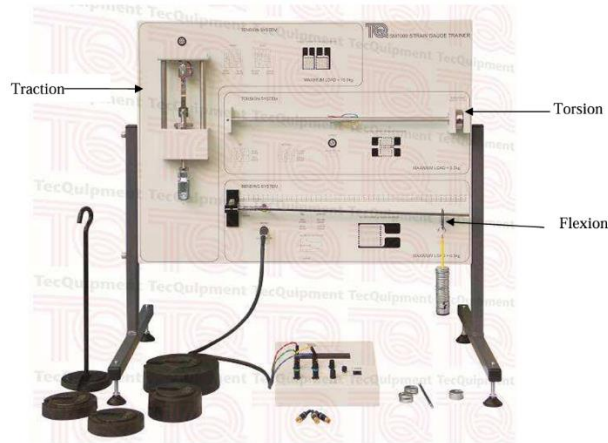


Figure 19:Banc didactique

2.3.3 Les objectifs pédagogiques :

Ce banc permet de faire des travaux pratiques de mécanique et d'instrumentation. Il permet notamment : [5]

- Une introduction à l'extensomètre et aux configurations de pont de Wheatstone : le quart, le demi-pont et le pont complet.
- L'étude des déformations et des contraintes en flexion sur une éprouvette instrumentée.
- On analyse les efforts de torsion et leur effet sur une éprouvette adaptée.
- L'étude des contraintes en traction sert à déterminer le module de Young et le coefficient de Poisson.
- On compare des façons de mesurer la déformation et la force appliquée. [5]

2.3.4 Les caractéristiques techniques :

Le banc est fait de ces éléments : [5]

- Châssis solide avec pieds. S'adapte à trois types d'essais : flexion, torsion et traction.
- L'éprouvette de flexion est en acier. Elle mesure 5 x 20 mm. Elle a quatre jauges de déformation.

- L'éprouvette de torsion est en acier. Elle a un diamètre de 10 mm. Elle est équipée de deux jeux de jauges. Ces jauges sont positionnées à 45°.
 - L'éprouvette de traction est en acier. Elle a une section de 2 x 10 mm. Elle a aussi deux rosettes de jauges à 90°. Cela permet une analyse bi-axiale.
 - Pont d'extensométrie : s'adapte aux configurations en quart, demi et pont complet, avec réglage du facteur de jauge.
 - Affichage en microvolts (μV) et en microdéformations sur un écran numérique.
- [5]

Système de charges :

- Le poids peut varier de 10 g à 500 g, par pas de 10 g, pour les tests de flexion et de torsion.
- Poids : de 0,5 à 10 kg pour les tests de traction.
- Les jauges sont protégées pour que les étudiants puissent les manipuler en toute sécurité.
- Il fonctionne sur le courant européen (220 V-50 Hz).

2.3.5 Matériel utilisé :

Le matériel utilisé en notre projet de clé dynamométrique.

- Arduino nano.
- Amplificateur HX711.
- Les jauges de contraintes.
- Les boutons poussoirs.
- Afficheur LCD I2C.
- Les résistances variables multi tours 1k Ω .

2.3.6 Chaîne de mesure :

Cet organigramme représente la chaîne de mesure du banc didactique :

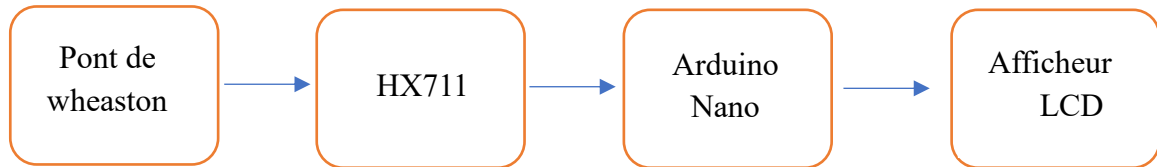


Figure 20: Organigramme de chaîne de mesure du banc didactique

Ce système mesure la déformation d'un matériau avec une chaîne électronique précise. Pour commencer, on utilise un pont de Wheatstone avec une ou plusieurs jauges de contrainte collées sur le matériau. Quand le matériau change de forme sous l'effet d'une charge mécanique, les jauges modifient leur résistance, ce qui dérègle l'équilibre du pont et crée un signal électrique faible proportionnel à la déformation. Le module HX711 amplifie et numérise le signal. C'est un convertisseur analogique-numérique (ADC) haute précision pour les applications de mesure de contrainte. L'Arduino Nano récupère les données numériques, les traite (en les convertissant par exemple en microdéformations ou en MPa selon la résistance du matériau) et les transmet à un afficheur LCD pour une visualisation en temps réel. Ce montage est parfait pour génie mécanique, le contrôle de structures ou la recherche sur les matériaux. Il permet de bien analyser les déformations et les contraintes mécaniques.

2.3.7 Description de l'éprouvette :

Chaque nouveau composant, nouveau processus, ou nouvelle technologie introduit une incertitude dans la prédiction de la réponse structurale à des environnements de charge dynamique est nécessite donc une analyse approfondie et des tests. Dans le processus de développement d'un élément structural ou un composant comme les inserts, l'étude, l'analyse, et les tests de la structure sont des moyens permettant de gagner la confiance dans la conception pour soutenir finalement la qualification du satellite pour le lancement. Pour répondre à ce problème, les processus de conception impliquent l'analyse par éléments finis de plusieurs cas des charges pour évaluer le dimensionnement afin de gagner la confiance dans la conception qui conduit à la fabrication des composants et l'intégration du satellite après les tests.

Cette partie permettra de vérifier l'état de contrainte et les déformations dans les panneaux sandwichs avec la présence de l'insert de contour métalliques pour les

applications aérospatiales proposés par l'équipe de CDS-ASAL. Ces analyses basées sur la réponse structurale aux conditions du chargement en matière de qualification, la résistance mécanique et la sécurité. L'objectif est de mesurer les contraintes dans les structures des panneaux sandwichs en statique tel que test d'arrachement, test de cisaillement longitudinal et de cisaillement latéral. A partir des résultats obtenus, il sera possible d'évaluer la conception et le dimensionnement.



Figure 21: Panneau sandwich

2.3.7.4 Paramètres géométriques du panneau sandwich :

Pour la conception préliminaire le panneau que nous allons utiliser pour cette étude est un panneau sandwich en nid d'abeille (honeycomb) avec des peaux en aluminium et un cœur non perforé en aluminium normalisé (3/8-5056-0.002) utilisé dans les structures des satellites. Ces cœurs ont des densités de 48 kg/m^3 et une taille de cellule de 9.525 mm. Les dimensions de la plaque sont de 120 x 70 mm. La hauteur du cœur est de 20 mm, et l'épaisseur de la paroi de la cellule est de 0.0508 mm, l'épaisseur des peaux supérieure et inférieure est de 0.5 mm en alliage d'aluminium (6061 T6).

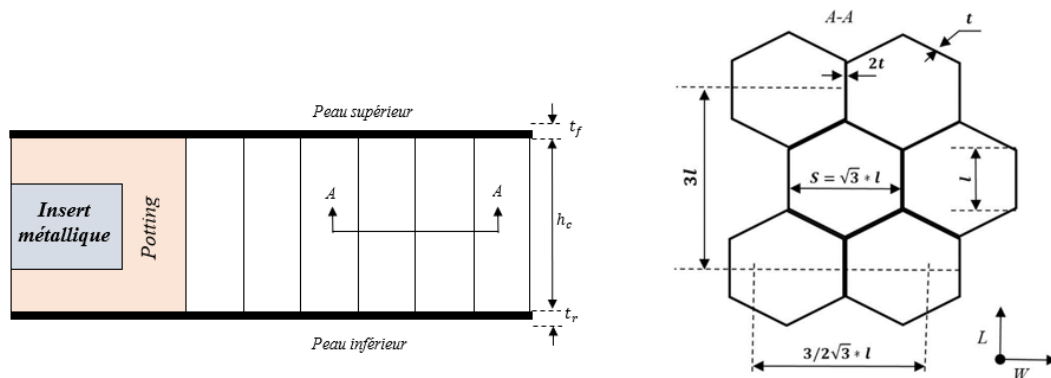


Figure 22:(a) Panneau sandwich en nid-d'abeilles avec insert collé à la frontière. (b) Géométrie de la cellule en nid-d'abeilles.

Table1 :Les dimensions du panneau en nid-d'abeilles

	t	t_f	l	h_c
(mm)	0.002	0.5	6.35	20

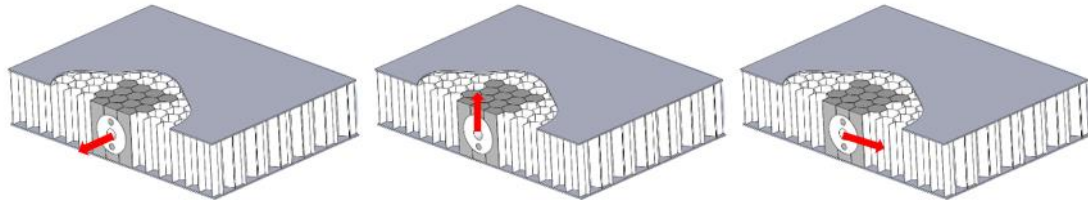


Figure 23:Les forces appliquées aux panneaux pour les essais

2.4 Description de matériel utilisé :

2.4.1 Module hx711 :

2.4.1.1 Définition du module HX711 :

Le module HX711 est un amplificateur numérique spécialement conçu pour la mesure de poids. Couramment utilisé dans les projets électroniques, il est généralement associé à une cellule de charge afin de mesurer le poids d'un objet ou d'un système avec précision. [16]

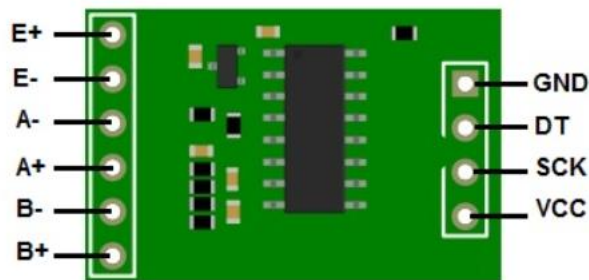


Figure 24: Module hx711

2.4.1.2 Fonctionnement de hx711 :

Le HX711 est un appareil qui convertit les informations analogiques en numériques. Il est utilisé dans les industries pour peser et contrôler les poids. Il permet une connexion directe avec des capteurs à pont de jauges de contrainte. [17]

Ce composant a deux entrées.

Canal A a un amplificateur à faible bruit (PGA) que l'on peut programmer. On peut le configurer avec un gain de 128 ou 64. Cela correspond à une tension d'entrée [17]

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

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

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

L'entrée d'horloge du HX711 est flexible : elle peut provenir d'une source externe (comme un cristal) ou d'un oscillateur interne. Cela élimine le besoin de composants supplémentaires. [17]

Le circuit se réinitialise automatiquement, ce qui simplifie l'initialisation de l'interface numérique sans programmation de registres internes. [17]

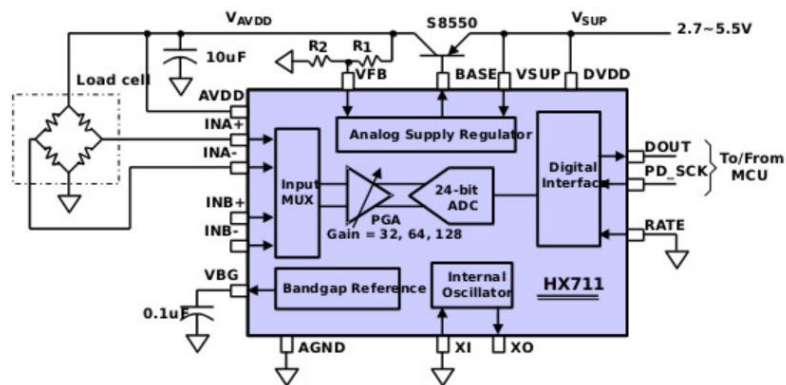


Figure 25: Schéma fonctionnelle de hx711

- **Entrées analogiques :** Le canal différentiel A sert à relier directement la sortie différentielle d'un capteur à pont (comme une jauge de contrainte). Il peut être configuré avec un gain de 128 ou 64, ce qui permet d'amplifier les signaux de faible amplitude typiques de ce type de capteurs. [17]

Avec une alimentation de 5 V (AVDD), ces gains correspondent à une tension d'entrée différentielle de ± 20 mV ou ± 40 mV.

Le canal différentiel B a un gain fixe de 32 et accepte une tension d'entrée différentielle à pleine échelle de ± 80 mV avec une alimentation de 5 V.

- **Options alimentation :** L'alimentation numérique (DVDD) doit être la même que celle utilisée pour le microcontrôleur (MCU). [17]

Si on utilise le régulateur d'alimentation analogique interne, la tension de sortie dépend du transistor externe connecté. Elle est calculée comme suit :

$$VAVDD = VBG \times (R1 + R2) / R1 \dots\dots\dots (58)$$

Cette tension doit être conçue pour rester en dessous de la tension d'alimentation **Ve**.
 Si le régulateur interne n'est pas utilisé, la broche VSUP doit être connectée à AVDD ou à DVDD selon la tension la plus élevée. Dans ce cas :
 Connecte VFB à la masse (GND).

- **Choix de l'horloge :** Connecte la broche XI à la masse pour activer l'oscillateur interne. Il permet de prendre 10 échantillons par seconde (RATE=0) ou 80 échantillons par seconde (RATE=1). [17]

Pour des besoins de fréquence plus précis, on peut utiliser :

Un cristal entre les broches 11 et 10.

On peut aussi utiliser une horloge externe connectée à XI avec un condensateur de 20 pF. [17]

Cette horloge peut provenir directement de la sortie d'un cristal sur le microcontrôleur, avec une amplitude aussi faible que 150 mV.

Ce n'est pas un signal carré.

L'oscillateur interne est désactivé quand on utilise un cristal ou une horloge externe. [17]

- **Taux de Données en Sortie et Format :** L'oscillateur interne du HX711 donne généralement 10 échantillons par seconde (SPS) si le bit RATE est à 0, ou 80 SPS si RATE est à 1.

Mais si on utilise une horloge ou un cristal externe, le taux de données est proportionnel à la fréquence de cette horloge. Par exemple, une fréquence de 11,0592 MHz permet d'obtenir un taux de sortie précis de 10 SPS (RATE = 0) ou 80 SPS (RATE = 1).

Les données sont encodées sur 24 bits en complément à deux. Si le signal différentiel d'entrée dépasse la plage de 24 bits, la valeur en sortie est saturée. Elle peut prendre la valeur minimale de 800 000 h ou la valeur maximale de 7FFFFFF h, selon la polarité du dépassement. Elle reste dans cet état tant que le signal n'est pas dans les limites acceptables. [17]

- **Interface Série :** Le HX711 utilise une interface série avec deux broches principales : Les variables sont PD_SCK et DOUT. Elles servent à récupérer des données, à sélectionner l'entrée, à configurer le gain et à contrôler la mise en veille. Quand les données ne sont pas prêtes, la broche DOUT doit rester haute et la broche PD_SCK basse. Quand DOUT passe à bas, les données sont disponibles. [17]

Pour lire ces données, il faut envoyer entre 25 et 27 impulsions positives sur la broche PD_SCK. À chaque impulsion, un bit est transmis sur la broche DOUT, en commençant par le bit de poids fort (MSB). Après la 25e impulsion, DOUT revient à la position haute. Le nombre d'impulsions détermine aussi le gain et l'entrée choisis, comme indiqué dans le tableau de configuration. Pour éviter les erreurs, il faut respecter un nombre de pulses entre 25 et 27 pendant la conversion.

Impulsions PD_SCK	Entrée canal	Gain
25	A	128
26	B	32
27	A	64

Table 2: Tableau d'impulsions PD_SCK [19]

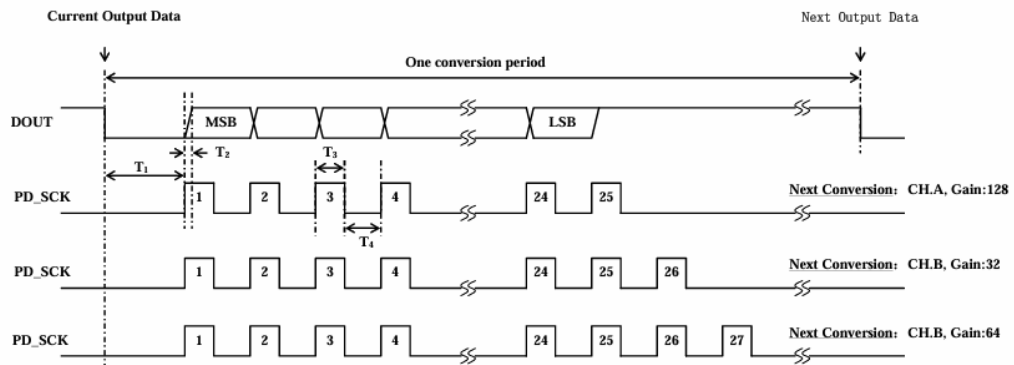


Figure 26: Conversion data

Symbol	Note	MIN	TYP	MAX	Unit
T_1	Front descendant de DOUT au front montant de PD_SCK	0.1			μs
T_2	Front montant de PD_SCK à DOUT prêt à recevoir des données			0.1	μs
T_3	Temps fort PD_SCK	0.2	1	50	μs

T_4	Temps bas de PD_SCK	0.2	1		μs
-------	---------------------	-----	---	--	---------

Table 3: Tableau description de graph de conversion data [19]

- **Réinitialisation et mise hors tension :** Quand on branche le circuit, un circuit interne se réinitialise automatiquement pour remettre la puce à zéro. La broche PD_SCK contrôle l'alimentation du HX711. Quand la broche est baissée, le circuit fonctionne normalement. Mais si la broche PD_SCK passe de bas à haut et y reste plus de 60 microsecondes, le HX711 passe alors en mode veille si on utilise le régulateur interne pour le HX711 et pour le capteur externe (comme une jauge de contrainte), cela met les deux composants en veille et coupe l'alimentation. Quand la broche PD_SCK passe à bas, la puce se réinitialise et reprend son fonctionnement normal. Quand on réinitialise le système ou qu'on le met en veille, les réglages par défaut sont remis. Le canal a est sélectionné avec un gain de 128.

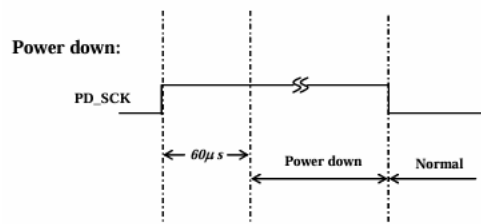


Figure 27: Signal de Réinitialisation et mise hors tension

• Broche Description

Regulator Power	VSUP	1	16	DVDD	Digital Power
Regulator Control Output	BASE	2	15	RATE	Output Data Rate Control Input
Analog Power	AVDD	3	14	XI	Crystal I/O and External Clock Input
Regulator Control Input	VFB	4	13	XO	Crystal I/O
Analog Ground	AGND	5	12	DOUT	Serial Data Output
Reference Bypass	VBG	6	11	PD_SCK	Power Down and Serial Clock Input
Ch. A Negative Input	INNA	7	10	INPB	Ch. B Positive Input
Ch. A Positive Input	INPA	8	9	INNB	Ch. B Negative Input

Figure 50 : Broche description

Broche	Nom	Fonction	Description
--------	-----	----------	-------------

1	VSUP	Alimentation	Alimentation du régulateur : 2.7 ~ 5.5V
2	BASE	Sortie analogique	Sortie de contrôle du régulateur (NC lorsqu'elle n'est pas utilisée)
3	AVDD	Alimentation	Alimentation analogique : 2.6 ~ 5.5V
4	VFB	Entrée analogique	Entrée de contrôle du régulateur (connecter à AGND lorsqu'elle n'est pas utilisée)
5	AGND	GND	GND analogique
6	VBG	Sortie analogique	Sortie de dérivation de référence
7	INA-	Entrée analogique	Entrée négative du canal A
8	INA+	Entrée analogique	Entrée positive du canal A
9	INB-	Entrée analogique	Entrée négative du canal B
10	INB+	Entrée analogique	Entrée positive du canal B
11	PD_SCK	Entrée numérique	Commande de mise hors tension (hautement active) et entrée d'horloge série
12	DOUT	Sortie numérique	Sortie de données en série
13	XO	E/S numériques	Crystal I/O (NC lorsque non utilisé)
14	XI	Entrée numérique	Crystal I/O ou entrée d'horloge externe, 0 : utilisation de l'oscillateur intégré
15	RATE	Entrée numérique	Contrôle du débit de données de sortie, 0 : 10Hz ; 1 : 80Hz
16	DVDD	Alimentation	Alimentation numérique : 2.6 ~ 5.5V

Table 4: Description de branches [18]

2.4.2 Capteur de pesage :

2.4.2.1 Définition capteur de pesage :

Le capteur de pesage est un dispositif qui convertit la force en signal électrique. Dans le cadre de l'étude des capteurs de pesage, il est important de noter qu'une zone ou un groupe de zones au sein de la structure sont conçus pour résister à des contraintes lorsqu'une charge ou une force est appliquée, généralement de manière linéaire.

. Des jauges de contrainte, fabriquées à partir de feuilles métalliques, sont collées sur ces zones pour détecter la déformation de la structure. Des capteurs de pesage mesurent la charge ou la pression appliquées. Ils fournissent un signal électrique proportionnel à la déformation. Ce signal est transmis lorsqu'ils sont excités par une source de tension ou de courant réglée. Ce signal est très faible, environ quelques millivolts, et doit être amplifié pour être lu. [19]

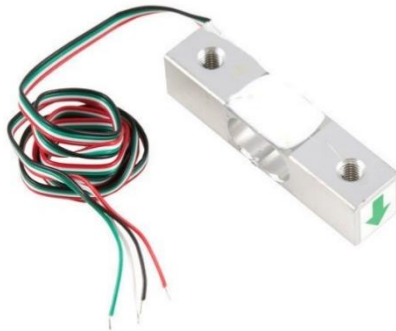


Figure 28: Capteur de poids

2.4.2.2 Le fonctionnement de capteur pesage à jauge de contrainte :

Pour comprendre le fonctionnement du capteur de pesage, il faut connaître la physique et la science des matériaux. La jauge de contrainte à feuille métallique est un capteur. Sa résistance électrique change quand on le plie. [20]

En bref, la force (pression, tension, compression, couple, poids, etc.) se transforme en une variation de résistance électrique, que l'on peut mesurer. [20]

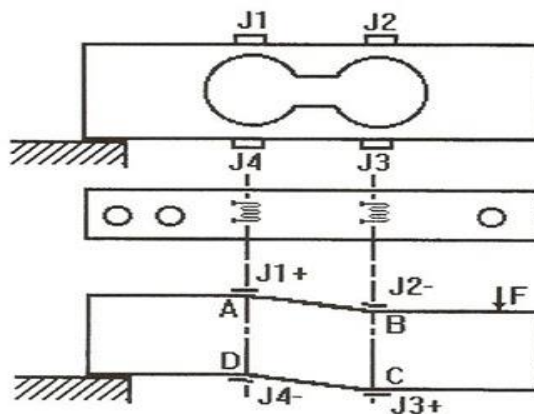


Figure 29: Fonctionnement du jauge de contrainte en capteur pesage

Un capteur de pesage, c'est un morceau de métal sur lequel on a collé des trucs qui mesurent la force. Le capteur est en aluminium ou en acier inoxydable. Cela lui donne deux avantages :

- Il est solide et peut supporter de lourdes charges.
- Il s'adapte pour ne pas se déformer et retrouve sa forme initiale quand la force disparaît. Quand on applique une force sur un métal, il se déforme un peu. Mais il revient à sa forme d'origine, sauf s'il est trop chargé. [20]

Quand le corps change de forme, la jauge de contrainte aussi. Et donc, la résistance électrique aussi. Cela crée une variation de tension à travers le circuit. [20]

Plus on applique de force, plus la tension change. On peut calculer cette force grâce à la sortie de tension du circuit du capteur de force. [20]

La sensibilité et la précision de la cellule de force sont définies comme la plus petite quantité de force pouvant être appliquée au corps du capteur pour provoquer une variation linéaire et répétable de la tension de sortie. [20]

Plus le capteur est précis, mieux il fonctionne, car il peut détecter de très petites variations de force. [20]

Dans des usines, la robotique ou l'aérospatiale, il est très important que les capteurs de force soient linéaires. Certains de nos capteurs de force de type galette ne sont pas linéaires ($\pm 0,1$ % de la sortie nominale) et ne sont pas répétables ($\pm 0,05$ % de la pleine échelle). [20] [21]

2.3.2.3 Les avantages des capteurs de pesage à jauge de contrainte :

La technologie de capteurs à feuille métallique est la plus courante. Elle est précise, fiable à long terme, et il y a beaucoup de formes et de géométries de capteurs. Elle est aussi rentable par rapport à d'autres technologies de mesure de force. Les capteurs à jauges de contrainte résistent mieux aux changements de température. [21]

- Cette machine est très précise et conforme à de nombreuses normes, que ce soit pour la robotique chirurgicale ou l'aérospatiale. [21]
- Construction solide en acier inoxydable ou en aluminium.
- Forme et géométrie pour tout type d'application.
- Faire en sorte que ça marche bien et longtemps, même quand c'est dur.
- Certains capteurs de force peuvent durer jusqu'à des milliards de fois. [21]

2.4.2.4 Câblage hx711 avec capteur de pesage :

Le module HX711 est doté de dix broches, chacune ayant une fonction spécifique : [16]

1. **VCC** : Alimente le module. Elle doit être reliée à une source de tension comprise entre 2,6 V et 5,5 V.
2. **GND** : Mise à la terre du module. À connecter à la masse du système.
3. **DT (Data)** : Broche de données servant à la communication avec le microcontrôleur. Bidirectionnelle, elle doit être configurée en entrée lors de la lecture des données et en sortie lors de l'envoi.
4. **SCK (Clock)** : Broche d'horloge utilisée pour synchroniser les échanges avec le microcontrôleur. Elle doit être configurée en sortie côté microcontrôleur.
5. **E- (Excitation -)** : Connexion à l'extrémité négative de la cellule de charge.
6. **E+ (Excitation +)** : Connexion à l'extrémité positive de la cellule de charge.
7. **A- (Analogique -)** : Entrée analogique négative pour la mesure du signal issu de la cellule de charge. [22] [17] [16]
8. **A+ (Analogique +)** : Entrée analogique positive complémentaire à A-, utilisée pour la mesure différentielle. [16]
9. **B- (Excitation - / Voie B)** : Pour connecter une seconde cellule de charge dans une configuration en pont complet. [16]
10. **B+ (Excitation + / Voie B)** : Connexion à l'extrémité positive d'une deuxième cellule de charge. [16]

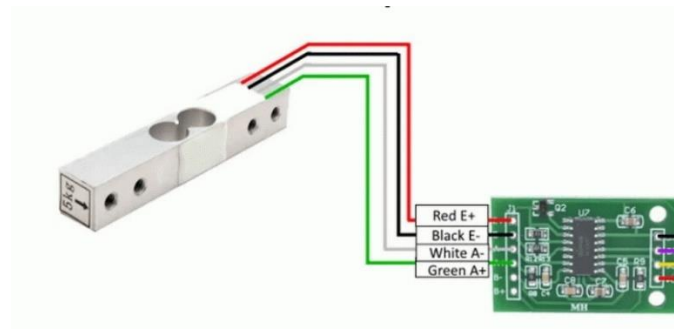


Figure 30: Cablage capteur poids avec hx711 [17]

2.4.3 Arduino nano :

2.4.3.1 Définition d'Arduino nano :

Dans un contexte de développement technologique exponentiel, un nombre croissant de passionnés en électronique et en programmation expriment le désir de concrétiser leur propre projet. Cette approche permet d'éliminer la nécessité de réaliser des circuits électroniques complexes impliquant l'utilisation de fils et de composants à relier entre eux, ce qui simplifie et optimise le processus de conception. La carte Arduino Nano permet désormais de réaliser cette opération. [23] [24]

À l'heure actuelle, la carte Arduino Nano figure parmi les cartes de développement les plus fiables disponibles sur le marché. Cette technologie offre la capacité d'exécuter un programme informatique dans son intégralité. En outre, elle se positionne comme la solution la plus efficace pour la gestion du contrôle électronique. L'Arduino Nano se présente sous la forme d'une petite carte de développement. Elle est basée sur un contrôleur ATmega328 et contient un bootloader. Ce dispositif permet la modification d'un programme sans nécessiter l'intervention d'un programmeur. Par ailleurs, il est à noter que la carte de développement en question propose des fonctionnalités qui s'apparentent à celles de l'Arduino UNO. [23] [24]

2.4.3.2 Caractéristiques de l'Arduino Nano :

L'Arduino Nano est petit et puissant. Ce petit appareil offre tout ce dont vous avez besoin. Nous allons regarder ses principales caractéristiques.

Le Nano a un microcontrôleur puissant : l'ATmega328P. Il est efficace et polyvalent.

Le Nano est petit, donc il est idéal pour les conceptions compactes. Il est puissant, même s'il est petit.

L'interface USB facilite la programmation et la communication. Branchez et utilisez.

Il y a six entrées analogiques. Elles permettent de lire des signaux analogiques. Cela rend le projet plus polyvalent. [23]

Il y a 14 broches numériques, dont 6 pour le PWM. Contrôlez vos appareils et créez des projets complexes. [23]

Nano fonctionne sur 5 V, donc il va avec beaucoup de capteurs et périphériques. [24]

Il existe plusieurs protocoles de communication : UART, SPI et I2C. Ils permettent de connecter facilement différents appareils. [23]

Le Nano s'adapte facilement aux platines d'expérimentation. Facile à utiliser, vous pouvez créer et développer sans difficulté. [23] [24]

- Poids total : 7 g.
- Dimension : 18 x 45 mm.
- Mémoire flash : 16 Ko ou 32 Ko (idéal pour les systèmes embarqués ou les applications multitâches).
- SRAM : 2 Ko.
- EEPROM : 1 Ko.
- Tension d'alimentation : 5v.
- Tension d'entrée : 7 à 12v.
- Consommation électrique : 19 Ma.
- Logiciel de programmation : IDE Arduino ;
- Nombre de broches numériques : 14 avec des fonctions pin Mode, digitalWrite et digitalRead .
- Broches analogiques : 8 broches avec fonction analogRead.
- Nombres de broches de réinitialisation : 2.
- Nombre broches d'alimentation : 6 (Vcc et GND).
- Résistance de pull-up interne des broches : 20-50 kOhms.
- Boîtier : DIL30.

2.3.3.3 Broches et connexions :

L'Arduino Nano est un petit appareil de contrôle très apprécié des créateurs et des amateurs. Mais parfois, c'est compliqué de travailler avec. Les problèmes courants avec les broches et les connexions peuvent vous déstabiliser. [25]

Des broches défectueuses, des connexions desserrées ou un câblage incorrect peuvent causer ces problèmes. La poussière, la saleté ou les dommages physiques peuvent aussi ralentir les broches. Ici, on va parler des problèmes fréquents avec les broches et les connexions de l'Arduino Nano. [25]

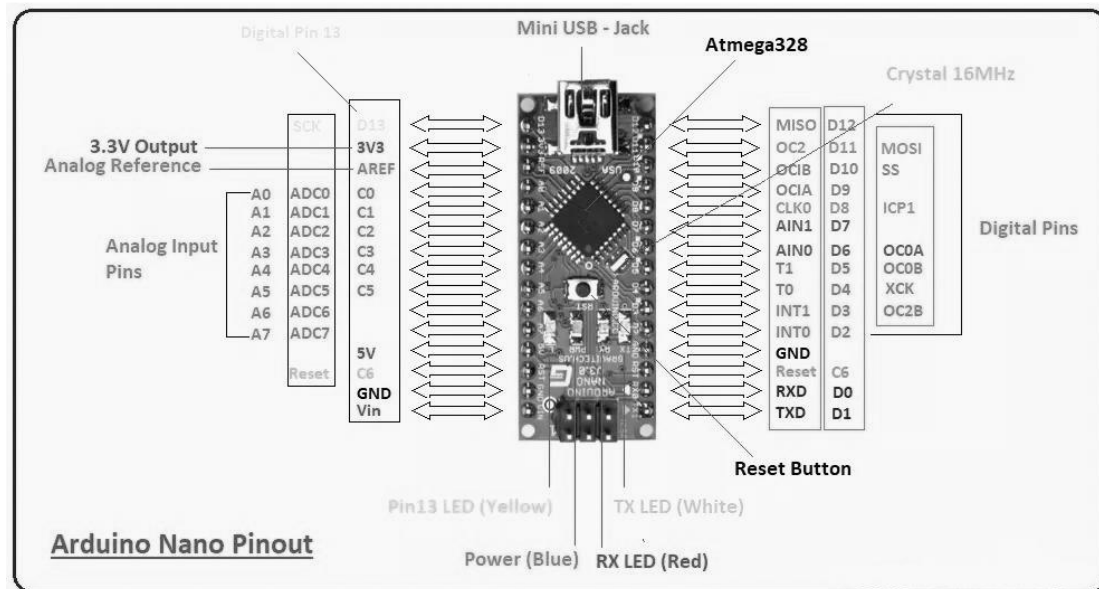


Figure 31: Branches Arduino nano

2.4.4 Afficheur bleu OLED 128 × 64 :

2.4.4.1 Description :

Tout d'abord cet écran est de très petite taille car il mesure que 3 sur 3 centimètres de longueur. [26]

Maintenant cet écran OLED n'a que quatre broches:

la première broche est la masse la seconde est le VCC la troisième broche est nommée SCL et la quatrième est nommée SDA ces deux broches sont les seules y un utilisé pour communiquer avec la plate-forme processeur Arduino ou une autre plate-forme que vous pouvez utiliser ; et ces broches utilisent le protocole I2C.

L'afficheur OLED 0.96 128X64 I2C BLEU est parfaitement net pour sa taille et la technologie OLED apparaît bien en plein soleil. Cet écran est capable d'afficher 8 lignes de texte lisible avec un écart de pixels entre chaque ligne. Cet écran est de 128 × 64 pixels et est contrôlé via I2C. [26]

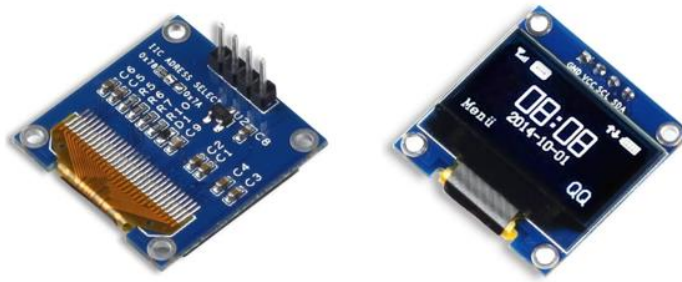


Figure 32: Afficheur OLED

2.4.4.2 Caractéristique :

- Écran OLED de 1,3 pouce avec affichage en noir et blanc ou en noir et bleu.
- L'image est claire et le contraste élevé grâce à la résolution 128x64.
- Aspect : grand angle de vue supérieur à 160° (écran avec grand angle de vue).
- Il fonctionne avec une tension de 3 à 5 V et est compatible avec les niveaux logiques 3,3 V et 5 V. Aucune puce de changement de niveau n'est nécessaire.
- Avec le bus IIC, seuls quelques E/S peuvent être utilisés pour éclairer l'écran.
- L'écran consomme très peu d'énergie : il affiche 0,06 W, alors que l'écran TFT consomme plus.
- Qualité militaire et stabilité. [26]

2.4.4.3 Raccorder un écran OLED à l'Arduino :

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un système de visualisation, il est impératif de s'assurer de la faisabilité de l'interconnexion d'un écran OLED avec le dispositif Arduino. Cette démarche s'effectue par le biais du bus I2C, un protocole de communication qui facilite l'échange de données entre les composants électroniques. [27]

Comme nous l'avons démontré précédemment, la connexion d'un écran OLED à un Arduino via le bus I2C s'avère être une procédure d'une grande simplicité. En effet, il suffit de relier quatre fils pour établir une connexion électrique fonctionnelle. [27]

Dans le cadre de la communication entre systèmes électroniques, les standards SDA (Serial Data Association) et SCL (Serial Communication Language) sont utilisés pour établir une liaison i2c (Inter-Integrated Circuit). [27]

Il est à noter que la broche VCC (Voltage Control Circuit) et la broche GND (Ground) sont liées à l'alimentation électrique. En effet, il est communément admis que la tension d'alimentation s'étend généralement de 3,3 à 5 volts. [27]

Dans le cadre de la mise en œuvre d'un système de visualisation, il est impératif de s'assurer de la faisabilité de l'interconnexion d'un écran OLED avec le dispositif Arduino. Cette démarche s'effectue par le biais du bus I2C, un protocole de communication qui facilite l'échange de données entre les composants électroniques. [27]

Comme nous l'avons démontré précédemment, la connexion d'un écran OLED à un Arduino via le bus I2C s'avère être une procédure d'une grande simplicité. En effet, il suffit de relier quatre fils pour établir une connexion électrique fonctionnelle. [27]

Dans le cadre de la communication entre systèmes électroniques, les standards SDA (Serial Data Association) et SCL (Serial Communication Language) sont utilisés pour établir une liaison i2c (Inter-Integrated Circuit). [27]

Il est à noter que la broche VCC (Voltage Control Circuit) et la broche GND (Ground) sont liées à l'alimentation électrique. En effet, il est communément admis que la tension d'alimentation s'étend généralement de 3,3 à 5 volts. [27]

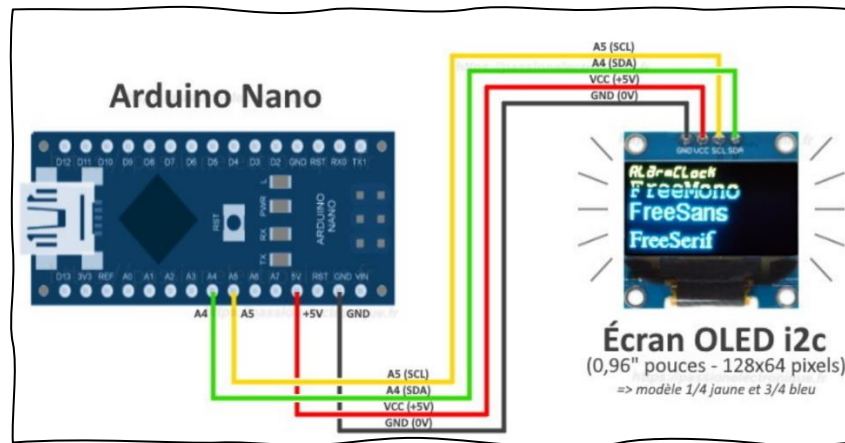


Figure 33: Raccorder un écran OLED à l'Arduino

2.4.5 Clé à cliquet :

2.4.5.1 Définition de clé à cliquet :

Le cliquet est un outil très utile pour la mécanique, la maintenance et la construction. Il permet de serrer ou de desserrer facilement des écrous et des boulons, même dans les petits espaces. C'est un outil très pratique et facile à utiliser, que les professionnels comme les bricoleurs adorent. Le cliquet est très utilisé dans l'automobile et la mécanique. Il en existe plusieurs types pour différents besoins. [28]



Figure 34: Clé à cliquet

2.4.5.2 Fonctionnement de clé à cliquet :

La clé à cliquet est fabriquée en acier fritté pour sa robustesse. Elle se compose de plusieurs éléments essentiels : [28]

Le manche est ergonomique, donc il est confortable.

Une roue dentée a entre 24 et 80 dents, selon le modèle.

Un carré pour fixer les embouts.

C'est un outil qui sert à serrer ou à desserrer.

Cette structure de base peut être complétée par divers accessoires pour plus de possibilités d'utilisation. [28]

Des douilles de différentes tailles (de 8 à 22 mm) pour serrer ou desserrer les écrous.

Un porte-embout, un réducteur ou un augmentateur sert à ajuster le cliquet pour qu'il s'adapte à différents embouts. [28]

Une rallonge pour atteindre les vis dans les zones difficiles.

Le cardan permet de travailler sur des vis ou des écrous placés en angle par rapport à l'axe de la clé. [28]

Pour utiliser le cliquet, fixez l'embout sur la vis ou l'écrou, puis faites un mouvement de va-et-vient. On peut serrer ou desserrer sans repositionner la clé à chaque fois. [28]

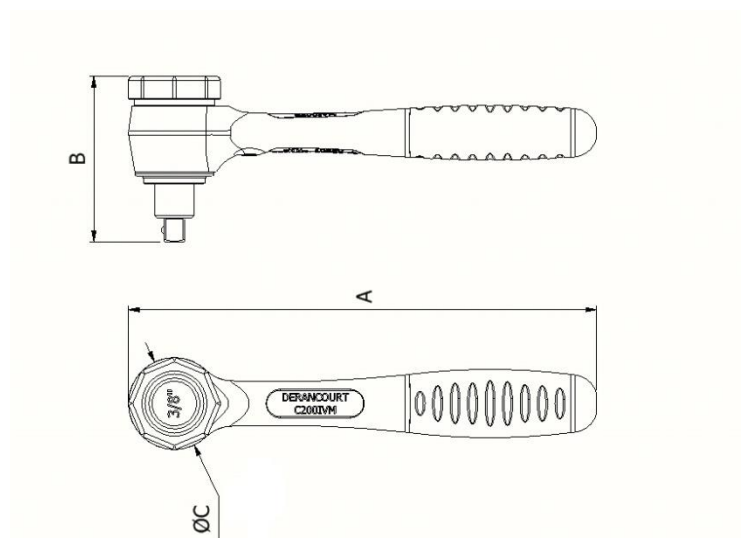


Figure 35: Description de clé dynamométrique

2.4.5.3 Les avantages de clé à cliquet :

La clé à douille est un outil indispensable pour les bricoleurs. Elle a plusieurs avantages

- La clé à cliquet est plus efficace et plus rapide. Elle permet de visser ou dévisser sans avoir à retirer l'outil ni faire le tour complet de l'écrou. Elle est très efficace, même quand on manœuvre en peu d'espace.

- Le carré d'entraînement du cliquet permet de changer facilement de douille pour s'adapter à différentes tailles d'écrous ou de boulons. Cela évite d'avoir à transporter ou à acheter un jeu complet de clés.
- Il est facile à utiliser : on peut changer le sens de rotation d'un seul geste, avec le levier ou la molette sur la tête de l'outil. Il est donc très facile de serrer ou de desserrer sans perdre de temps.

2.4.5.4 Les différents types de clé à cliquet :

Il existe plusieurs types de clés à cliquet.

Le carré d'entraînement d'une clé à cliquet peut être remplacé pour s'adapter à la taille de l'écrou. Il existe plusieurs variantes de cet outil, chacune adaptée à un usage spécifique : [29]

- Le cliquet à carré traversant a un carré fixe. Il tourne toujours dans le même sens. Il est donc très solide. [29]
- Le cliquet marteau fait office de marteau et de cliquet. Il est utile pour certains travaux de chantier ou de mécanique lourde. [29]
- Le cliquet double a un carré d'entraînement à chaque extrémité. Cela permet d'utiliser deux tailles de douilles sans changer d'outil. [29]
- Le cliquet à tête articulée (ou cliquet à boule) a un manche inclinable. Cela permet de se déplacer librement, ce qui est pratique dans les zones difficiles d'accès. [29]
- Le cliquet sans manche est plus petit et s'utilise dans des espaces très petits où on ne peut pas beaucoup bouger. [29]
- Le cliquet à manche télescopique s'adapte à la taille de l'utilisateur. [29]
- La clé à friction est une clé simple et rapide à utiliser. Elle ne possède pas de mécanisme à cliquet classique. [29]

Pour avoir toujours l'outil qu'il faut, il est conseillé d'acheter un coffret à cliquets. Il contient plusieurs douilles de tailles différentes et différents types de cliquets, ce qui le rend très polyvalent. [29]

2.4.6 Jauge de contrainte :

Les jauges de contrainte sont au cœur des capteurs de force. Elles permettent de détecter les allongements exercés à la surface du matériau. Elles sont faites d'un film porteur (en polyamide), d'une grille de mesure en constantan et d'une couche protectrice. Les jauges transforment l'allongement mécanique en changement de résistance électrique. Ils agissent comme des convertisseurs mécano-électriques. La variation de la résistance des jauges de contrainte s'effectue de manière proportionnelle (facteur GF). [5]

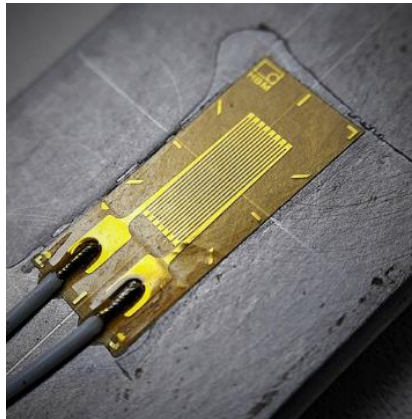


Figure 36 : jauge de contrainte

2.4.6.1 Conditionnement du signal des jauges de contraintes :

Le pont de Wheatstone est le montage le plus couramment utilisé pour la mesure avec des jauges de contraintes. Ce circuit présente une sensibilité élevée et permet de mettre en évidence les différences de résistance induites par les déformations mécaniques.

Dans ce montage:

- Les éléments adjacents dans le pont réagissent avec des signes opposés ;
- Les éléments opposés réagissent avec des signes similaires.

Cette disposition permet d'amplifier la variation différentielle du signal due à la déformation, tout en annulant les perturbations communes (comme la température), surtout dans les montages symétriques. [5]

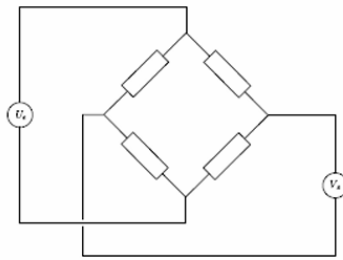


Figure 37: Montage pont wheaston

2.4.6.2 Le différents montages de wheaston

- Montage en quart de pont

Pour utiliser une jauge de contrainte, le plus simple est le montage en quart de pont. Il n'y a qu'une seule jauge active, avec trois résistances fixes dans le pont de Wheatstone. Ce montage est économique et facile à mettre en œuvre, mais il a plusieurs limites : La jauge est loin des autres résistances du pont. Du coup, la résistance des fils de connexion peut fausser la mesure. [5]

Les câbles perdent de la tension : la tension appliquée à la jauge est réduite à cause des pertes dans les câbles. Du coup, la sensibilité de la jauge, qui dépend de la tension d'excitation, est réduite. Cela fait que le signal mesuré est moins précis. [5]

Quand les câbles sont résistants, le signal de sortie est plus faible. Par exemple, un câble de 100 mètres peut faire perdre jusqu'à 10 % de la fiabilité des mesures. [5]

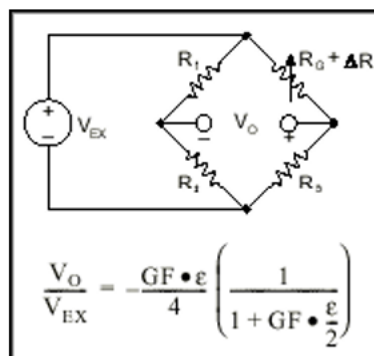


Figure 38:Montage quart de pont

- Montage en demi-pont avec régulation de la température.

Utiliser deux jauges de contrainte dans un montage en demi-pont réduit les effets de la température. Dans cette configuration, une jauge est active (soumise

à la contrainte mécanique appliquée), tandis que la seconde est positionnée perpendiculairement à la direction de la contrainte. [5]

Cette jauge « transversale », ou « factice », est peu influencée par les déformations mécaniques, mais réagit aux changements de température comme la jauge active. [5]

Les changements de température n'affectent pas les deux jauges de la même façon, ce qui garde le même rapport de leurs résistances. La tension différentielle mesurée (V) reste stable face aux changements de température. Cela permet une meilleure précision dans la mesure de la déformation mécanique. [5]

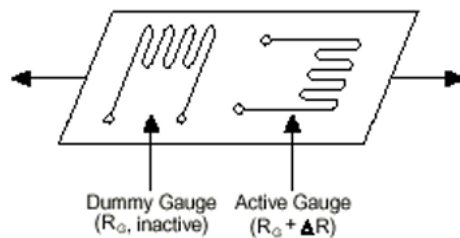


Figure 39: Deux jauges de contrainte

- **Montage en demi-pont.**

Le montage en demi-pont sert à compenser les changements de température lors des mesures sur des matériaux sensibles. Il est aussi très bien adapté aux essais de flexion, où on veut éliminer la composante de traction ou de compression uniforme.

Ce type de montage utilise deux jauges de contrainte placées sur une poutre.

- ✓ L'une est en zone de traction.
- ✓ L'autre est en zone de compression.

Cela permet à la poutre de changer de forme : une partie s'allonge pendant que l'autre se raccourcit. Leurs résistances étant inverses, la tension du pont de Wheatstone est amplifiée.

Le montage en demi-pont donne un signal de sortie presque pareil que le montage en quart de pont, mais il corrige aussi les problèmes de température, car les deux jauges sont soumises aux mêmes conditions de température. [5]

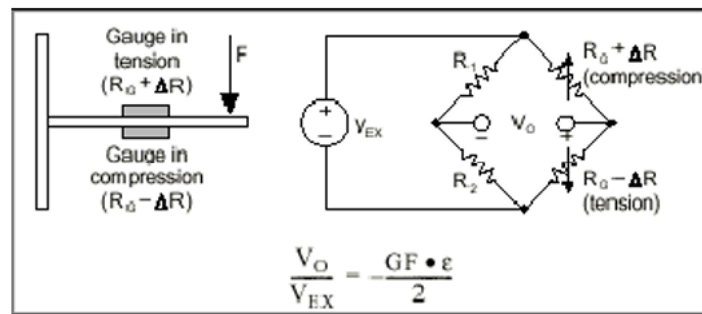


Figure 40:Montage en demi-pont

Montage en pont complet

Le plus courant est le montage en pont complet, surtout quand il faut être très précis. Dans ce montage, on a intégré quatre jauges de contrainte. Elles occupent une branche du pont de Wheatstone chacune. Cette disposition rend le système très sensible et efficace contre la chaleur. Mais le choix de ce type de montage dépend de la forme du capteur et du type d'effort à mesurer. [5]

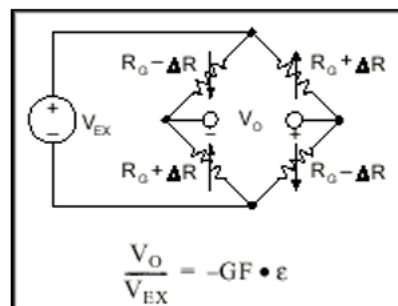


Figure 41:Montage en pont complet

2.4.7 Afficheur LCD I2C :

Mettons tout de suite au clair les termes : LCD signifie « Liquid Crystal Display » et se traduit par « Écran à Cristaux Liquides ». En français, on parle d'« écran à cristaux liquides ». Ces écrans sont partout ! Vous en trouverez dans les montres, les appareils photo, les consoles de jeux, les télévisions, etc. [30]

Vous en trouverez dans beaucoup d'appareils électroniques disposant d'un afficheur, comme les montres, les calculatrices, etc. [30]

Cette utilisation intensive est due à leur grande popularité. Cette utilisation intensive est due à : Leur faible consommation et leur coût en font des écrans très utilisés. [30]

Cette technologie est bien maîtrisée, ce qui permet d'utiliser ce type d'écran dans des formes plus complexes, comme la plupart des écrans d'ordinateur. [30]

Dans les années à venir, ils auront tendance à se démocratiser, ainsi que les téléviseurs à écran plat. Cette technologie est bien maîtrisée. Leur coût de production est assez bas. Dans les années à venir, ils auront tendance à se généraliser. Ils seront bientôt remplacés par les écrans à affichage LED, qui sont pour le moment trop chers. [30]

2.4.7.1 Principe de fonctionnement

Un écran LCD fonctionne grâce à des cristaux liquides. Ces cristaux sont disposés en une grille de pixels, chaque pixel étant formé par un groupe de cristaux liquides. Lorsqu'aucun courant électrique n'est appliqué, les molécules des cristaux liquides sont orientées dans une direction particulière. Toutefois, lorsqu'un courant électrique est appliqué, les molécules se tournent dans une autre direction, ce qui permet de bloquer ou de laisser passer la lumière afin d'afficher des informations. [31]

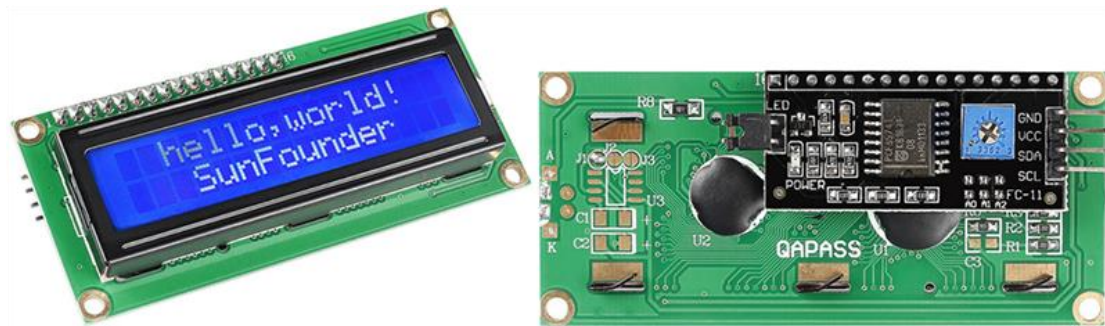


Figure 42 : Afficheur LCD I2C

2.4.7.2 Le branchement :

La plupart des écrans possèdent aussi une entrée Lâ afficheur LCD utilise 6 à 10 broches de données (D0 à D7 ou D4 à D7 + RS + E) et

La plupart des écrans possèdent aussi une entrée. [30]

Les 10 broches de données peuvent être placées sur le bus analogique pour régler le contraste des caractères. Nous y brancherons un :

En effet, nous indiquerons un potentiomètre de 10 kOhms. [30]

Les 10 broches de données peuvent être placées sur n'importe quelles entrées/sorties numériques de l'Arduino, car nous indiquerons :

Nous indiquerons ensuite à la librairie Liquid Crystal où elles sont placées. [30]

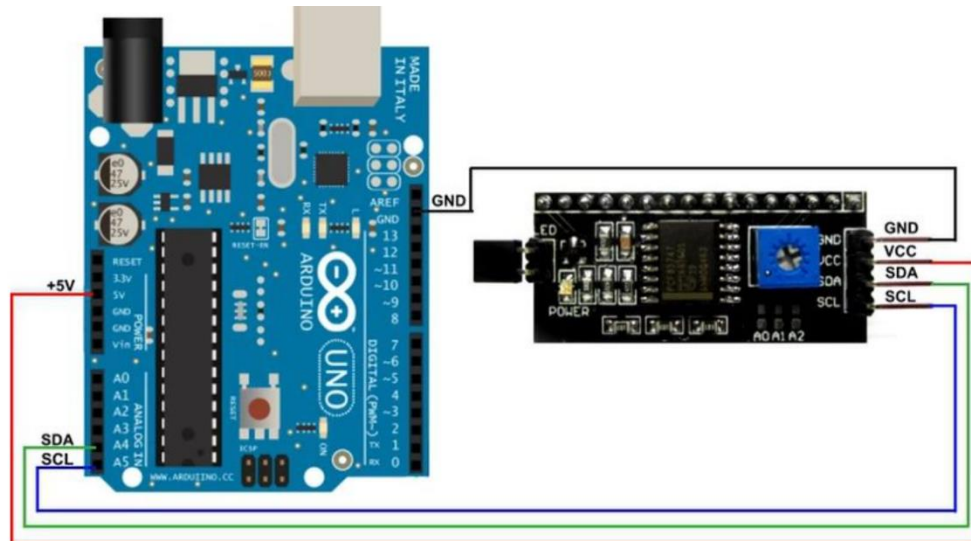


Figure 43 : Le branchement L'affichage_LCD avec Arduino

Afficheur LCD	Arduino
GND	GND
VCC	+5V
SDA	A4
SCL	A5

Table 5:Table de branches

2.4.8 Convertisseur mt 3608 :

2.4.8.1 Description :

Le MT3608 est un module convertisseur DC-DC élévateur (step-up booster) de haute qualité, conçu pour augmenter une tension d'entrée basse (2V-24V) vers une tension de sortie plus élevée (3V-28V). Idéal pour alimenter des circuits nécessitant une tension supérieure à celle disponible (par exemple, alimenter un appareil 12V avec une batterie 3.7V). [32]



Figure 44: Convertisseur mt3608

2.4.9 Module charge tp4056 :

2.4.9.1 Description :

Ce module compact intègre une entrée Micro USB femelle, permettant une recharge pratique via un chargeur de téléphone standard (5V), tout en offrant des bornes de câblage supplémentaires pour une connexion flexible. Il est spécialement conçu pour la gestion sécurisée de batteries lithium (3.6V–3.7V) de type 18650 ou polymère, assurant charge, décharge et protection contre les risques électriques. [33]



Figure 45: Module charge 4056

2.5 Conclusion

Ce chapitre explique pourquoi on a choisi les composants matériels utilisés pour la clé dynamométrique électronique et la carte électronique du banc didactique. Chaque élément a été choisi pour sa fiabilité et sa compatibilité. Le module HX711 amplifie et convertit les signaux des jauges de contrainte. Tous les composants choisis sont solides pour le système de mesure, et s'intègrent bien avec le logiciel et le matériel. Le chapitre

suivant montrera comment faire le montage et la programmation pour que le dispositif fonctionne.

Chapitre 3 : Conception, réalisation et analyse des résultats

3.1 Introduction :

Le chapitre précédent a détaillé la description de matérielle et fonctionnement des deux dispositifs (la clé dynamométrique électronique et la carte électronique du banc didactique). Ce chapitre passe maintenant à la phase de mise en œuvre concrète du projet. Le chapitre 2 expliquait les choix techniques, les composants électroniques utilisés et l'architecture générale des systèmes. Ce chapitre explique comment ils sont fabriqués, calibrés et validés.

La première partie explique comment on conçoit les plaques PCB et comment on modélise la clé dynamométrique en 3D. Cette étape est essentielle pour bien intégrer les pièces mécaniques, pour que l'appareil soit pratique pour un usage industriel et pour qu'il fonctionne bien en conditions réelles. Ensuite, on ajuste et on valide les mesures du capteur en les comparant aux valeurs théoriques attendues selon les lois de la mécanique.

La troisième partie du chapitre parle de la conception de la carte électronique du banc didactique. Cela comprend la réalisation de la plaque PCB et la modélisation 3D de la structure de support. Ce banc permet de reproduire différentes sollicitations mécaniques (traction, flexion, torsion) pour servir en milieu industriel.

L'étape de collage et de soudure des jauges de contrainte sur les pièces mécaniques est très importante. Elle détermine si les mesures seront précises ou non. Le chapitre se termine par des tests globaux. Ils servent à évaluer le fonctionnement des deux dispositifs développés.

Ce travail montre qu'on peut passer de la théorie à la pratique en mélangeant la mécanique, l'électronique et le dessin assisté par ordinateur. Cela répond aux besoins d'aujourd'hui pour l'enseignement et l'industrie en matière de mesure et d'instrumentation.

3.2 Conception et réalisation de clé dynamométrique :

Le fonctionnement de la clé dynamométrique que nous avons réalisée est basé sur deux lois fondamentales en mécanique classique.

1. La loi de Newton :

$$F = m \times g \dots\dots\dots (59)$$

Cette formule calcule la force exercée par une masse.

La force est égale à la masse multipliée par l'accélération de la gravité (9,81 m/s²).

2. La loi de couple :

$$T = F \times d \dots\dots\dots (60)$$

T est le couple (en newton-mètre), F la force appliquée (en newtons) et d la distance entre la force et l'axe de rotation (en mètres).

Dans notre réalisation, nous avons utilisé un capteur de pesage de 20 kg. Cela correspond à une force maximale de :

Le poids maximal est de 20 kg. $9,81 \times 196,2 = 196,2$ N.

Le capteur est à 10,2 cm du centre de rotation de la clé à cliquet. C'est là que la force se transforme en couple. Le couple maximal que peut mesurer notre système est donc :

Le maximum est de 196,2 N.

$$102 \times 0,102 = 20 \text{ N}\cdot\text{m}.$$

Ce principe transforme la force exercée sur la poignée de la clé en un couple mesurable. Pour cela, on utilise un capteur de pesage déformé, équipé de jauges de contrainte. Le signal de déformation est ensuite traité électroniquement avec le module HX711 et l'Arduino Nano. Il s'affiche directement sur un écran OLED. Cela permet de bien mesurer le couple appliqué.

Cette clé dynamométrique électronique est simple et fiable. C'est parfait pour les usines qui ont besoin de contrôler le serrage.

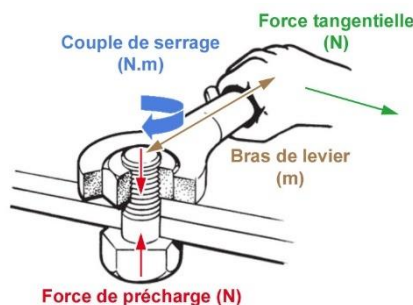


Figure 46: Couple de serrage

3.2.1 Réalisation de partie électronique :

3.2.1.1 Conception plaque PCB :

Pour créer une plaque PCB, nous avons utilisé le logiciel EasyEDA.

Logiciel EasyEDA :

EasyEDA est un logiciel de CAO pour l'électronique. C'est gratuit, ça s'utilise direct dans un navigateur web et ça ne nécessite pas d'installation. C'est parfait pour les amateurs, ingénieurs, enseignants et étudiants. Il rend la conception de circuits imprimés plus simple grâce à son interface intuitive et ses fonctionnalités complètes. EasyEDA permet de créer des schémas électroniques et des PCB. Il inclut aussi des bibliothèques de composants et un simulateur de circuits. C'est une plateforme pour apprendre et faire des projets électroniques. Le cloud facilite la collaboration et l'accès à plusieurs plateformes. [34]



Figure 47 : Logiciel EasyEDA

3.2.1.2 Le schéma électronique de circuit d'acquisition et affichage :

La figure suivante représente le schéma électronique de la carte électronique de circuit d'acquisition et affichage de la clé dynamométrique, le schéma montre comment les composants du système sont connectés entre eux. La carte Arduino Nano y est utilisée comme cerveau du système, avec le module HX711 pour amplifier et numériser le signal du capteur de force. L'afficheur OLED affiche les mesures et les boutons-poussoirs servent à les contrôler. Le schéma montre aussi comment l'électricité et les signaux sont gérés pour le capteur de pesage.

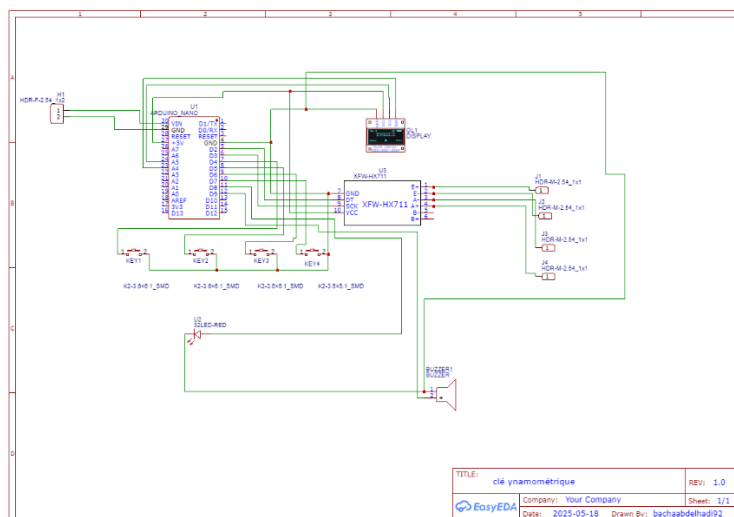


Figure 48 : Schéma électronique de carte d'acquisition et affichage

3.2.1.3 Le plaque PCB de la carte d'acquisition :

La figure ci-dessous montre le design d'une carte PCB réalisée avec le logiciel EasyEDA. C'est une carte avec deux couches. Elle permet de connecter tous les composants électroniques. Les pistes de différentes couleurs montrent où faire la connexion : le rouge est pour la couche supérieure, et le bleu pour la couche inférieure. Une fois le design terminé, la carte est exportée au format PDF, puis imprimée avec une machine CNC.

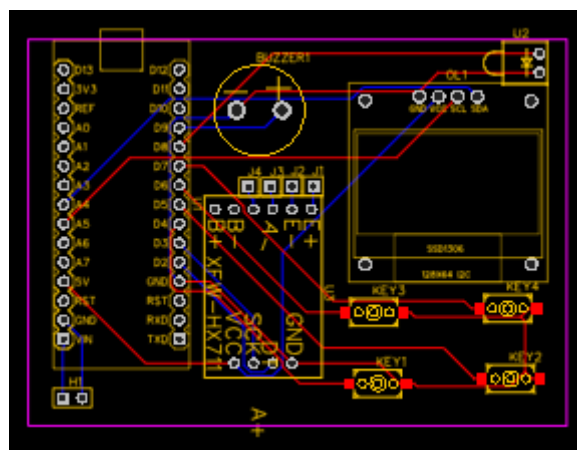


Figure 49 : Design de circuit PCB de circuit d'acquisition et affichage

3.2.1.4 Le vue 3D de circuit d'acquisition et affichage :

La figure suivante représente la vue 3D du circuit électronique de la carte d'acquisition et d'affichage de la clé dynamométrique, La figure offre une vue d'ensemble de la version finale de la carte électronique.

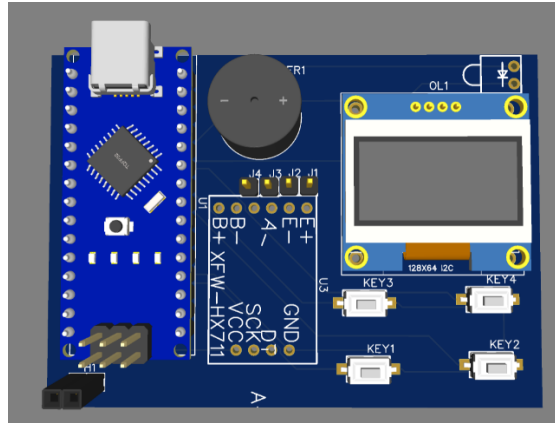


Figure 50 : Vue 3D de circuit d'acquisition et affichage

3.2.1.5 La carte d'acquisition et affichage :

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

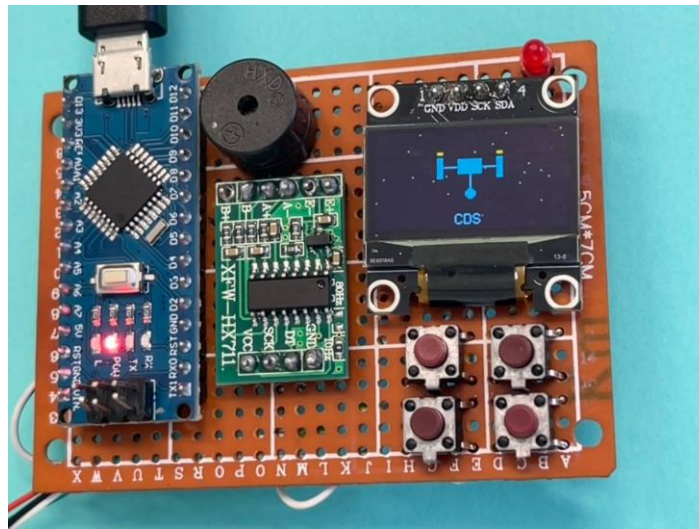


Figure 51 : Carte d'acquisition et affichage

3.2.1.6 Schéma électronique de circuit d'alimentation :

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

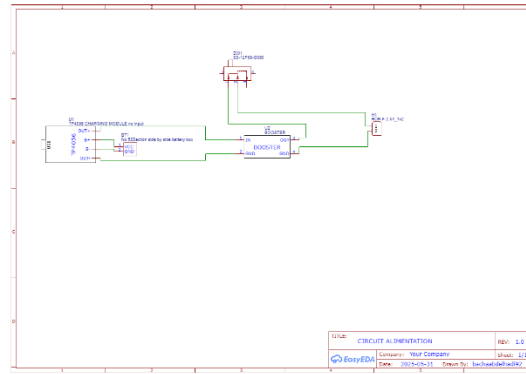


Figure 52 : Schéma électronique de circuit d'alimentation

3.2.1.7 Plaque PCB de la carte d'alimentation :

Les deux figures représentent le design du circuit imprimé (PCB) de la carte d'alimentation ainsi que l'aspect final de la carte électronique après l'installation des composants.

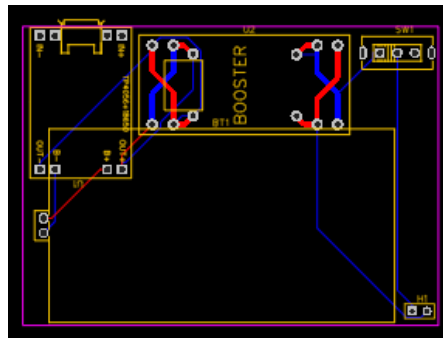


Figure53 : Design du circuit PCB de la carte d'alimentation

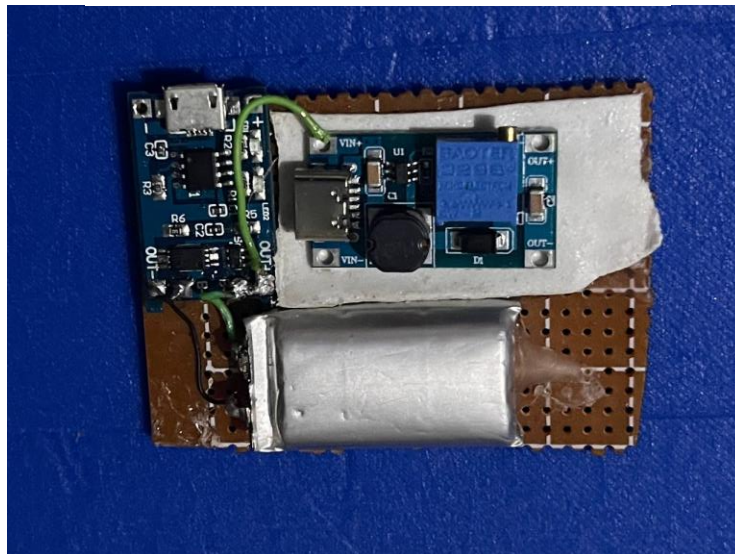


Figure 54: Carte d'alimentation de la clé dynamométrique

3.2.2 Réalisation de partie mécanique :

3.2.2.1 Conception de la clé dynamométrique :

Pour la conception de la clé dynamométrique, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks.

Définition de logiciel SolidWorks :

SolidWorks est un logiciel de conception 3D paramétrique. Il génère trois types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont liés. Si on modifie quelque chose, cela se reflète sur tous les fichiers concernés.

Une maquette numérique, c'est un dossier complet sur un seul système. Plusieurs logiciels complètent l'éditeur SolidWorks. Des outils pour les métiers (tôlerie, bois, BTP...) et des logiciels de simulation mécanique ou 3D utilisent les éléments de la maquette virtuelle. [8]



Figure 55 : Solidworks

La figure suivante illustre la conception 3D de la clé dynamométrique.

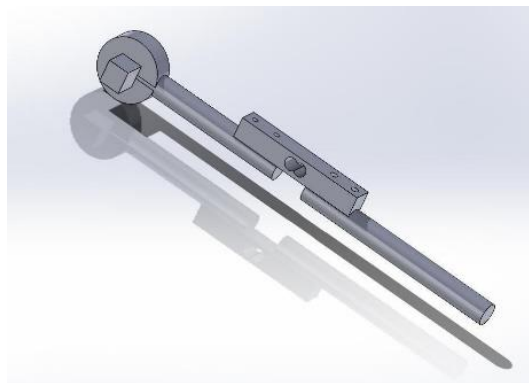


Figure 56 : Conception 3D de la clé dynamométrique

3.2.2.2 Réalisation de la clé dynamométrique :

3.2.2.2.1 Opération de découpe de la clé à cliquet :

Suite à la phase de conception 3D, une coupe verticale de la clé à cliquet a été réalisée, à une distance de 10,2 cm par rapport au centre de la tête. Dans un second temps, les deux parties obtenues ont été découpées horizontalement afin de les adapter au capteur de pesage.

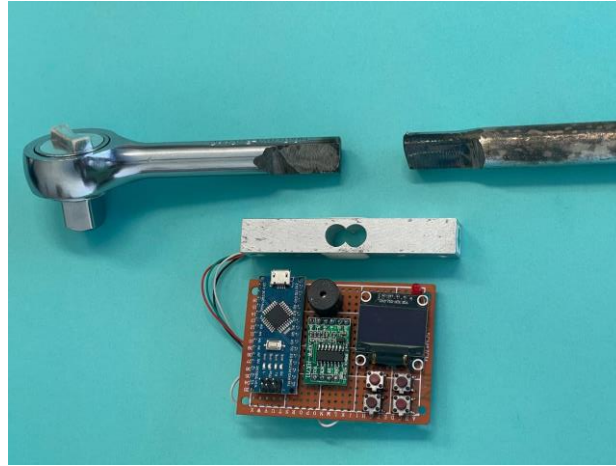


Figure 57: L'opération de découpe de la clé à cliquet

3.2.2.2.2 Opération de perçage de la pièce :

Au début, on voulait utiliser une perceuse verticale pour faire du trou. Mais comme c'était compliqué et qu'il y avait des problèmes techniques, on ne peut pas le faire. Nous avons choisi de fixer le capteur directement aux deux pièces avec des systèmes de fixation mécanique, comme sur la figure suivante :

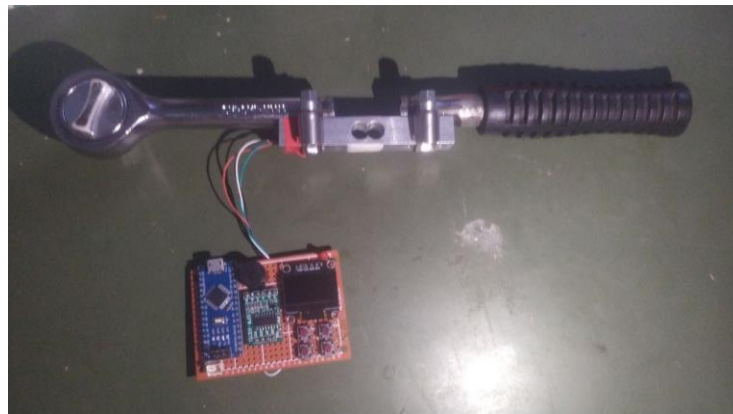


Figure 58 : Montage final de clé dynamométrique

3.2.2.2.3 Fonctionnement de la carte d'acquisition et affichage :

La figure suivante représente le fonctionnement de la carte d'acquisition et affichage :

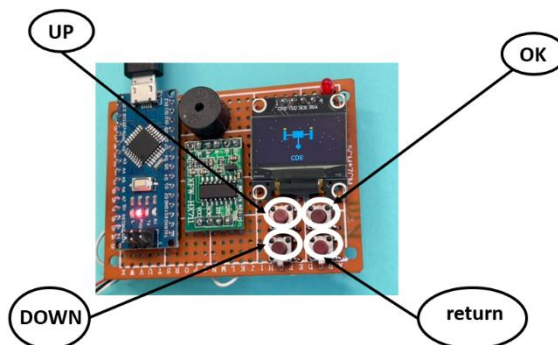


Figure 59: Fonctionnement des boutons

La figure montre les composants de la carte électronique, avec quatre boutons pour naviguer dans les menus et valider les choix.

Le code utilise un système anti-rebond pour garantir la fiabilité de la lecture des boutons.

Les boutons latéraux :

Le bouton OK permet de valider une sélection dans les différents menus.

Le bouton « RETURN » permet de revenir au menu précédent ou d'annuler une action.

Les boutons UP et DOWN servent à naviguer dans les menus.

Ils permettent de faire défiler les choix vers le haut ou vers le bas, que ce soit dans le menu principal, le menu de mesure ou l'écran de réglage du couple maximal.



Figure 60: L'affichage de menu

Le code :

La figure suivante représente partie de code Arduino de notre clé dynamométrique :

```
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <EEPROM.h>
#include <HX711.h>

#define SCREEN_WIDTH 128
#define SCREEN_HEIGHT 64
#define OLED_RESET -1

Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH

#define HX711_DOUT 2
#define HX711_SCK 3
HX711 scale;

#define BTN_OK 4
#define BTN_UP 5
#define BTN_DOWN 6
#define BTN_RETURN 8

#define BUZZER_PIN 10
#define LED_RED_PIN 12

enum MenuState {
  START_SCREEN,
  MAIN_MENU,
  TORQUE_MEASURE,
  TORQUE_CALIBRATION,
  ZEROING,
  SET_NAK_TORQUE,
  MEASURE_MENU
};

MenuState currentState = START_SCREEN;
MenuState previousState = START_SCREEN;
byte menuIndex = 0;
float sensorOffset = 0.0;
float torqueValue = 0.0;
float maxTorque = 10.0;
bool isMaxTorqueSet = false;
unsigned long lastDebounceTimes[4] = {0};
const byte debounceDelay = 10;
byte torqueMode = 0; // 0 for 5 Nm, 1 for 20 Nm

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3C)) {
    if(!display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 0x3D)) {
      while(1);
    }
  }

  display.setCursor(0, 25 + i*14);
  if(i == menuIndex) {
    display.print(F("> "));
    display.fillRect(0, 23 + i*14, SCREEN_WIDTH, 12, WHITE);
    display.setTextColor(BLACK);
    display.println(menuItems[i]);
    display.setCursor(0, 20);
    display.print(F(" "));
    display.println(menuItems[i]);
  }
  display.display();
}

void showSignalBrut() {
  float rawValue = scale.read_average(10);
  Serial.println(rawValue);
  display.clearDisplay();
  display.setTextSize(1);
  display.setCursor(0, 0);
  display.println(F("Signal Brut"));
  display.setTextSize(2);
  display.setCursor(0, 20);
  display.print(rawValue, 0);
  display.display();
}
```

Figure 61 : Code arduino de clé dynamométrique

3.2.2.2.4 Conception de la boîte et impression 3D :

Pour la conception 3D du boîtier, nous l'avons modélisé à l'aide du logiciel Fusion 360.

Définition de logiciel fusion :

Autodesk Fusion est une plateforme tout-en-un proposée par Autodesk, regroupant des outils de CAO, FAO, IAO, de conception de circuits imprimés, ainsi que des fonctionnalités de collaboration et de gestion des données. Découvrez son fonctionnement, ses différentes offres et ses options de tarification.



Figure 62 : Logiciel fusion

Les figures ci-dessous illustrent des représentations en 3D des boîtes :

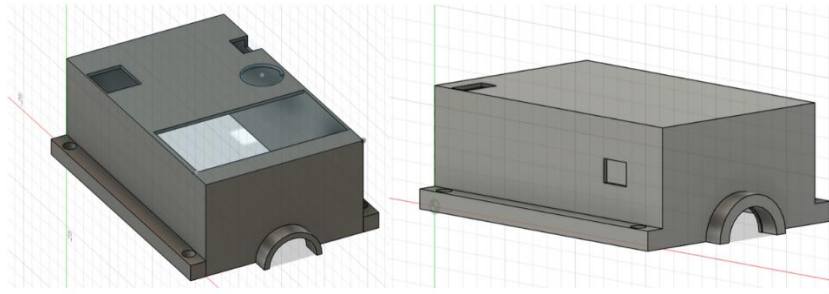


Figure 63 : Conception 3D de la boîte

3.2.3 Partie calibrage :

Pour calibrer notre clé dynamométrique, nous avons suivi la norme IS/ISO 6789 :2003.

La norme IS/ISO 6789 : C'est une norme internationale pour les outils dynamométriques. Elle définit les exigences, les méthodes d'essai et les procédures de réétalonnage pour le serrage contrôlé des assemblages boulonnés. Il s'applique aux clés dynamométriques à lecture directe (Type I) et à déclenchement (Type II). La norme couvre les contrôles de conception et de qualité, ainsi que les procédures d'étalonnage et de réétalonnage. Les outils doivent respecter des tolérances spécifiques en fonction de leur classe et de leur plage de couple. Ils doivent aussi passer des tests de surcharge et d'endurance pour prouver qu'ils sont fiables. Il faut attendre 12 mois ou 5 000 cycles pour le réétalonnage, sauf en cas de surcharge ou de dommage. Le dispositif d'étalonnage doit avoir une incertitude de mesure maximale de $\pm 1\%$. La norme sert à garantir la précision et la sécurité des outils dynamométriques.

3.2.3.1 Opération de calibrage :

Nous avons calibré notre dispositif en deux étapes pour couvrir toute la plage de mesure avec une précision optimale. On a d'abord réglé l'appareil entre 0 et 5 newton-mètres. Pour cela, nous avons utilisé un appareil précis pour mesurer le couple. En même temps, nous avons enregistré le couple indiqué par cet appareil et le signal brut de notre propre dispositif. Après, on a fait une deuxième étape de calibrage entre 5 et 20 newton-mètres, de la même façon. Chaque point de mesure consistait à faire une lecture du couple réel depuis l'appareil de référence et du signal brut associé mesuré par notre système. Grâce à ces informations, on a pu relier le signal brut à la valeur réelle du couple. Cela a permis de créer la courbe de calibrage de notre dispositif.

Première étape [0-5] N.m :

Dans cette étape, nous avons effectué un calibrage dans la plage de 0 à 5 N·m. Pour ce faire, nous avons installé la clé dynamométrique sur un instrument de mesure de couple dont les caractéristiques sont les suivantes : [35]



Figure 64 : Capteur de couple BLM SRTT-B 5 Nm-13

Type de capteur : capteur de couple (ou « torque transducer »).

Modèle : BLM SRTT-B.

Plage de mesure : 5 N.m

Précision statique : $\pm 0,25\%$

Interface de montage : standard mécanique Atlas Copco, type 13.

Utilisation principale : tester des visseuses, les étalonner, contrôler leur qualité.

La technologie utilisée est la mesure par jauges de déformation.

Il fonctionne avec les systèmes de mesure Atlas Copco.

La direction de mesure est la suivante :

- Le couple est mesuré dans les deux sens.

La plage dynamique convient au vissage statique et dynamique. [35]

La clé est fixée sur une poignée montée sur une table, réglée à un angle de 90° , pour appliquer des couples de 0, 1, 2, 3, 4 et 5 N·m. Pour chaque valeur, on a fait la lecture du couple sur l'appareil de référence et le signal brut affiché par notre clé dynamométrique.

Comme illustré dans la figure suivante :

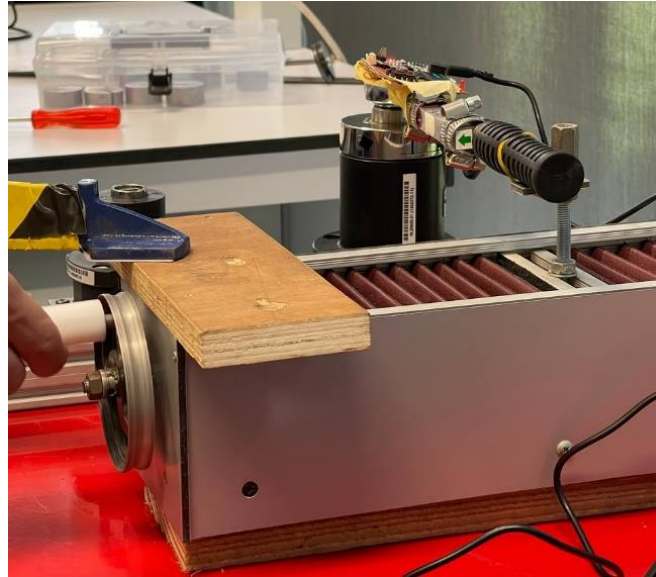


Figure 65:Table de calibration

Cette opération a été répétée lors de trois essais distincts. À chaque essai, nous avons modifié le point d'application du couple sur la poignée, dans le but d'évaluer l'influence de la position sur la précision des mesures.

Essai 1 : Lors du premier essai, nous avons fixé la clé dynamométrique à 18,5 cm du centre du couple. Cela fait 8,3 cm entre le couple et la jauge de contrainte du capteur de pesage comme illustré dans la figure suivante :



Figure 66 : Fixation de la clé a distance 18.5 cm

Une fois la clé fixée, nous avons lancé le calibrage en appliquant les couples de 0, 1, 2, 3, 4 et 5 N·m. Pour chaque valeur, on a comparé la lecture de l'instrument de référence et le signal brut d'afficheur de notre clé dynamométrique.



Figure 67 : Instrument de référence

Chapitre 3 : Conception, réalisation et analyse des résultats

Pour récupérer ces mesures, nous avons utilisé le moniteur série du logiciel Arduino IDE. Ces données ont ensuite été copiées et collées dans un fichier Excel.



Figure 68 : L'affichage de mesure sur l'excel

Nous avons donc pris 37 mesures pour représenter comment le système répond, comme sur le dessin suivant :

Table6 : Les mesures d'essai 1

0	1	2	3	4	5								
99146	158562	215765	272664	334738	387808		99126	157364	215093	271186	332034	385998	
99137	158367	215617	272496	334232	388134		99130	157283	215086	271158	331898	385869	
99113	158162	215566	272322	333838	387956		99126	157235	215000	271064	331760	385751	
99094	158032	215491	272152	333517	387574		99132	157215	214952	271008	331658	385568	
99116	157932	215428	272009	333265	387330		99098	157143	214908	270921	331559	385455	
99114	157828	215384	271707	333052	387093		99113	157108	214892	270828	331450	385338	
99118	157722	215327	271636	332831	386872		99118	157060	214843	270781	331349	385223	
99107	157646	215279	271634	332661	386651		99110	157021	214808	270686	331238	385131	
99098	157574	215220	271501	332465	386485		99077	156972	214768	270628	331149	385029	
99133	157486	215202	271374	332306	386292		99076	156900	214728	270564	331055	384909	
99119	157406	215113	271279	332150	386161		99103	157055	214702	270506	330961	384832	
99126	157364	215093	271186	332034	385998		99110	157027	214672	270446	330895	384726	
99130	157283	215086	271158	331898	385869		99112	156948	214665	270379	330806	384626	
99126	157235	215000	271064	331760	385751		99112	156879	214603	270322	330730	384517	
99132	157215	214952	271008	331658	385568		99098	156846	214600	270298	330641	384448	
99098	157143	214908	270921	331559	385455		99092	156802	214561	270228	330574	384373	
99113	157108	214892	270828	331450	385338		99091	156787	214532	270192	330502	384258	
99118	157060	214843	270781	331349	385223		99086	156759	214507	270150	330429	384210	
99110	157021	214808	270686	331238	385131		99077	156726	214464	270108	330375	384135	
99077	156972	214768	270628	331149	385029		99090	156681	214453	270040	330288	384052	
99076	156900	214728	270564	331055	384909		99100	156657	214435	269994	330220	383955	
99103	157055	214702	270506	330961	384832		99077	156613	214382	269944	330178	383909	
99110	157027	214672	270446	330895	384726		99074	156611	214350	269893	330133	383838	
							99073	156584	214329	269670	330053	383773	
							99086	156453	214329	269590	329989	383685	
							moyenne	99105.1	157207	214890	270871	331583	385443
							ecart type	42.4264	1491.29	1015.41	2173.65	3358.05	2915.4

Après avoir obtenu les mesures, nous avons calculé la moyenne et l'écart type pour chaque valeur de couple appliqué ,

Table7 : Information d'équation de calibrage

la distance = 18.5cm , temperature = 25.4 c° , humidity=70.2			
couple (N.m)±0,25 %	signal brut	l'écart type	l'incertitude relative
0	99073.000	42.426	0.043
1	156584.000	1491.288	0.952
2	214329.000	1015.405	0.474
3	269670.000	2173.646	0.806
4	330053.000	3358.050	1.017
5	383773.000	2915.401	0.760
facteur d'échelle	1.75041E-05	l'écart type	1.03517E-07
offset	-1.740	l'écart type	0.027

À partir de ces résultats, nous avons tracé la courbe d'étalonnage, qui représente la relation entre le couple (en N.m) et les valeurs moyennes du signal brut mesuré par notre dispositif, comme illustré dans la figure suivante :

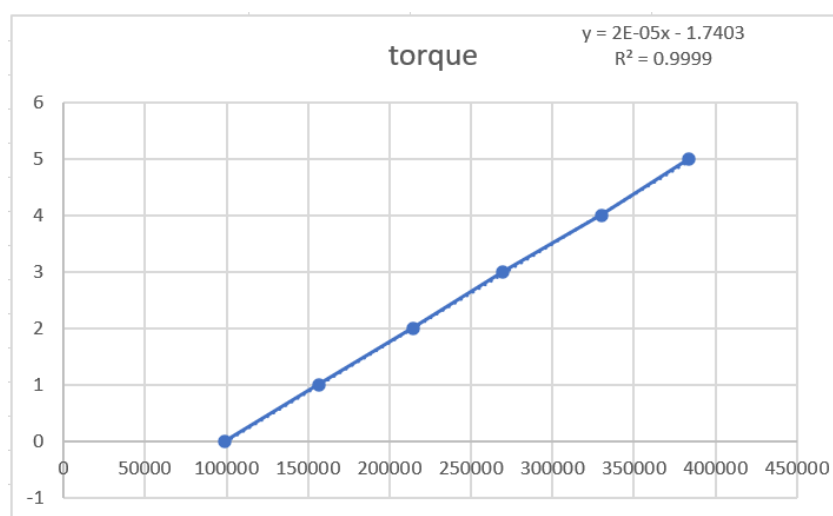


Figure 69 : Courbe d'étalonnage d'essai 1

À partir de la courbe, nous avons pu extraire l'équation de calibrage suivante, qui établit la relation entre le signal brut mesuré et le couple appliqué :

$$T = 1.75 \times 10^{-5} \cdot \text{signal brut} - 1.74 \dots \dots \dots (61)$$

Cette équation permet de convertir directement les valeurs brutes du capteur en valeurs de couple réelles, en s'appuyant sur la courbe d'étalonnage obtenue expérimentalement.

Évaluation de l'incertitude de mesure :

Objectif : Le but de cette étape est de vérifier que le système de mesure de couple fonctionne bien. Pour cela, on traite le signal brut du capteur de pesage connecté au module HX711.

Pour vérifier que le système de mesure de couple fonctionne bien, nous l'avons calibré en comparant les valeurs mesurées avec des couples appliqués à l'aide d'un appareil de référence. Pour calculer l'incertitude de mesure, on a utilisé plusieurs sources : la répétabilité du système (l'écart type des mesures répétées pour chaque couple), les erreurs potentielles liées à la position du couple sur le manche, les imprécisions liées au dispositif de référence, et les incertitudes statistiques du modèle de régression utilisé pour l'étalonnage (incertitudes sur la pente et l'ordonnée à l'origine). On a combiné toutes ces contributions pour obtenir l'incertitude composée.

L'expression mathématique correspondante est :

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{u_{\text{étalon}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\text{position}}}{\sqrt{3}}\right)^2 + (u_a \cdot x)^2 + u_b^2 + a \cdot \sigma_{\text{signal brut}}^2} \dots\dots\dots(62)$$

Ensuite, l'incertitude composée est multipliée par un facteur de couverture ($k = 2$) pour obtenir l'incertitude élargie, ce qui nous donne une confiance d'environ 95 % :

$$U = k \times u_c \dots\dots\dots(63)$$

On définit alors l'incertitude relative pour chaque point :

$$u_{\text{relative},i} = \frac{U_i}{T_{\text{référence},i}} \dots\dots\dots(64)$$

Enfin, on calcule l'incertitude relative globale de l'instrument de manière pondérée :

$$u_{\text{relative},\text{total}} = \frac{\sum(T_{\text{référence},i} \times u_{\text{relative},i})}{\sum T_{\text{référence},i}} \dots\dots\dots(65)$$

Ce traitement nous a permis de déterminer une incertitude élargie pour chaque couple testé (0, 1, 2, 3, 4, 5 N.m) et d'évaluer l'incertitude relative associée à chaque point. Pour finir, on a calculé une incertitude globale moyenne comme illustré dans le tableau suivant :

Table8 : calcule l'incertitude d'essai 1

incertitude régression^2	couple lie	l'ecart	L'incertitude composé	l'incertitude ulargé	l'incertitude relative %	correction
0.001	-0.006	-0.006	0.065	0.130		0.006
0.001	1.001	0.001	0.071	0.142	14.227	-0.001
0.001	2.011	0.011	0.070	0.140	7.017	-0.011
0.002	2.980	-0.020	0.080	0.159	5.310	0.020
0.002	4.037	0.037	0.093	0.187	4.674	-0.037
0.002	4.977	-0.023	0.091	0.182	3.644	0.023
l'incertitude relative %	5.407					

Nous avons suivi les mêmes étapes lors des deux essais suivants, en répétant l'ensemble de la procédure de calibrage. À l'issue de ces essais, nous avons obtenu les résultats suivants.

Essai 2 : Lors du deuxième essai, nous avons fixé la clé dynamométrique à 21 cm de l'axe de rotation. Cette configuration correspond à une distance de 10,8 cm entre le point d'application du couple et la jauge de contrainte intégrée au capteur de pesage comme illustré dans la figure suivante :



Figure 70 : Fixation de la clé d'essai 2

Le tableau suivant présente les mesures obtenues lors du deuxième essai :

Table9 : les mesures de l'essai 2

	0	1	2	3	4	5							
	101116	152126	202740	254645	300262	350300		100917	151037	201716	252806	297929	348669
	101148	151932	202501	254283	299569	350028		100921	151007	201683	252688	297843	348582
	101042	151803	202358	254053	299295	349841		100946	150943	201610	252602	297713	348489
	101110	151653	202267	253876	299110	349675		100912	150878	201577	252521	297638	348404
	101071	151582	202175	253694	298920	349498		100907	150803	201536	252430	297527	348306
	100988	151490	202090	253560	298723	349358		100900	150772	201465	252339	297439	348233
	100930	151404	202032	253381	298572	349238		100927	150750	201412	252243	297352	348130
	100914	151323	201973	253249	298451	349120		100929	150708	201341	252157	297265	348071
	100936	151265	201936	253140	298288	348990		100914	150665	201307	252076	297166	347992
	100915	151145	201851	252997	298174	348886		100898	150637	201252	252033	297111	347936
	100920	151097	201789	252875	298059	348771		100945	150578	201222	251958	297040	347840
	100917	151037	201716	252806	297929	348669		100922	150571	201173	251869	296972	347745
	100921	151007	201683	252688	297843	348582		100930	150521	201120	251811	296865	347688
	100946	150943	201610	252602	297713	348489		100936	150506	201085	251775	296831	347644
	100912	150878	201577	252521	297638	348404		100948	150458	201019	251703	296774	347587
	100907	150803	201536	252430	297527	348306		100936	150432	201026	251643	296694	347494
	100900	150772	201465	252339	297439	348233		100913	150401	200946	251617	296653	347433
	100927	150750	201412	252243	297352	348130		100912	150384	200930	251564	296598	347369
	100929	150708	201341	252157	297265	348071		100930	150335	200882	251485	296511	347333
	100914	150665	201307	252076	297166	347992		100923	150336	200858	251436	296466	347246
	100898	150637	201252	252033	297111	347936		100948	150304	200818	251401	296404	347183
	100945	150578	201222	251958	297040	347840		100949	150283	200754	251354	296329	347141
	100922	150571	201173	251869	296972	347745		100929	150265	200892	251286	296282	347104
	100930	150521	201120	251811	296865	347688		100933	150244	200850	251215	296213	347054
	100936	150506	201085	251775	296831	347644		100957	150222	200836	251172	296288	346998
	100948	150458	201019	251703	296774	347587	moyenne	101037	151174	201788	252909	298275	348649
							ecart type	112.43	1346.33	1346.33	2455.78	2810.04	2334.87

À partir de ces résultats, nous avons tracé la courbe d'étalonnage représentant la relation entre le couple et les valeurs moyennes du signal brut mesurées par notre dispositif. Nous avons ensuite déterminé les coordonnées de la droite de régression, comme illustré dans les dans figure suivante :

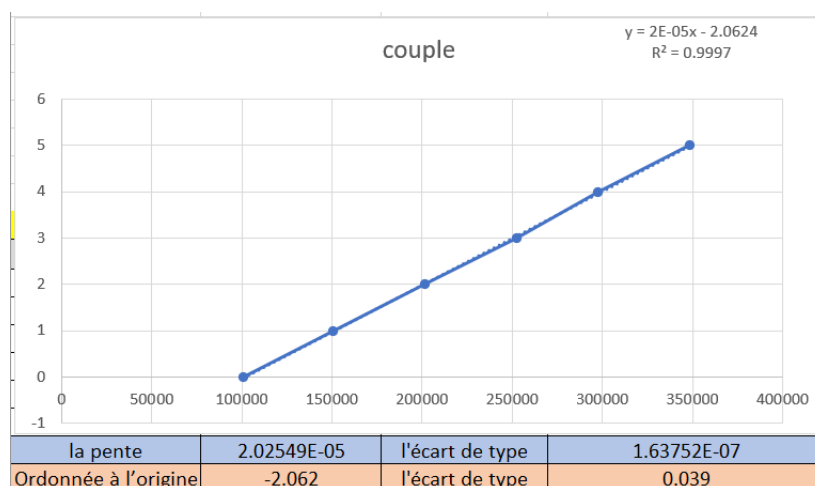


Figure 71: Courbe d'étalonnage de l'essai 2

À partir de la corp, nous avons pu extraire l'équation de calibrage suivante, qui établit la relation entre le signal brut mesuré et le couple appliqué :

$$T = 2.025 \times 10^{-5} \cdot \text{signal brut} - 2.062 \dots \dots \dots (66)$$

Évaluation de l'incertitude de mesure :

Après avoir appliqué les mêmes étapes que lors du premier essai , il faut tenir compte de la température et de l'humidité à chaque étape du changement du point d'application du couple, nous avons obtenu les résultats présentés dans le tableau suivant :



Figure 72: Mesure de température et l'humidité

Table10 : calcul l'incertitude de l'essai 2

la distance = 21cm , temperature = 25.9 c° , humidity=67.2										
couple (N.m)±0,25 %	signal brut	l'ecart type	l'incertitude relative	incertitude régression^2	couple lie	l'ecart	L'incertitude composé	l'incertitude élargie	l'incertitude relative %	correction
0	100952.000	63.205	0.063	0.002	-0.018	-0.018	0.072	0.144		0.018
1	150857.222	526.766	0.349	0.002	0.993	-0.007	0.075	0.150	15.047	0.007
2	201472.833	545.494	0.271	0.003	2.018	0.018	0.078	0.157	7.840	-0.018
3	252414.917	949.440	0.376	0.003	3.050	0.050	0.084	0.168	5.584	-0.050
4	297536.833	1050.389	0.353	0.004	3.964	-0.036	0.088	0.176	4.405	0.036
5	348260.444	930.969	0.267	0.005	4.992	-0.008	0.092	0.185	3.697	0.008
la facteur d'échelle	2.02549E-05	l'ecart type	1.63752E-07	l'incertitude relative %		5.572				
Offset	-2.062	l'ecart type	0.039							

Essai 3 : Lors du troisième essai, nous avons fixé la clé dynamométrique à 24.5 cm de l'axe central du couple. Cette configuration correspond à une distance de 14,3 cm entre le point d'application du couple et la jauge de contrainte intégrée au capteur de pesage comme illustré dans la figure suivante :



Figure 73 : Fixation la clé pour l'essai 3

Le tableau suivant présente les mesures obtenues :

Table11 : les mesures de l'essai 3

0	1	2	3	4	5								
100938	141754	185247	229075	271730	300120		100968	141476	184647	228225	270673	292368	
100941	141773	185168	228967	271583	296535		100963	141448	184636	228207	270629	291985	
100944	141769	185152	228879	271512	295478		101045	141442	184573	228169	270570	291753	
100954	141772	185080	228807	271427	295962		101019	141480	184343	228056	266100	292674	
100943	141705	185042	228750	271348	294227		101019	141487	184263	227961	253988	293398	
100957	141574	184998	228697	271255	292508		100967	141488	184296	227924	252638	293987	
100933	141602	184975	228612	271199	290174		100968	141445	184533	227913	255345	294435	
100955	141547	184920	228580	271119	289379		100964	141428	184669	227752	256611	294989	
100972	141560	184895	228538	271062	290875		100965	141410	184666	227772	253108	299047	
100961	141572	184867	228483	271010	291183		100982	141355	184628	227817	251619	299701	
100963	141565	184809	228425	270928	291069		100978	141309	184609	228008	253896	299722	
100955	141536	184794	228401	270894	291144		100969	141317	184597	227794	252913	299451	
100929	141522	184756	228343	270829	291485		101030	141304	184587	227961	247099	299673	
100935	141466	184724	228308	270791	291925		101041	141285	184566	227942	242263	299740	
100970	141468	184698	228263	270749	292294		101063	141317	184547	227945	243585	300193	
100968	141476	184647	228225	270673	292368		101025	141301	184508	227907	236565	300335	
100963	141448	184636	228207	270629	291985		101042	141311	184507	227869	235672	300302	
101045	141442	184573	228169	270570	291753		101041	141276	184469	227839	234287	300661	
101019	141480	184343	228056	266100	292674		101063	141257	184452	227804	233875	300872	
101019	141487	184263	227961	253988	293398		101025	141246	184466	227759	233241	300986	
100967	141488	184296	227924	252638	293987		101026	141238	184443	227770	232909	301200	
100968	141445	184533	227913	255345	294435		moyenne	100984	141467	184698	228209	258751	295606
100964	141428	184669	227752	256611	294989		l'ecart type	40.6784	157.961	251.26	392.303	14346.6	3979.71

À partir de ces résultats, nous avons tracé la courbe d'étalonnage :

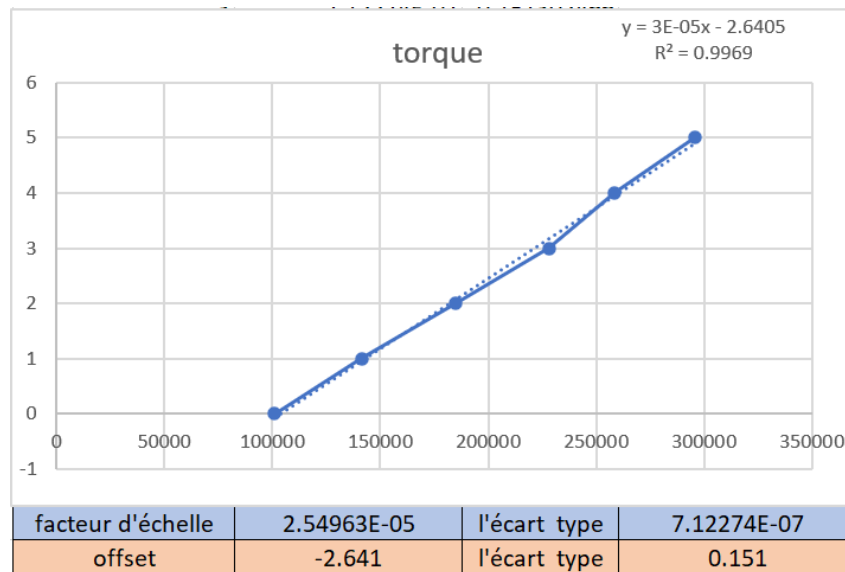


Figure 74 : Courbe d'étalonnage de l'étalonnage de l'essai 3

À partir de la corp, nous avons pu extraire l'équation de calibrage :

$$T = 2.55 \times 10^{-5} \cdot \text{signal brut} - 2.641 \dots \dots \dots (67)$$

Évaluation de l'incertitude de mesure :

Nous avons obtenu les résultats de mesure de l'incertitude présentés dans le tableau suivant :

Table12 : calcul l'incertitude de l'essai 3

la distance = 24.5cm , temperature = 24.8c° , humidity=73.1										
couple (N.m)±0,25 %	signal brut	l'ecart type	l'incertitude relative	incertitude régression^2	couple lie	l'ecart	l'incertitude composé	l'incertitude élargie	l'incertitude relative %	correction
0	100983.694	40.678	0.040	0.028	-0.066	-0.066	0.177	0.355		0.066
1	141466.806	157.961	0.112	0.033	0.966	-0.034	0.191	0.382	38.182	0.034
2	184698.056	251.260	0.136	0.040	2.069	0.069	0.209	0.418	20.887	-0.069
3	228208.944	392.303	0.172	0.049	3.178	0.178	0.230	0.460	15.319	-0.178
4	258750.611	14346.565	5.545	0.057	3.957	-0.043	0.441	0.881	22.025	0.043
5	295606.389	3979.714	1.346	0.067	4.896	-0.104	0.284	0.569	11.378	0.104
facteur d'échelle	2.54963E-05	l'ecart type	7.12274E-07	l'incertitude relative %	18.060					
offset	-2.641	l'ecart type	0.151							

Interprétation de résultat :

Après avoir réalisé les trois essais, nous avons obtenu les résultats indiqués dans le tableau suivant :

Table 13 : l'incertitude relative en déférent position

Position (cm)	incertitude relative %
14.300	18.060

10.800	5.572
8.300	5.407

À partir de ces résultats, nous avons tracé la courbe suivant représentant la relation entre la position et l'incertitude relative :

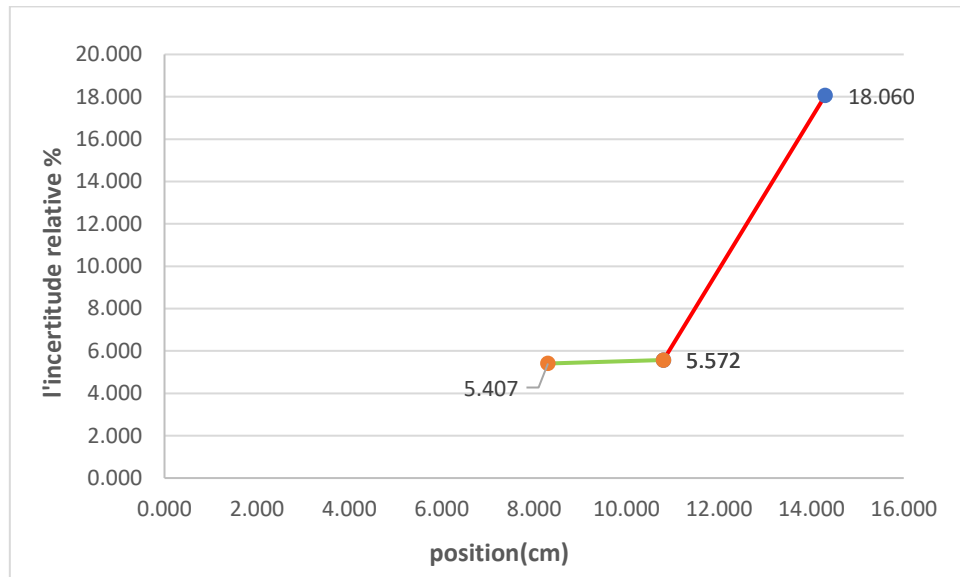


Figure 75 : La courbe l'incertitude relative en différent position

Après avoir étudié les résultats expliqués dans la courbe, on voit clairement que plus on éloigne le couple, plus les mesures sont imprécises. Si le couple est appliqué à 14,3 cm du point d'application du couple et du capteur de contrainte du capteur de poids, le degré d'incertitude relative atteint 18,06 %. La précision baisse donc beaucoup. Mais pour les distances courtes, le résultat est plus précis, avec 5,572 % et 5,407 % d'erreur. Plus le bras de levier est long, plus il est sensible aux erreurs mécaniques. Par exemple, il peut se courber, se déplacer ou ne pas être bien aligné. Mais si on se rapproche, on peut mieux contrôler l'angle et la position d'application de la force, donc moins d'erreurs. On peut donc dire qu'une erreur de mesure de moins de 6 % est obtenue quand le couple est appliqué à une distance inférieure à 11 cm.

Deuxième étape [5–20] N·m :

Dans cette étape, nous avons effectué un calibrage dans la plage de 5 à 20 N·m. Pour ce faire, nous avons installé la clé dynamométrique sur un instrument de mesure de couple présentant les caractéristiques suivantes :

Le capteur SRTT-B est un capteur de couple statique Atlas Copco nouvelle génération. Sa résistance est améliorée grâce à la nouvelle conception mécanique. Conçu pour tester n'importe quel type d'outils : clés, clés à cliquet et outils de vissage motorisés avec lesquels l'action rotative n'est pas souhaitée pendant la mesure. Son nouveau système breveté de fixation de l'assemblage test sur le dessus, permet d'éviter les erreurs éventuelles dues au jeu mécanique entre les deux appareils. Une gamme complète d'accessoires et d'assemblages test permet de contrôler les outils à coupure ou les clés à carré d'entraînement.

Type : capteur de couple de réaction statique (réactionnaire), conçu pour des applications où l'outil ne doit pas tourner pendant la mesure (ex. : clés dynamométriques, outils à impulsion).

Fixation améliorée : système breveté de montage du simulateur de joint sur le dessus, éliminant le jeu mécanique et garantissant des mesures plus précises.

Durabilité : nouvelle conception mécanique, robuste, prêt pour un usage avec le système sans fil IRC-Connect.

Specifications techniques:

Caractéristique	Valeur
Couple nominal	25 Nm
Intervalle de mesure	5 Nm à 25 Nm
Connexion	Carré de 36 mm
Longueur	113,9 mm
Poids	Environ 3,8 kg
Précision statique	$\pm 0.25\%$



Figure 76: Capteur de couple BLM SRTT-B 25 Nm-36

La clé dynamométrique a été fixée sur une poignée montée sur une table, placée à un angle de 90° pour bien appliquer le couple. On a appliqué des couples de 5, 10, 15 et 20 N·m l'un après l'autre. Pour chaque valeur, nous avons relevé le couple mesuré par l'instrument de référence et le signal brut affiché par notre dispositif. Ces mesures ont permis de créer une courbe de référence pour cette plage de mesure.

Dans cette opération de calibrage, nous avons fait 10 mesures par point de couple, comme sur la figure suivante :

Table14 : les mesures de calibrage 20Nm

	0	5	10	15	20
93990	321061	554752	779272	1000790	
93961	320534	552925	777857	1002922	
93971	320175	551828	776616	997460	
94002	319776	550975	775604	993620	
94088	319479	550182	774712	990685	
94118	319176	549556	773874	988240	
94152	318892	548991	773153	986198	
94033	318644	548489	772475	984419	
94090	318428	548033	771836	982841	
94069	318183	547618	771256	981430	
moyenne	94047.4	319434.8	550334.9	774665.5	990860.5
l'écart type	65.59166614	947.9016	2294.492	2654.893	7591.072

Ces mesures ont ensuite servi à tracer la courbe d'étalonnage et à en déduire l'équation de calibrage correspondante :

$$T = 2.223 \times 10^{-5} \cdot \text{signal brut} - 2.135 \dots\dots\dots(68)$$

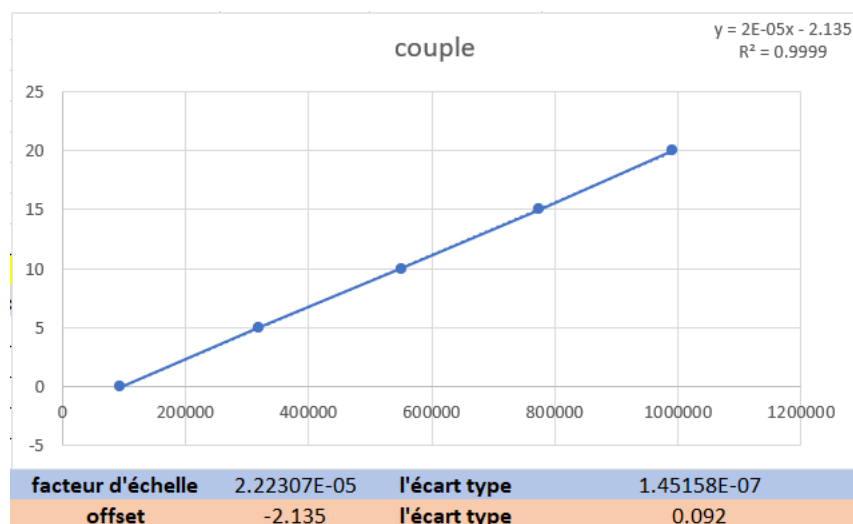


Figure 77: Courbe d'étalonnage de l'étape 2

Évaluation de l'incertitude de mesure :

Pour estimer l'incertitude, on a suivi la même méthode que pour la première étape (0 à 5 N·m). Le tableau suivant montre le calcul l'incertitude :

Table15 : calcul l'incertitude de l'étape 2

la distance = 23.5±0.1cm , temperature = 25.7c°, humidity=67.3										
couple (N.m)±0.25 %	signal brut	l'ecart type	l'incertitude relative	incertitude régression^2	couple lie	l'écart	correction	L'incertitude composé	l'incertitude élargie	l'incertitude relative %
0	94047.400	65.592	0.070	0.009	-0.044	-0.044	0.044	0.115	0.230	
5	319434.800	947.902	0.297	0.011	4.966	-0.034	0.034	0.125	0.250	5.002
10	550334.900	2294.492	0.417	0.015	10.099	0.099	-0.099	0.148	0.297	2.968
15	774665.500	2654.893	0.343	0.021	15.086	0.086	-0.086	0.171	0.342	2.277
20	990860.500	7591.072	0.766	0.029	19.892	-0.108	0.108	0.249	0.499	2.494
facteur d'échelle	2.22307E-05	l'écart type	1.45158E-07	l'incertitude relative % 2.775						
offset	-2.135	l'écart type	0.092							

Interprétation :

Pour calibrer le système de mesure de couple, on a fait des tests dans des conditions contrôlées : température de 25,7 °C, humidité de 67,3 % et distance d'applique couple et axe de rotation de 23,5 ± 0,1 cm. Des couples de référence entre 0 et 20 N·m ont été appliqués, et le signal brut du capteur de pesage connecté au module HX711 a été enregistré.

Pour chaque point de mesure, on a évalué l'incertitude de mesure à partir de plusieurs composantes : l'écart type des mesures répétées, les incertitudes liées à la position d'application du couple, celles dues au dispositif de référence, et les incertitudes statistiques du modèle de régression utilisé pour l'étalonnage. On a fait une somme des contributions pour calculer l'incertitude composée.

On a ensuite ajouté un facteur de couverture pour élargir l'incertitude composée.

$K = 2$, soit 95 % de confiance. Les incertitudes sont indiquées pour chaque valeur de couple testée, avec l'incertitude relative correspondante.

Les faibles couples ont une incertitude plus élevée à cause de leur faible rapport signal/bruit. Plus le couple appliqué augmente, moins il y a d'incertitude. Le système est imprévisible à 2,775 % en moyenne, comme le montre le tableau.

Test : Our tester si notre clé dynamométrique donne des mesures correctes par rapport aux autres mesures, dans le cadre de l'opération de calibrage, nous avons réalisé une petite expérience. Nous avons appliqué un couple, puis relevé la valeur mesurée par l'appareil de référence ainsi que le signal brut de notre clé dynamométrique, afin de faire une comparaison avec les résultats précédents.



Figure 78: Test de la clé

3.3 Réalisation de la carte d'acquisition de banc didactique :

La carte d'acquisition est très importante pour le banc didactique de déformation. Elle est faite pour traiter les signaux des jauges de contrainte. Ces jauges, placées dans des montages en pont de Wheatstone, produisent des signaux analogiques très faibles quand la machine change de forme.

La carte intègre des circuits de conditionnement du signal, tels que des amplificateurs instrumentaux et des filtres, afin d'assurer une lecture précise, stable et exempte de bruit. Une grande attention est portée à la qualité des connexions, à la réduction des interférences électromagnétiques et à la stabilité du système pour garantir des mesures fiables.

les données sont envoyées tout de suite à un petit appareil ou un ordinateur pour être traitées, affichées et analysées. Cette conception permet de bien voir et comprendre les déformations. Le banc est donc très utile pour apprendre et pour bien faire.

3.3.1 Conception et réalisation de la carte électronique :

3.3.1.1 Schéma électronique de la carte d'acquisition :

La figure suivante représente le schéma électronique de la carte d'acquisition :

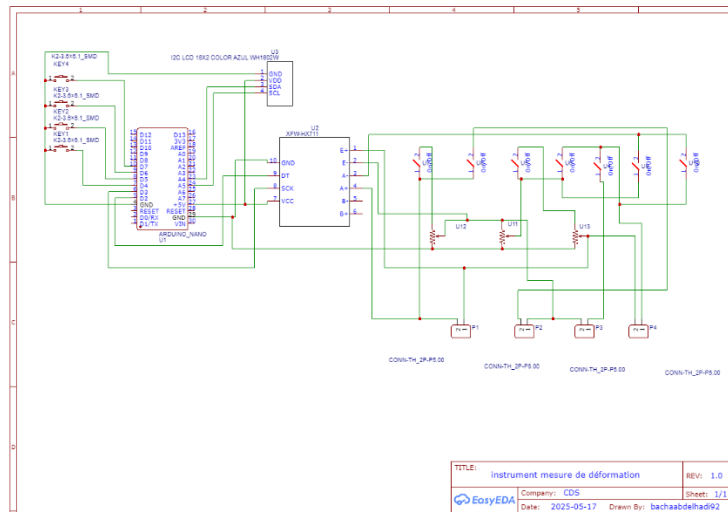


Figure 79 : Schéma électronique de la carte d'acquisition

La carte d'acquisition montre comment les différents composants du système sont connectés pour mesurer précisément les grandeurs mécaniques.

Au milieu, il y a une carte Arduino Nano qui fait le travail principal. Elle reçoit les données, les interprète et les affiche tout de suite.

Le module HX711 est la partie la plus importante du système. Il change le signal analogique très faible du pont de Wheatstone alimenté par les jauges de contrainte en un signal numérique que l'Arduino peut lire. Cette conversion garantit des mesures précises et stables.

Un écran LCD, connecté à l'Arduino via le protocole I2C, affiche les menus et les mesures.

3.3.1.2 Conception la plaque PCB :

La figure suivante représente le design de plaque PCB :

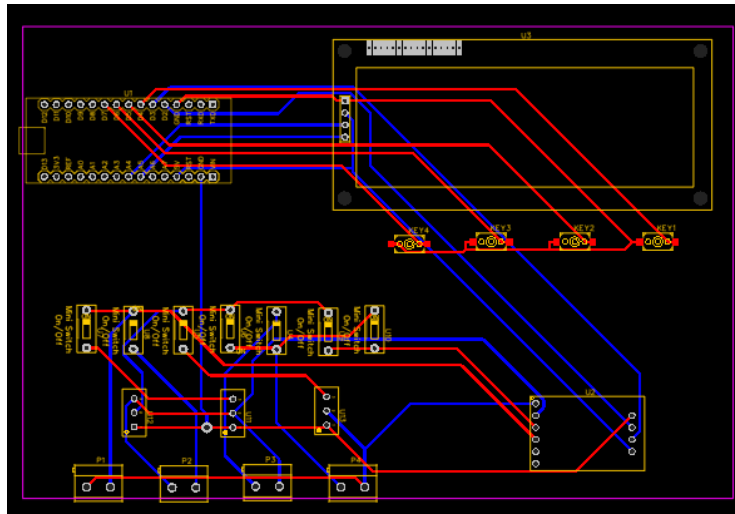


Figure 80 : Design de plaque PCB

3.3.1.3 Le vue 3D de circuit d'acquisition :

La figure suivante représente la vue 3D du circuit électronique de la carte d'acquisition,

La figure offre une vue d'ensemble de la version finale de la carte électronique :

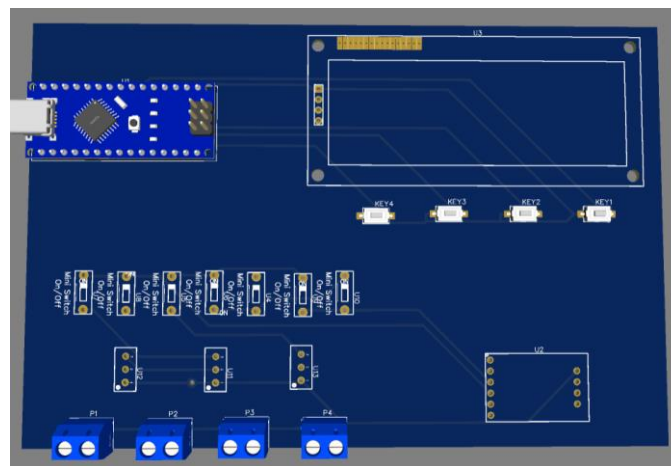


Figure 81 : Vue 3D de circuit d'acquisition

3.3.1.4 La carte d'acquisition :

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

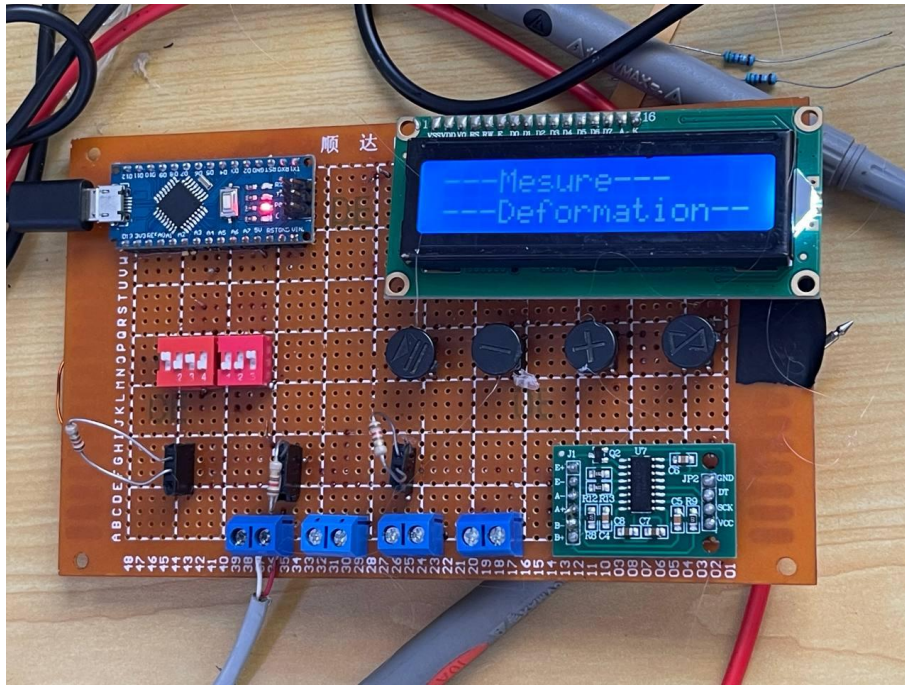


Figure 82: Carte d'acquisition

3.3.1.5 Conception de la boîte et impression 3D :

Les figures ci-dessous illustrent des représentations en 3D des boîtes :

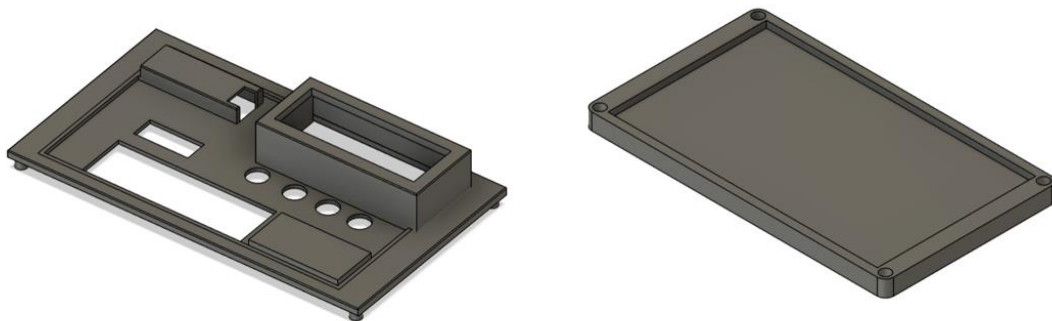


Figure 83 : Conception de la boîte du la carte d'acquisition de banc didactique

3.3.1.6 Fonctionnement de la carte d'acquisition :

La figure suivante représente fonctionnement de la carte d'acquisition :

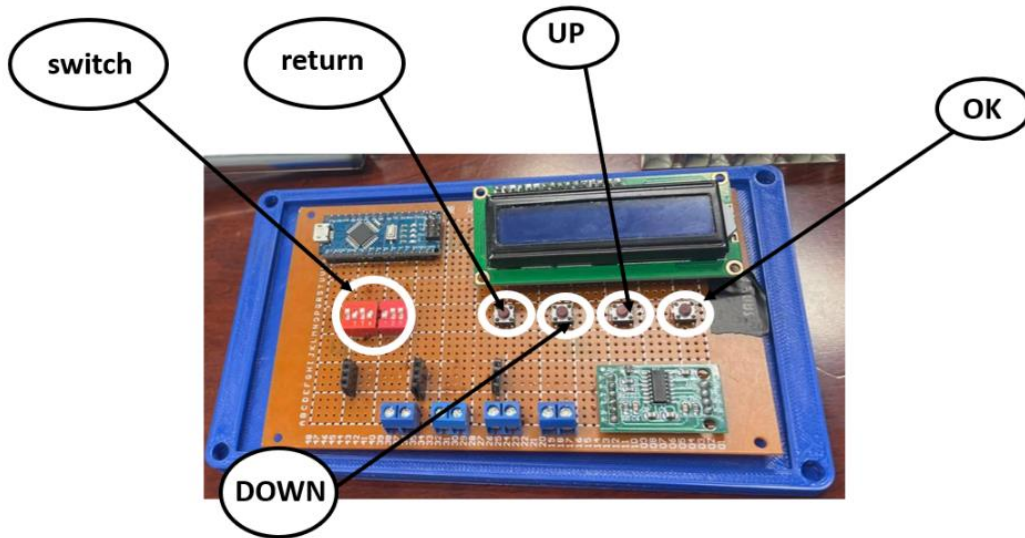


Figure 84: Fonctionnement du boutons

La carte électronique a quatre boutons pour naviguer et interagir avec les menus de l'interface utilisateur sur l'écran LCD. Les boutons OK et RETURN servent à valider et à revenir en arrière.

Le bouton OK permet de valider une sélection dans le menu. Par exemple, il sert à lancer une mesure de déformation, à choisir le nombre de jauges ou à démarrer la procédure de calibrage.

Le bouton RETURN permet de revenir à l'écran ou au menu précédent.

Les deux autres boutons, UP et DOWN, servent à faire défiler les options dans les menus. Par exemple, pour choisir entre une jauge, deux jauges ou quatre jauges, ou entre mesure normale et tangente. Ils permettent de naviguer verticalement à travers les lignes affichées sur l'écran LCD.

Dans le code Arduino, ces boutons sont connectés aux broches numériques suivantes :
Broche 12, d'accord.

Broche 10, UP.

Broche 8 est en bas.

Retour à la broche 6.

Chaque boucle « loop() » lit l'état des boutons avec la fonction « readButton() » et « INPUT_PULLUP ». Les actions sont ensuite traitées selon l'état actuel du système (stocké dans la variable « currentState »). La fonction handleNavigation() gère la navigation des menus multi-choix. Les autres cas sont gérés directement dans les blocs switch du loop().

Les switch pour choisir le pont de wheaston utilisé .

Le code :

Les figures suivantes représentent partie de code Arduino de notre système :

```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <EEPROM.h>
#include "HX711.h"

// Configuration LCD
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

// Configuration HX711
#define DOUT_PIN 4
#define SCK_PIN 2
HX711 scale;

// Définition des boutons
#define BTN_OK 12
#define BTN_UP 10
#define BTN_DOWN 8
#define BTN_RETURN 6

// États des menus
enum MenuState {
    START_SCREEN,
    MAIN_MENU,
    CALIBRATION_MENU,
    ZEROING,
    CALIBRATION_GAUGE,
    MEASURE_MENU,
}

bool calibrateGauge() {
    float strain = (calibrationStep * 0.2) * MAX_STRAIN;
    float sensorValue = scale.get_units(10);

    calibrationValues[calibrationStep] = sensorValue;
    calibrationStrains[calibrationStep] = strain;

    Serial.print("Step: ");
    Serial.print(calibrationStep);
    Serial.print(", Value: ");
    Serial.print(sensorValue, 6);
    Serial.print(" raw, Strain: ");
    Serial.print(strain * 1e6, 2);
    Serial.println(" microstrain");

    calibrationStep++;

    if (calibrationStep >= CALIB_STEPS) {
        return true;
    }

    return false;
}

void calculateCalibrationResults() {
    float sumX = 0, sumY = 0, sumXY = 0, sumX2 = 0;

    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Configurer switches:");

    switch(normalGaugeCount) {
        case 1:
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Open SW(1,3,7)");
            break;
        case 2:
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Open SW(1,4,6)");
            break;
        case 4:
            lcd.setCursor(0, 1);
            lcd.print("Open SW(2,5,6)");
            break;
    }

    void startNormalDeformation() {
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("Deformation Normal");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("Mesure en cours...");
        lastMeasurementTime = 0;
    }
}
```

Figure 85: Code arduino de carte d'acquisition de banc didactique

3.4 Collage et le soudage de la jauge de contrainte :

3.4.1 Le matériel utilisé :

Cette opération nécessite l'utilisation du matériel suivant :

Alcool, colle, jauges, cotons-tiges, couteau, trombone, papier téflon, Pince à épiler, la pièce, pied à coulisse, Règle.



Figure 86: Matériel utilisé en collage et soudage de jauge de contrainte

3.4.2 Nettoyage et traçage de la pièce :

Dans cette étape on a nettoyé les deux faces de la pièce avec de l'alcool et de la ouate. Puis, on a dessiné les axes de référence et la position des jauges de contrainte sur les deux surfaces comme illustré dans la figure suivante :

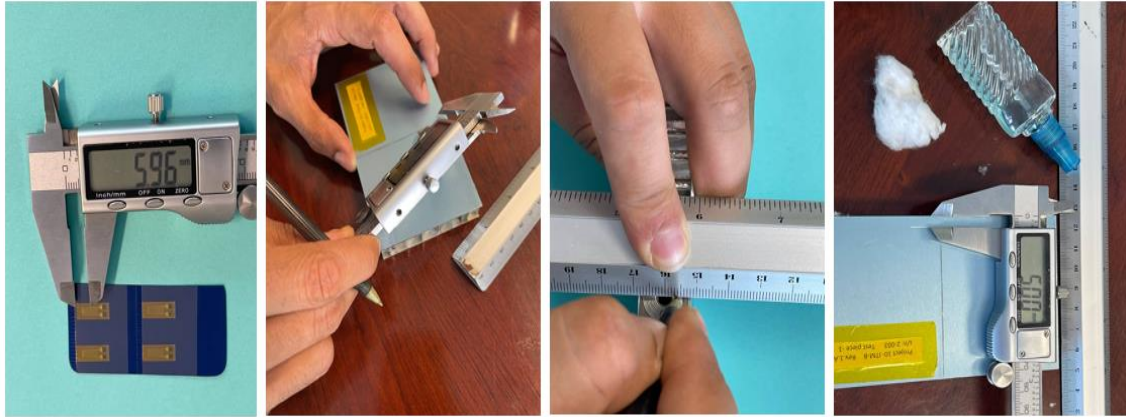


Figure 87 : Nettoyage et traçage de la pièce

3.4.3 Collage :

Après avoir nettoyé et tracé la pièce, nous avons collé les jauges de contrainte sur les deux faces opposées. Les jauges ont été placées parallèlement et perpendiculairement à l'axe X, à 5 mm du point d'application de la tension. Avec cette configuration, on peut faire un montage en demi-pont de Wheatstone. C'est un montage idéal pour mesurer les efforts de traction.

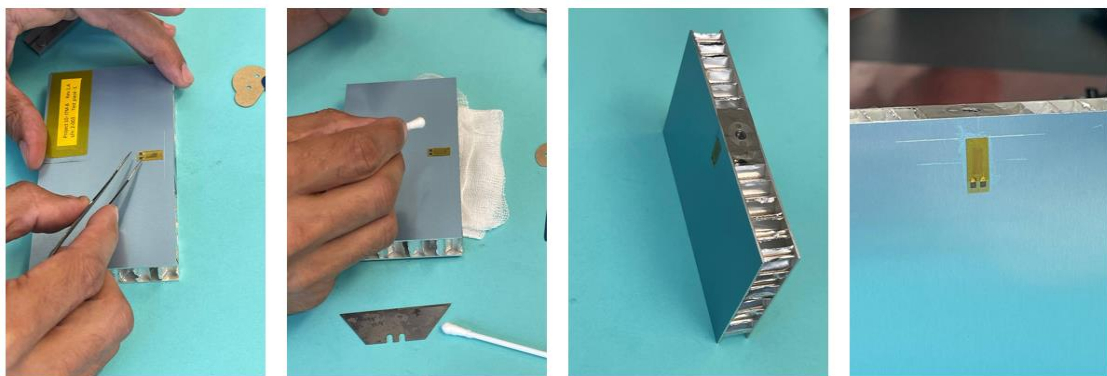


Figure 88: Collage de jauge de contrainte

3.4.4 Soudage :

Après avoir collé les jauges, nous avons laissé sécher l'adhésif pour bien fixer tout ça. Après avoir fixé les jauges, nous avons soudé les fils de connexion des jauges de contrainte, comme sur les figures suivantes :

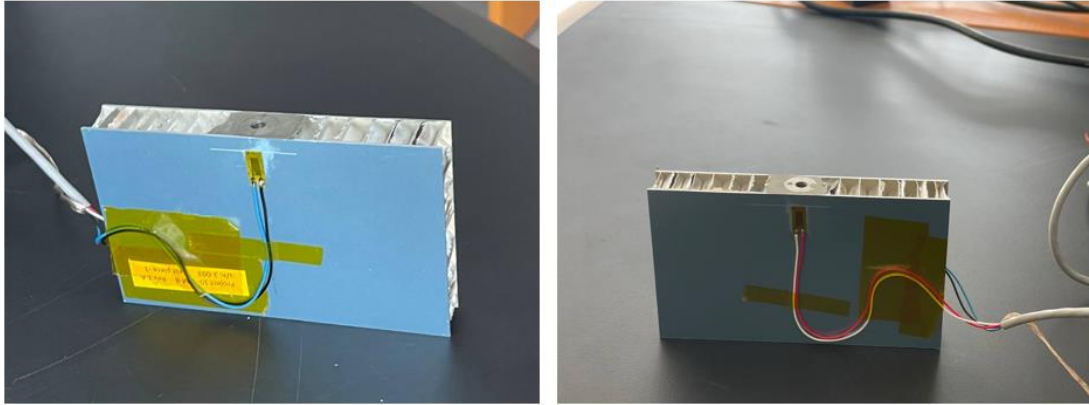


Figure 89 : Soudage de fils

3.5 Conclusion :

Malgré nous n'avons pas pu faire l'essai de traction. C'est à cause de problèmes techniques et de matériel.

Mais la conception, la fabrication et le calibrage des deux systèmes (la clé dynamométrique électronique et la carte électronique du banc didactique) ont été faites avec soin. Les premiers tests montrent que la clé dynamométrique peut être utilisée sans problème. Les erreurs de mesure ont été bien évaluées.

Ce chapitre a montré que le projet mêle plusieurs disciplines : mécanique, électronique et conception assistée par ordinateur. Les compétences acquises et les solutions innovantes proposées vont faciliter les choses à l'avenir, surtout pour surmonter les obstacles techniques rencontrés.

L'essai de traction n'a pas pu être fait, mais les travaux sont une bonne base pour plus tard. Ils pourront servir dans l'enseignement et l'industrie.

Conclusion générale :

Ce projet de fin d'études a abouti à la conception et à la réalisation de deux dispositifs instrumentés utilisant des jauges de contrainte : une clé dynamométrique électronique et une carte d'acquisition pour un banc didactique destiné à l'étude des déformations mécaniques. En mobilisant des compétences en mécanique, électronique, informatique et métrologie, ce travail a su répondre à des besoins concrets dans les domaines de l'industrie et de l'enseignement technique.

La démarche adoptée s'est voulue simple, économique et reproductible, en s'appuyant sur des composants accessibles et des technologies éprouvées. Les résultats expérimentaux obtenus démontrent la faisabilité et la fiabilité des systèmes réalisés. Malgré des contraintes matérielles et techniques – telles que l'indisponibilité de certaines machines-outils comme la CNC, ou l'impossibilité de mener certains essais mécaniques (traction, perforation, etc.) – le projet a su atteindre ses principaux objectifs.

Des pistes d'amélioration restent envisageables, notamment au niveau de l'intégration mécanique (conception de boîtiers optimisés), de l'ergonomie logicielle (affichage et traitement des données en temps réel), et de la connectivité (intégration de modules sans fil Bluetooth ou Wi-Fi). Le recours à des capteurs plus sensibles et à des circuits analogiques de précision permettrait également d'accroître les performances globales.

En définitive, ce travail constitue une base solide pour des développements ultérieurs, que ce soit dans le domaine du contrôle industriel ou de la formation en instrumentation. Il illustre parfaitement comment des technologies classiques comme les jauges de contrainte peuvent, lorsqu'elles sont associées à des systèmes embarqués modernes, fournir des solutions innovantes, pratiques et pédagogiquement pertinentes.

Bibliographie

- [1] U. M. C. 1, «Chapitre 1 : Notions de contraintes et de déformations géométriques».
- [2] D. K. MOURAD, «COURS D'ELASTICITE,» 2021.
- [3] S.BENSAADA, «cours résistance de matériaux».
- [4] J. YONG, «Contribution à l'étude d'un capteur de force piézoélectrique résonant à forte,» *Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier)*, Le Jeudi 11 avril 2013-04-15.
- [5] M. B. Lynda, «conception et réalisation système de mesure électronique pour un banc didactique d'étude de jauge de contrainte,» *UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZ-I OUZOU*, 2013//2014.
- [6] D. C. -. L. Gubo, «LES JAUGES DE CONTRAINTES». *Elèves de 1ère Sciences et Technologie de Laboratoire*.
- [7] Micro-MeasureMeNTs, « Strain Gages and Instruments». *Plane-Shear Measurement with Strain Gages*.
- [8] DamienAndré, « Cours-Td-Tp Résistance Des Matériaux,» *université de limoges école d'ingénieurs de limoges*, 2avril2024.
- [9] omega.co.uk, «STRAIN GAUGE INSTALLATION». *HOWTOPOSITION STRAIN GAUGES TO MONITOR BENDING, AXIAL, SHEAR, AND TORSIONAL LOADS*.
- [10] V. P. Group, «Plane-Shear Measurement with Strain Gages».
- [11] G. M. Smith, "Strain Gauge Applications - Practical Uses of Strain Gauge Sensors Major strain gauge applications," Monday, February 13, 2023.
- [12] «Clé dynamométrique – Outillage à main,» Gama Outillage, [En ligne]. Available: <https://gamaoutillage.net/categorie/outillage-a-main/cle-dynamometrique/>. [Accès le 13 06 2025].
- [13] «ORECA-STORE. À quoi sert une clé dynamométrique ?,» [En ligne]. Available: <https://www.oreca-store.com/blog/tutoriels-cat/a-quoi-sert-une-cle-dynamometrique/>. [Accès le 13 06 2025].
- [14] «Qu'est-ce qu'une clé dynamométrique et comment l'utiliser ?,» RS Components, [En ligne]. Available: https://uk-rs--online-com.translate.goog/web/content/discovery/ideas-and-advice/torque-wrenches-guide?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=fr&_x_tr_hl=fr&_x_tr_pto=rq&_x_tr_hist=true. [Accès le 24 05 2025].
- [15] [En ligne].
- [16] «Le module HX711,» [En ligne]. Available: <https://www.robotique.site/tutoriel/le-module-hx711/>.
- [17] «HX711 Load Cell Amplifier Hookup Guide,» SparkFun , 12 03 2018. [En ligne]. Available: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide>. [Accès le 24 05 2025].

- [18] A. Semiconductor, «HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales».
- [19] «Capteurs de Pesage : guide d'information,» LCM Systems Ltd, 04 07 2024. [En ligne]. Available: <https://fr.lcmsystems.com/load-cell-calibration-importance-and-methods>. [Accès le 13 6 2025].
- [20] «Capteur de force, Mesure de force traction compression haute précision,» Sensel Measurement, [En ligne]. Available: <https://sensel-measurement.fr/fr/3-capteur-de-force>. [Accès le 24 05 2025].
- [21] «Capteur de force,» Sensel Measurement, [En ligne]. Available: <https://sensel-measurement.fr/fr/3-capteur-de-force>.
- [22] «Le module HX711,» Robotique Site, 06 05 2023. [En ligne]. Available: <https://www.robotique.site/tutoriel/le-module-hx711/>.
- [23] «Arduino Nano : tout savoir sur cette carte microcontrôleur,» OBJETCONNECTE.COM, 13 05 2025. [En ligne]. Available: <https://www.objetconnecte.com/arduino-nano-carte-microcontroleur/>.
- [24] «The Ultimate Guide to Arduino Nano Pinout,» NextPCB, 27 04 2023. [En ligne]. Available: <https://www.nextpcb.com/blog/arduino-nano-pinout>.
- [25] «L'Arduino Nano,» MicroDomotique, [En ligne]. Available: <https://www.microdomotique.fr/larduino-nano/>.
- [26] «4PIN 1.3" OLED module blue color 128X64,» Websoog, 24 05 2025. [En ligne]. Available: <https://www.websoog.com/fr/industriel-scientifique/280-4pin-1-3-oled-module-blue-color-128x64.html>.
- [27] «Afficheur OLED i²C Arduino (avec contrôleur SSD1306 monochrome 128×64 pixels),» Passion Electronique, 17 01 2024. [En ligne]. Available: <https://passionelectronique.fr/ecran-oled-i2c-arduino/>. [Accès le 13 6 2025].
- [28] «Le CLIQUET ou la clé à cliquet,» Nicam, 11 2024. [En ligne]. Available: <https://www.nicam.fr/blog/les-cliquets-et-les-douilles/le-cliquet-ou-la-cle-a-cliquet.html>. [Accès le 13 06 2025].
- [29] «Comment choisir sa clé à cliquet,» Berner , 18 12 2023. [En ligne]. Available: <https://blog.berner.eu/comment-choisir-sa-cle-a-cliquet/>.
- [30] «Arduino 7] L'affichage LCD, une autre manière d'interagir,» David Becue, [En ligne]. Available: https://www.academia.edu/33533469/Arduino_7_Laffichage_LCD_une_autre_man%C3%A8re_dinteragir. [Accès le 13 06 2025].
- [31] «Afficheur LCD Arduino,» Moussasoft, [En ligne]. Available: <https://www.moussasoft.com/afficheur-lcd-arduino/>.
- [32] PowerLab-DZ, «Convertisseur DC-DC MT3608 Step-Up 2V-24V vers 3V-28V,» [En ligne]. Available: <https://powerlab.dz/product/mt3608-convertisseur-dc-dc-step-up-2v-24v-vers-3-28v/>.
- [33] PowerTech-DZ, «Module chargeur de batterie au lithium TP4056 18650 5V 1A Micro USB.,» [En ligne]. Available: <https://powertech-dz.net/products/single/tp4056-module-chargeur-de-batterie-au-lithium-18650-5v-1a-micro-usb-vente-composants-electronique-blida-algerie-650>.

- [34] «EasyEDA : Dessinez vos circuits imprimés en ligne,» Framboise314 (François MOCQ), 07 05 2016. [En ligne]. Available: <https://www.framboise314.fr/easyeda/>. [Accès le 13 06 2025].
- [35] «SRTT-B Torque Transducer – User Manual,» [En ligne]. Available: <https://www.manualslib.com/manual/3078054/Atlas-Copco-Srtt-B.html?page=4#manual>.
- [36] J.-A. Goule, «Transformation des contraintes et des deformations 2D-3D : formulation analytique,» 2011.
- [37] techno-science.net, «Capteur».
- [38] balluff, «Fonctionnement, structure et technologies de capteurs,» *Balluff SAS*, 2025.
- [39] «TECHNOSCIENCE.NET. SolidWorks,» [En ligne].
- [40] «AUTODESK,» [En ligne].
- [41] «What Is A Torque Wrench And How Do You Use It?,» 2022. [En ligne]. Available: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/torque-wrenches-guide>. [Accès le 2025].
- [42] «Écran LCD ou OLED : Quel est le meilleur et pourquoi,» Riverdi, [En ligne]. Available: <https://riverdi.com/fr/blog/ecran-lcd-ou-oled-quel-est-le-meilleur-et-pourquoi>.
- [43] O. Engineering, «STRAIN GAUGE INSTALLATION». *HOW TO POSITION STRAIN GAUGES TO MONITOR BENDING, AXIAL, SHEAR, AND TORSIONAL*.
- [44] I. O. f. Standardization, «Outils de manœuvre pour vis et écrous —Outils dynamométriques à commande,» 2003.
- [45] Pesage.biz, «Capteurs de pesage à jauges de contrainte (Load Cell),» 2024.

Annex :

1. Opérations de collage des jauges

Il existe plusieurs façons de coller des pièces métalliques. Parmi les solutions, la colle rapide se distingue par ses spécificités, notamment par sa vitesse de prise. En parallèle, les colles époxy ainsi que celles conçues pour des températures moyennes sont adaptées à d'autres types d'assemblage, en particulier lorsque la résistance mécanique et la tenue à la chaleur sont importantes. Toutes les comparaisons entre ces colles sont pertinentes, à l'exception des quantités utilisées et des plages de température, qui varient considérablement selon les produits. Afin de décrire les opérations d'assemblage de manière claire, nous avons opté pour une présentation sous forme de légendes accompagnant les dessins. Cette mise en forme, bien que peu académique, permet une meilleure compréhension grâce à sa clarté et sa concision, en particulier lorsqu'il y a de nombreux personnages ou étapes à illustrer.

1ère opération

Pour nettoyer la pièce, vous pouvez utiliser du chlorothène NU ou du fréon TF

Le chlorothène NU est mieux quand on peut s'en servir, car il nettoie bien.

Les chlorés sont très actifs. Le titane et les plastiques réagissent.

Avec les dégraissants chlorés. Le fréon remplace ces produits.

Dégraissez avec des solvants adaptés.

Utilisez des bombes aérosols.



Figure 90 : 1ère opération de collage

2ème opération :

Pour préparer la surface où on va mettre le jauge, il faut la polir avec un papier abrasif spécial (n° 220 ou 320). Cela permet d'enlever les oxydations ou les défauts de la surface du matériau. Appliquez le conditionneur A, puis polissez avec le papier abrasif en gardant la surface mouillée. Nettoyez en passant une compresse de gaze sur la surface traitée. Il faut répéter l'opération. Sur l'aluminium ou l'acier, faites les repères de positionnement du jauge avec un crayon à mine 4H ou la pointe d'un crayon à bille. Mettez à nouveau du conditionneur A, puis frottez avec des cotons-tiges jusqu'à ce que le coton soit propre. Nettoyez à nouveau avec le conditionneur A. Faites une seule passe avec chaque compresse de gaze.

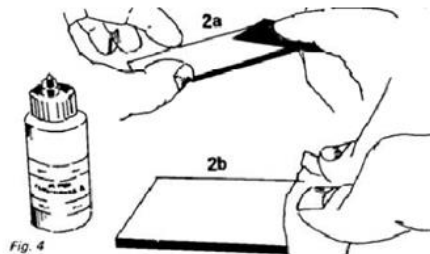


Figure 91 : 2ème opération de collage

3ème opération

Mettez du neutraliseur 5 sur la surface où vous voulez mettre la jauge. Ne pas laisser sécher, nettoyez avec des coton-tiges, ne laissez pas s'évaporer le produit, cela pourrait empêcher la colle de coller efficacement, utilisez les compresses de gaze pour absorber le liquide, utiliser les compresses de gaze pour absorber le neutraliseur 5 en ne faisant qu'une passe jusqu'à obtenir une compresse propre .



Figure 92 : 3ème opération de collage

4^{ème} opération

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

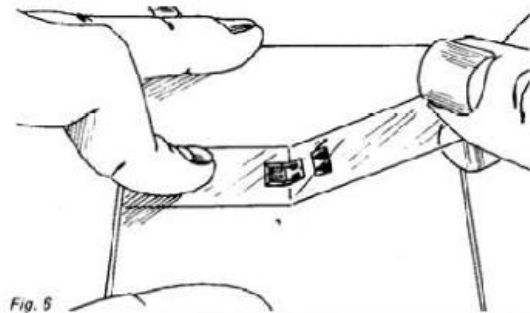


Figure 93 : 4^{ème} opération de collage

5^{ème} opération

Collez la jauge là où il y a des points de repère sur le support. Si les repères ne sont pas alignés, relevez le ruban en le tournant un peu et remplacez la jauge comme avant jusqu'à ce que les repères soient bien alignés. Fixez le ruban sur la structure sans salir la jauge.

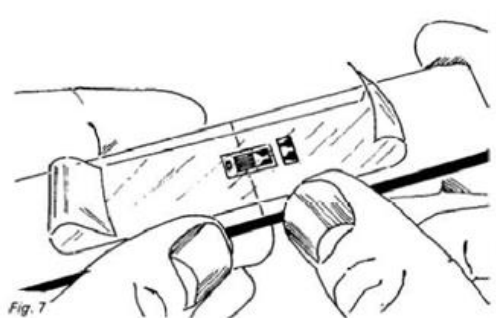


Figure 94 : 5^{ème} opération de collage

6^{ème} opération

Soulevez le ruban d'un côté seulement, sous un angle d'environ 45° par rapport à la surface, jusqu'à ce que la jauge et les cosses du relais soient libérées de la structure (figure 8a), puis fixez le ruban tel qu'il l'est indiqué sur la figure 8b. Dans certains cas,

cette opération peut être difficile en raison du manque de place. Si cela se produit, maintenir le ruban adhésif au niveau de la jauge avec un doigt pendant l'opération d'encollage.

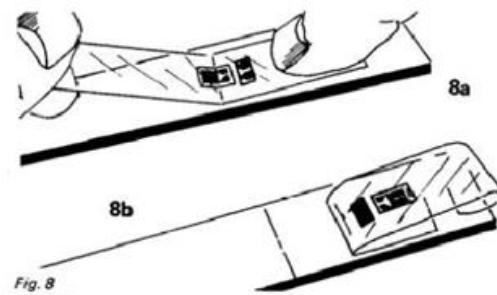


Figure 95 : 6ème opération de collage

7ème opération

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

Sur toute leur surface, sans interruption. Si on enlève le pinceau trop brusquement, il reste trop de catalyseur là où on l'a enlevé. Laisser sécher le catalyseur ce qui dure environ une minute aux températures normales.



Figure 96 : 7ème opération de collage

8ème opération

Déposer une goutte unique de colle M200 « certifiée » à la limite du contact entre le ruban adhésif et la structure. C'est-à-dire que la colle n'est pas encore en contact avec la jauge ni avec la plaquette de cosses-relais.



Figure 97 : 8ème opération de collage

9ème opération

Collez le ruban adhésif en bas de la structure. Utilisez un tampon de gaze pour appliquer la colle en appuyant doucement pour qu'elle pénètre partout où vous voulez. Déplacez la gaze d'un coup sec et précis.

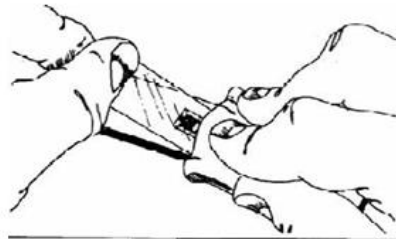


Figure 98 : 9ème opération de collage

10ème opération

Appuyez fort avec votre pouce sur la jauge pendant une minute. La pression du pouce fait réagir les polymères rapidement. Si le pouce reste collé, on saura que la colle est bonne, mais que l'on n'a pas bien collé l'ensemble, comme recommandé.

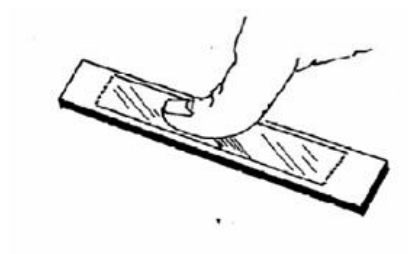


Figure 99 : 10ème opération de collage

11ème opération

La jauge et la plaquette sont collées. On attend deux minutes, après quoi, on Enlevez le ruban adhésif. Pour le retirer, penchez-le sous un angle de 180 degrés. Cela vous permettra de séparer le ruban provisoire de la jauge et de la plaquette de cosses-relais. Vous n'avez pas besoin de retirer le ruban adhésif au bout de deux minutes. Si on doit faire autre chose, par exemple chauffer le fer à souder, préparer les fils

Attendez le dernier moment pour les fils, etc. Une jauge n'a rien à gagner, mais tout à perdre si elle reste nue et exposée à l'humidité et aux poussières. La jauge est prête : il faut la câbler, la nettoyer, la protéger et la contrôler.

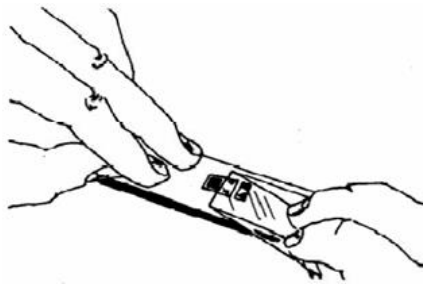


Figure 100 : 11ème opération de collage

2.1 Hypothèse en RDM

La résistance des matériaux a trois objectifs principaux :

La connaissance des caractéristiques mécaniques des matériaux. (Comportement sous l'effet d'une action mécanique) l'étude de la résistance des pièces mécaniques. (Résistance ou rupture) [3]

L'étude de la déformation des pièces mécaniques. Ces études permettent de choisir le matériau et les dimensions d'une pièce mécanique en fonction des conditions de déformation et de résistance requises. [3]

Définition et hypothèses

Homogénéité : On admet que les matériaux ont les mêmes propriétés mécaniques en tous points. L'isotropie On admet que les matériaux ont, en un même point, les mêmes propriétés mécaniques dans toutes les directions. [3]

L'isotropie : est vérifiée pour les aciers non fibrés (les aciers laminés et forgés ne sont pas isotropes), Elle n'est pas vérifiée pour les matériaux fibrés (bois, matériaux composites...) [3]

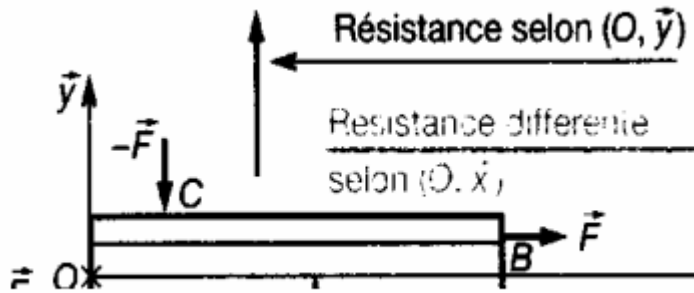


Figure 101 : Matériaux anisotropes

Contraintes (unité : MPa) : Elles caractérisent les actions mécaniques de cohésion qui existent entre les grains de matière. [3]

Déformations : Elles résultent et varient avec les charges appliquées sur les objets, Elles sont mises en évidence par la variation des dimensions, et peuvent être élastiques ou plastiques. [3]

Elasticité : Elle caractérise l'aptitude qu'a un matériau à reprendre sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé. Un ressort chargé normalement a un comportement élastique. [3]

Plasticité : Un matériau qui ne reprend pas sa forme et ses dimensions initiales après avoir été déformé est dit plastique. La pâte à modeler a un comportement plastique. [3]

Hypothèses sur l'influence des déformations : Dans le domaine élastique, les déformations sont très faibles, elles ne modifient pas les actions mécaniques calculées par la statique (hypothèse des solides indéformables). [3]

Hypothèse de Navier-Bernoulli : Les sections planes et droites (normales à la ligne moyenne) avant déformation, restent planes et droites après déformation (normales à ligne moyenne déformée). [3]

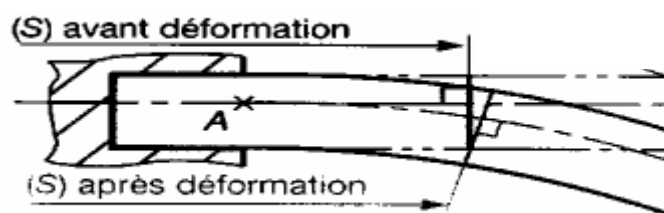


Figure 102 : La poutre après et avans la déformation

Hypothèse de Barré de Saint-Venant : Dans une section droite (S) éloignée de la zone où les charges sont appliquées ($l > d$), la répartition des déformations et des contraintes ne dépend que des éléments de réduction du torseur des actions mécaniques appliquées. [3]

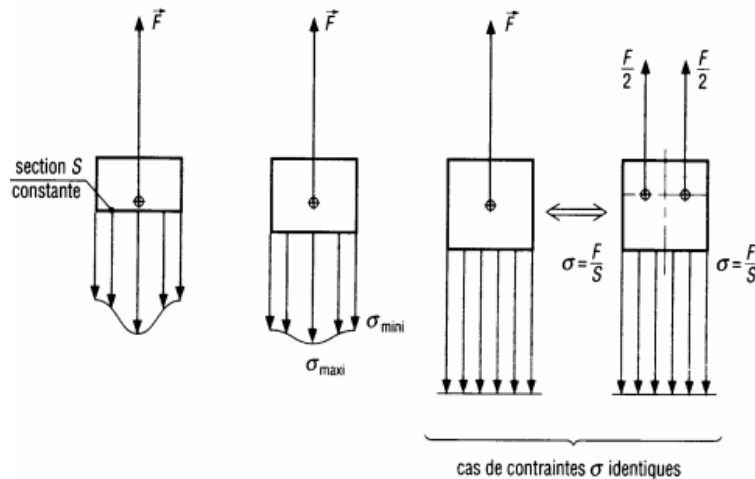


Figure 103: Distribution du contraintes sur une poutre

Superposition des déformations : La déformation en un point M de la poutre due à plusieurs A.M. est égale à la somme des déformations dues à chaque A.M. prises isolément. [3]

Superposition des contraintes : La contrainte en un point M de la poutre due à plusieurs A.M. est égale à la somme des contraintes dues à chaque A.M. prises isolément. [3]

2.2 Les actions mécaniques

Les actions mécaniques, appliquées en un point, sont des vecteurs glissants. Il est impossible de les remplacer par un système d'actions mécaniques "vectoriellement" équivalent (même résultante et même moment en un point A) car les effets physiques (solllicitations) sont différents. [3]

Le chargement de la poutre se fait dans le plan de symétrie de celle-ci.

Le chargement se fait lentement et régulièrement.

Il n'existe que deux types de chargement, soit une Action Mécanique :

- Localisée (ou concentrée) représentée par un glisseur.

- Répartie représentée par sa densité linéique qL en N/m ou surfacique qs en N/m².

2.3 Définition des liaisons poutre/bâti

Il n'existe technologiquement que quatre appuis principaux : [3]

TYPE D'APPUI	RESULTANTE	MOMENT
Un appui simple d'axe $\vec{Y}$ ou $\vec{Z}$	Perpendiculaire à $\vec{X}$	Nul
Un pivot d'axe $\vec{Y}$ ou $\vec{Z}$	Appartenant à $(\vec{X}, \vec{Y})$ ou $(\vec{Y}, \vec{Z})$	Sur $\vec{X}$ (ou nul si problème plan)
Une rotule	Appartenant à $(\vec{X}, \vec{Y})$ ou $(\vec{Y}, \vec{Z})$	Nul
Un encastrement	Quelconque	Quelconque

Table 16: Tableau d'appui

2.4 Les forces extérieures

Plan de symétrie

Les forces extérieures seront situées dans le plan de symétrie de la poutre ou alors disposées symétriquement par rapport à ce plan. [3]

Types d'actions mécaniques extérieures

Deux types d'actions mécaniques peuvent s'exercer sur la poutre : [3]

- Charges concentrées ($\vec{F}_1$ ou moment $\vec{M}_c$)
- Charges réparties p sur DE. (Exprimées en N/m)

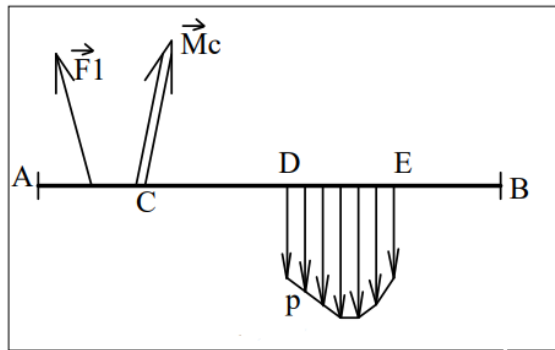


Figure 104: Types d'actions

3.1 Les déformations

Les déformations étant petites devant les dimensions de la poutre, les actions s'exerçant sur celle-ci seront calculées à partir du principe fondamental de la statique. Les supports des forces seront eux considérés comme constants. [3]

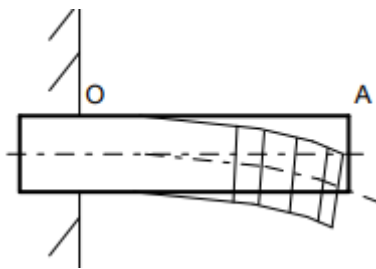


Figure 105 : Déformation d'une poutre

- ❖ **Navier & Bernoulli** : Les sections planes normales aux fibres avant déformation demeurent planes et normales aux fibres après déformation. [3]
- ❖ **Barré de St Venan** : Les résultats obtenus par la RDM ne s'appliquent valablement qu'à une distance suffisamment éloignée de la région d'application des efforts concentrés. [3]

4.1 Torseur des efforts de cohésion :

Définition :

Soit une poutre (E) en équilibre sous l'action de n actions extérieures. On associe à cette poutre un repère R (x, y, z) dont l'axe x coïncide avec la ligne moyenne de la poutre. Coupons la poutre (E) par un plan (P) orthogonal à sa ligne moyenne, situé à l'abscisse x. On définit ainsi deux portions de poutre (E1) et (E2). [3]

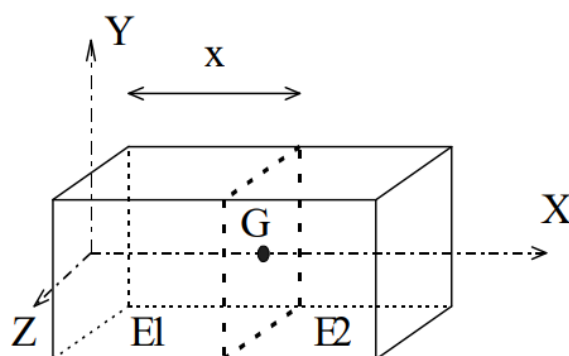


Figure 106 : Section d'un solide

(E) étant en équilibre, on peut écrire :

$$\{\bar{E} \rightarrow E\} = \{0\} \dots\dots\dots(69)$$

(E1) étant en équilibre, on peut écrire :

$$\{\bar{E} \rightarrow E1\} + \{E2 \rightarrow E1\} = \{0\} \dots\dots\dots(70)$$

(E2) étant en équilibre, on peut écrire :

$$\{\bar{E} \rightarrow E2\} + \{E1 \rightarrow E2\} = \{0\} \dots\dots\dots(71)$$

On en déduit :

$$\{E2 \rightarrow E1\} = -\{\bar{E} \rightarrow E1\} = \{\bar{E} \rightarrow E2\} \dots\dots\dots(72)$$

$\{E2 \rightarrow E1\}$ est le torseur qui traduit l'action de contact de (E2) sur (E1). Cette action est due aux efforts de cohésion qui permettent à la poutre de ne pas se "disloquer" sous l'effet d'actions extérieures. [3]

La RDM vise en particulier à vérifier qu'en aucun point de la poutre les efforts de cohésion à "transmettre" ne soient supérieurs aux capacités du matériau.

On note :

$$\{\text{Cohésion}\} = \{\bar{E} \rightarrow E2\} = -\{\bar{E} \rightarrow E1\} [3] \dots\dots\dots(73)$$

4.2 Composantes du torseur de cohésion :

Dans le torseur de cohésion, on peut faire apparaître la résultante et le moment qui dépendent de la position de la section (x). [3]

$$\{\text{cohésion}\} = \left\{ \begin{matrix} \bar{R}(x) \\ \bar{M}(x) \end{matrix} \right\}_G \dots\dots\dots(74)$$

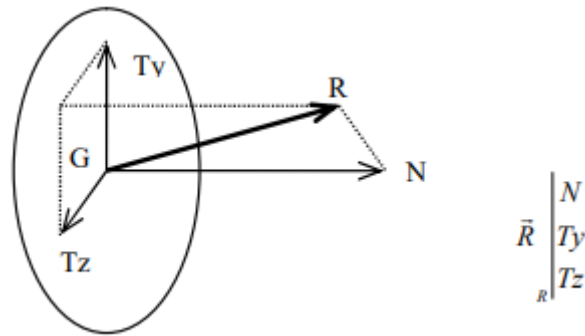


Figure 107: Sommes des forces et contraintes

N : effort normal, projection de R sur la normale extérieure (x).

- Ty et Tz : efforts tranchants, projections de R sur le plan de section droite Le moment résultant

De la même manière, on retrouve pour les moments, 3 composantes :

- MT : moment de torsion, projection du moment sur la normale extérieure.
- Mfy et Mfz : moments de flexion, projection du moment sur le plan de section droite. [3]

Soit :

$$\vec{M}_G = \begin{pmatrix} M_t \\ M_{fy} \\ M_{fz} \end{pmatrix} \dots\dots\dots(75)$$

Toutes ces composantes N, Ty, Tz, MT, Mfy et Mfz dépendent de la position de la section droit (x). On peut donc représenter leurs évolutions à l'aide de diagrammes. Les sollicitations Suivant les éléments de réduction non-nuls du torseur de cohésion (N, Ty, Tz, MT, Mfy et Mfz) on peut alors identifier le type de sollicitation que subit la poutre, à savoir : [3]

Composantes		Sollicitation
N	>0	Extension (traction)
	<0	Compression
Ty		Cisaillement
Tz		Cisaillement
MT		Torsion
Mfy		Flexion
Mfz		Flexion

Table 17:Tableau de sollicitation

5.1 Définition de contrainte :

D'un point de vue physique, les contraintes peuvent être vues comme des efforts internes infinitésimaux. Ce sont des efforts de cohésion qui vont s'opposer aux déformations du solide pour garder la cohésion et l'intégrité du solide. Il est possible de déterminer ces efforts de cohésion en réalisant une coupe fictive du solide étudié.

[8]

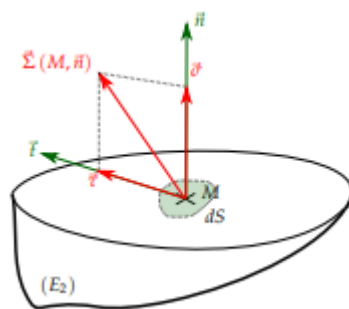


Figure108 : Contraintes de la solide

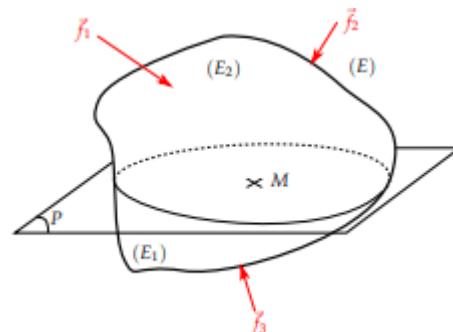


Figure109 : Forces appliqué sur un solide

5.1.1 Notion des contrainte – Principe de détermination :

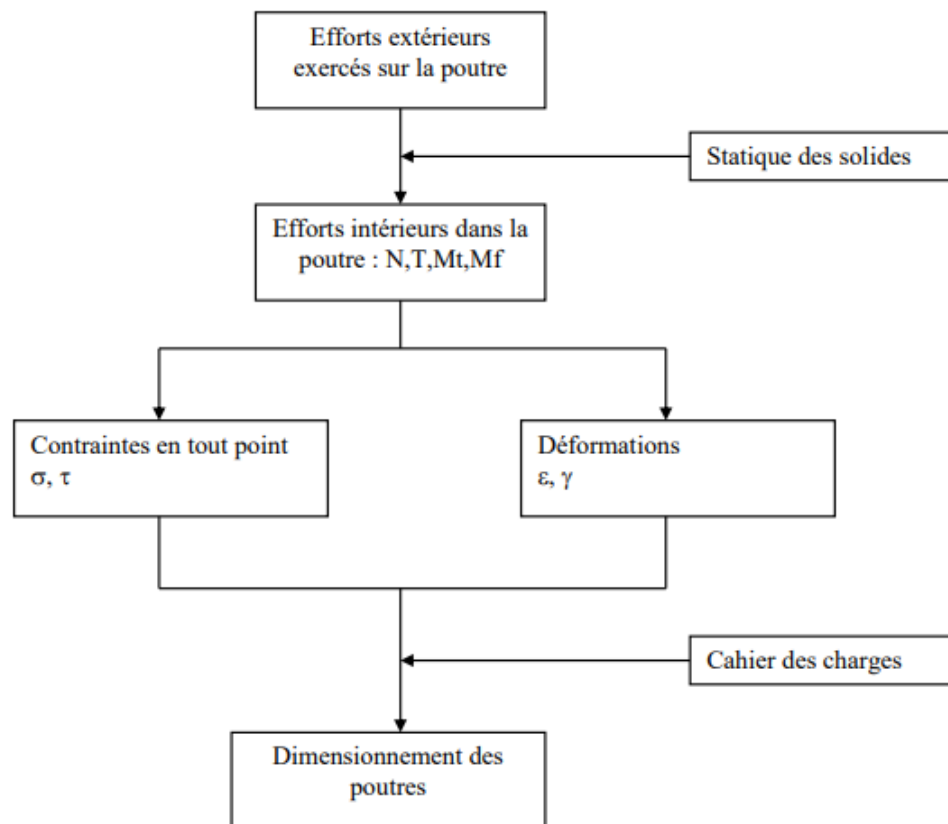


Figure 110:Notion des contrainte – Principe de détermination

Contrainte en un point M d'une section S

La contrainte caractérise les liaisons mécaniques internes au matériau représenté par le torseur de cohésion $_{GS}\{T_{coh}\}_R$ sur chaque élément de surface dS de la section S quelconque. On peut choisir dS aussi petit que l'on veut.

Unité : le N/mm² soit le Mpa. [3]

Définition

La contrainte $\vec{C}$ est le rapport entre l'action mécanique $d\vec{F}$, qui s'exerce sur l'élément de surface dS de la section S , sur la surface dS . [3]

$$\vec{C} = \frac{d\vec{F}}{dS} = \sigma \vec{x} + T_y \vec{y} + T_z \vec{z} \dots\dots\dots(76)$$

Tel que : σ : *contrainte normale* et T_y, T_z : *contrainte tangentielle*.

5.1.2 Théorème de Cauchy : équilibre des vecteurs contraintes :

Supposons un cube infinitésimal de matière de longueur dl tel que le montre la figure ci-dessous. [8]

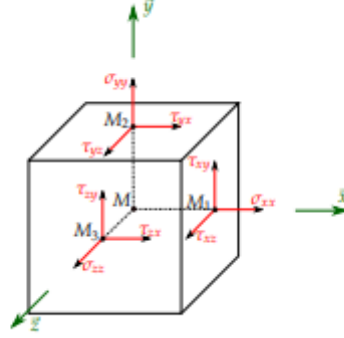


Figure 111 : Représentation des contraintes internes d'un solide

Les forces appliquées sur les facettes de normales $\vec{e}_1, \vec{e}_2$ et $\vec{e}_3$ sont :

- $\vec{F}_1 = \sum(M_1 + \vec{e}_1)dl^2 = (\sigma_{11}\vec{e}_1 + T_{12}\vec{e}_2 + T_{13}\vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $\vec{e}_1$.
- $\vec{F}_2 = \sum(M_2 + \vec{e}_2)dl^2 = (\sigma_{21}\vec{e}_1 + T_{22}\vec{e}_2 + T_{23}\vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $\vec{e}_2$.
- $\vec{F}_3 = \sum(M_3 + \vec{e}_3)dl^2 = (\sigma_{31}\vec{e}_1 + T_{32}\vec{e}_2 + T_{33}\vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $\vec{e}_3$. [8]

De même, les forces appliquées sur les facettes $-\vec{e}_1, -\vec{e}_2$ et $-\vec{e}_3$ sont :

- $\vec{F}_{-1} = \sum(M_1 + -\vec{e}_1)dl^2 = (\sigma_{-1-1} - \vec{e}_1 + T_{-1-2} - \vec{e}_2 + T_{-1-3} - \vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $-\vec{e}_1$.
- $\vec{F}_{-2} = \sum(M_2 + -\vec{e}_2)dl^2 = (\sigma_{-2-1} - \vec{e}_1 + T_{-2-2} - \vec{e}_2 + T_{-2-3} - \vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $-\vec{e}_2$.
- $\vec{F}_{-3} = \sum(M_3 + -\vec{e}_3)dl^2 = (\sigma_{-3-1} - \vec{e}_1 + T_{-3-2} - \vec{e}_2 + T_{-3-3} - \vec{e}_3)dl^2$ Sur la facette de normale $-\vec{e}_3$. [8]

On a : $dl^2 = dS$ donc il possible écrit :

$$\frac{d\vec{F}}{dS} = \sigma\vec{x} + T_y\vec{y} + T_z\vec{z}.....(77)$$

5.2 Contrainte normale :

Considérons un torseur de cohésion $_{GS}\{T_{coh}\}_R$ dont la résultante $\vec{R}$ n'a qu'une composante N sur $\vec{X}$. [3]

$$\vec{R} = N\vec{x} = \sum_S d\vec{F} = \sum_S \vec{C}dS = \sum_S \sigma\vec{x}dS \Rightarrow N = \sum_S \sigma dS \dots \dots \dots (78)$$

Si nous supposons une répartition constante de la contrainte σ sur S

$$N = \sum_S \sigma dS = \sigma \sum_S dS = \sigma S \Rightarrow \sigma = \frac{N}{S} \dots \dots \dots (79)$$

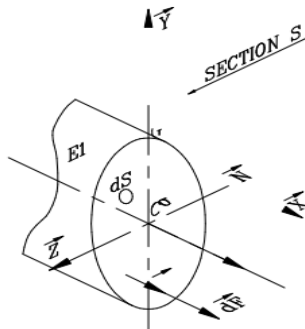


Figure112 : Distribution du contraintes normales

5.3 Contraintes tangentiels

Considérons un torseur de cohésion $_{GS}\{T_{coh}\}_R$ dont la résultante $\vec{R}$ n'a qu'une composante Ty sur $\vec{Y}$. [3]

$$\vec{R} = T_z\vec{Z} = \sum_S d\vec{F} = \sum_S \vec{C}dS = \sum_S \tau_z\vec{Z}dS \Rightarrow T_z = \sum_S \tau_z dS \dots \dots \dots (80)$$

Si nous supposons une répartition constante de la contrainte τ_y sur S

$$T_z = \sum_S \tau_z dS = \tau_z \sum_S dS = \tau_z S \Rightarrow \tau_z = \frac{T_z}{S} \dots \dots \dots (81)$$

$$\text{de m\^eme } \tau_y = \frac{T_y}{S} \dots \dots \dots (82)$$

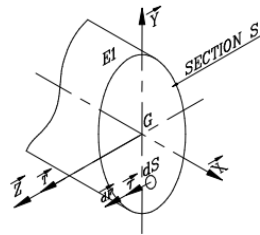


Figure113 : Distribution de la contrainte tangentielle

6. Les sollicitations :

6.1 Traction :

Une poutre est sollicitée à la traction simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à l'allonger. [3]

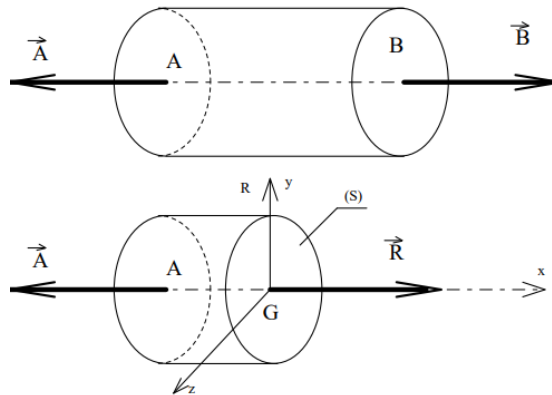


Figure 114 : L'influence de la traction sur un solide

Les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment par :

$$\{cohésion\}_G = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \quad avec \ N > 0$$

Essai de Traction :

Une éprouvette en acier est sollicitée à l'extension par une machine d'essai, qui permet de déterminer l'allongement de l'éprouvette en fonction de l'effort qui lui est appliqué. [3]

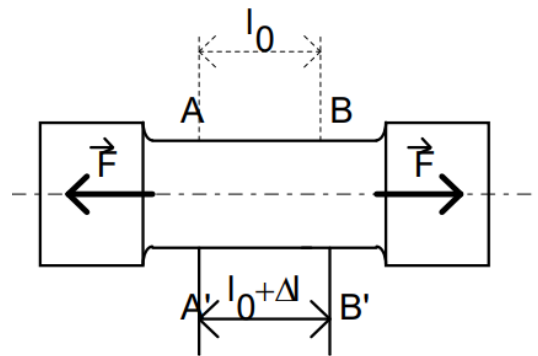


Figure115 :Forces appliquées lors d'un essai de traction

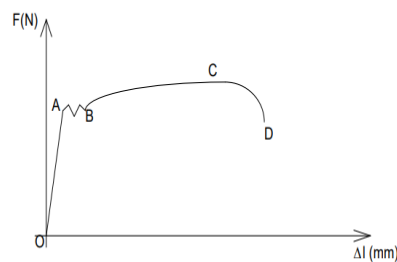


Figure 116 : Graphe d'épreuve de l'essai de traction

Déformations élastiques :

La propriété constatée ci-dessus a permis pour différents matériaux d'établir la relation :

$$\frac{N}{S} = E \frac{\Delta l}{l} \dots\dots\dots (83)$$

E est une caractéristique du matériau appelée module d'élasticité longitudinal ou module de Young. [3]

Contraintes :

Soit (E1) le tronçon de la poutre (E) issu de sa coupure par un plan orthogonal à sa ligne moyenne Le tronçon (E1) est en équilibre sous l'action de F et des efforts de cohésion dans la section droite (S). Soit S l'aire de la section droite (S). On définit la contrainte σ dans la section droite (S) par la relation [3] [8] [6]:

$$\sigma = \frac{N}{S} \dots\dots\dots(84)$$

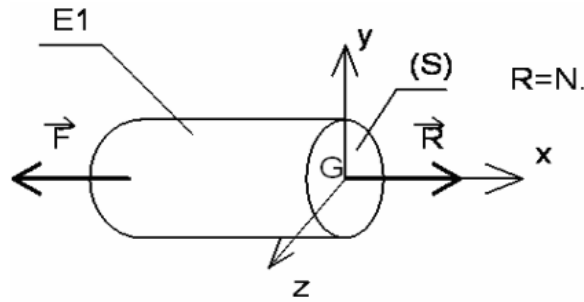


Figure 117: Contrainte de traction

Loi de HOOKE :

Nous avons déjà vu que $\sigma = \frac{N}{S}$ et que $\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$ on peut en déduire que :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \epsilon \dots\dots\dots(85)$$

$\frac{\Delta l}{l}$ Est l'allongement élastique unitaire suivant x, il généralement noté ϵ . [3] [5] [8] [6]

6.2 Compression :

Une poutre est sollicitée à la compression simple lorsqu'elle est soumise à deux forces directement opposées, appliquées au centre de surface des sections extrêmes et qui tendent à la raccourcir. [8] [5] [3]

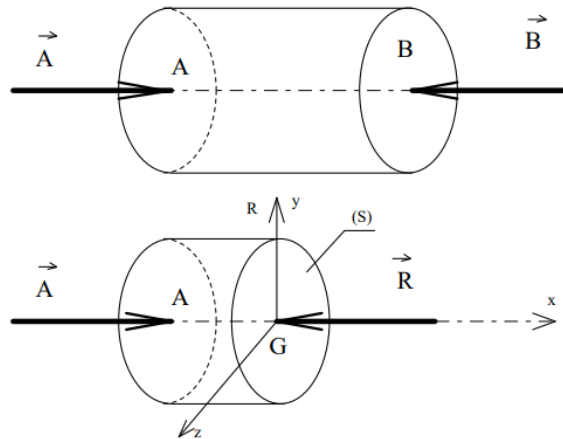


Figure 118: Forces appliquées lors d'un essai de compression

Les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment par :

$$\{cohésion\} = \begin{Bmatrix} N & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_G \quad \text{avec } N < 0$$

$(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$

Essai de compression :

Une éprouvette semblable à celle utilisée pour l'essai d'extension en acier est sollicitée à la compression par une machine d'essai. [8] [3] [5]

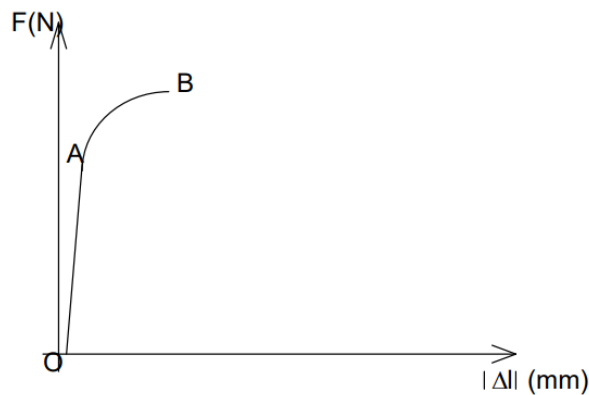


Figure 119 : Graphe de l'essai de compression

Déformations élastiques :

La propriété constatée ci-dessus a permis pour différents matériaux d'établir la relation :

$$\frac{F}{S} = -E \frac{\Delta l}{l} \dots \dots \dots (86)$$

avec $\Delta l < 0$ [3]

Contraintes :

On définit la contrainte σ dans la section droite (S) par la relation :

$$\sigma = \frac{N}{S} \dots \dots \dots (87)$$

avec $\sigma < 0$ car $N < 0$ [3] [5]

Loi de HOOKE :

Nous avons déjà vu que $\sigma = \frac{N}{S}$ et que $\sigma = \frac{F}{S} = E \frac{\Delta l}{l}$ on peut en déduire que :

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = E \cdot \epsilon. [8] [3] [6] \dots \dots \dots (88)$$

6.3 Cisaillement :

Une poutre subit une sollicitation de cisaillement simple lorsqu'elle est soumise à deux systèmes d'action de liaison qui se réduisent dans un plan (P) perpendiculaire à la ligne moyenne à deux forces directement opposées. [8] [3]

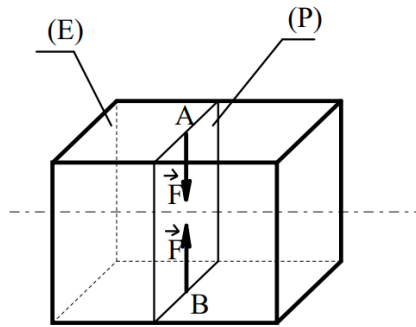


Figure 120 : Les forces appliquée en essai de cisaillement

Sous l'action de ces deux forces la poutre tend à se séparer en deux tronçons E1 et E2 glissant l'un par rapport à l'autre dans le plan de section droite (P). [3]

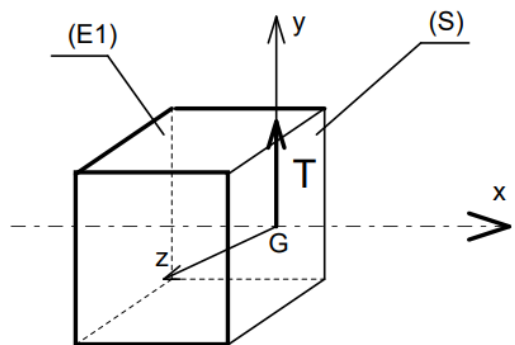


Figure121 : La direction de la contrainte de cisaillement selon les axes x, y et z

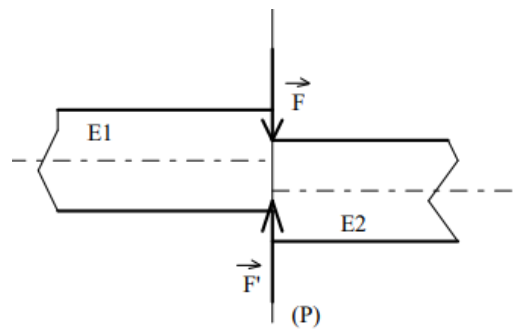


Figure122 : L'influence du cisaillement sur un solide

Les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment par :

$$\{cohésion\} = \begin{Bmatrix} 0 \\ T_y \\ T_z \\ 0 \end{Bmatrix}_G \quad (\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$$

- On peut toujours remplacer les composantes d'effort tranchant (T_y et T_z) par une unique composante T en réalisant un changement de repère.
- Le cisaillement pur n'existe pas, il subsiste toujours de la flexion. [8] [3]

Essai de cisaillement :

Il est physiquement impossible de réaliser du cisaillement pur au sens de la définition précédente. Les essais et résultats qui suivent permettent toutefois de rendre compte des actions tangentielle dans une section droite et serviront ainsi dans le calcul de pièces soumises au cisaillement. On se gardera cependant le droit d'adopter des coefficients de sécurités majorés pour tenir compte de l'imperfection de la modélisation. Considérons une poutre (E) parfaitement encastree et appliquons-lui un effort de cisaillement $\vec{F}$ uniformément réparti dans le plan (P) de la section droite (S) distante de Δx du plan (S0) d'encastrement. On se rapproche des conditions du cisaillement réel, à condition de vérifier que $\Delta x \ll$. [3]

Si l'on isole (E1), on trouve alors le torseur de cohésion suivant :

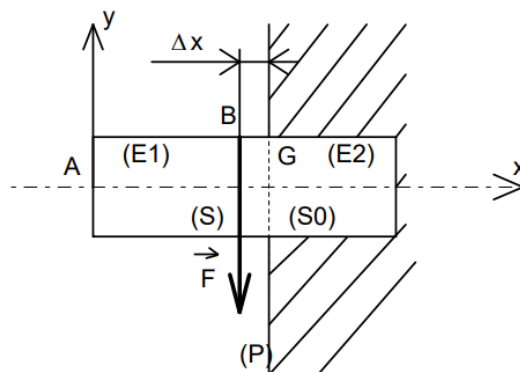


Figure124 : Contrainte de cisaillement

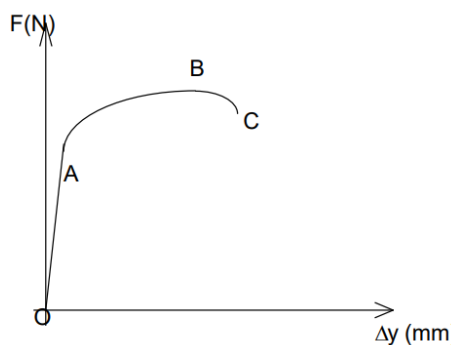


Figure123 : Graphe de l'essai de cisaillement

$$\{cohésion\} = \underset{G}{\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ -F & 0 \\ 0 & F \cdot \Delta x \end{pmatrix}}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \dots\dots\dots(89)$$

Lorsque Δx tend vers 0, on retrouve alors le torseur de cohésion du cisaillement pur.

Déformations élastiques :

L'essai précédent a permis pour différents matériaux d'établir la relation :

$$\frac{F}{S} = G \frac{\Delta y}{\Delta x} \dots\dots\dots(90)$$

G est une caractéristique appelée module d'élasticité transversal ou module de Coulomb. [8] [3]

Contraintes :

On définit la contrainte τ dans une section droite (S) par la relation :

$$\tau = \frac{T}{S} \dots\dots\dots(91)$$

Avec : τ : contrainte tangentielle de cisaillement en MPa (valeur moyenne).

T : effort tranchant en Newton. [3] [3]

Relation entre contrainte et déformation :

Nous avons déjà vu que $\tau = \frac{T}{S}$ et que $\frac{F}{S} = G \frac{\Delta y}{\Delta x}$ et nous savons que $F=T$. On en déduit que :

$$\tau = G \cdot \gamma \dots\dots\dots(92)$$

$$\gamma = \frac{\Delta y}{\Delta x} \dots\dots\dots(93)$$

Est appelé glissement relatif. [3] [8]

6.4 Torsion :

Une poutre est sollicitée en torsion simple lorsqu'elle est soumise à ses deux extrémités à des liaisons dont les torseurs associés se réduisent à deux torseurs couples opposés dont les moments sont parallèles à l'axe du cylindre. [3]

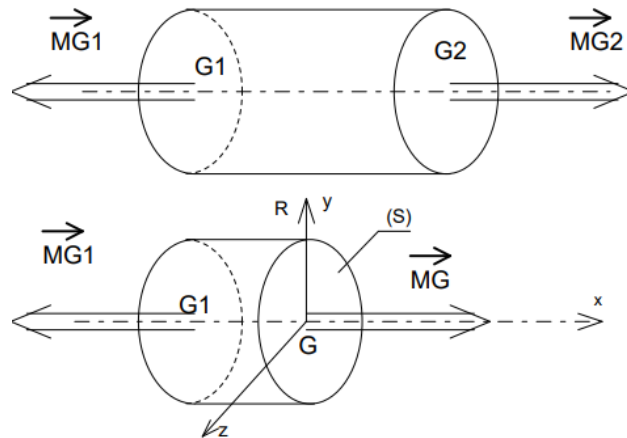


Figure 125 : Équilibre des couples de torsion et efforts internes

Les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment par :

$$\{cohésion\} = \begin{Bmatrix} 0 & M_t \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{Bmatrix}_G \quad \dots\dots\dots(94)$$

$(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$

Essai de torsion :

Un dispositif permet d'effectuer un essai de torsion sur une poutre encastrée à son extrémité G1 et soumise à un torseur couple à son extrémité G2. Cette machine permet de tracer le graphe du moment appliqué en G2 en fonction de l'angle de rotation d'une section droite. [3]

On note lors de l'essai que, pour une même valeur du moment, l'angle α croît de façon linéaire avec x, l'abscisse de la section droite étudiée : $\alpha = k.x$. [8] [3]

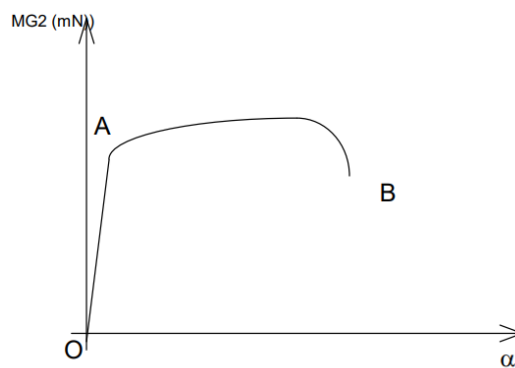


Figure126 : Graphe d'essai de torsion

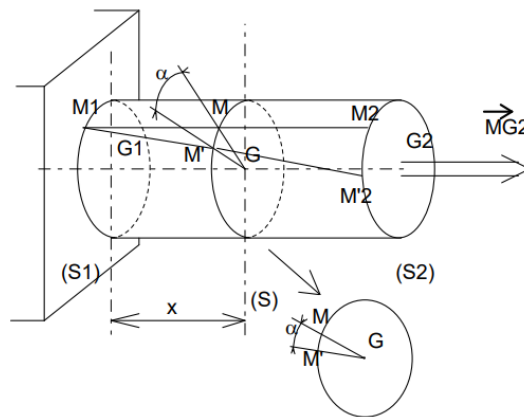


Figure127 : Schéma de l'essai de torsion sur une poutre sollicitation et paramètres géométriques

Déformations élastiques :

La propriété constatée ci-dessus a permis d'établir la relation :

$$\alpha = \frac{M_t \cdot x}{G \cdot I_0} \dots\dots\dots(95)$$

Unités : M_t moment de torsion en N.mm.

G module d'élasticité transversal en MPa.

α En radian.

I_0 moment quadratique polaire de la section (S) en mm⁴.

En définissant l'angle unitaire de torsion par : $\theta = \alpha / x$ (exprimé en rad/mm), notre relation devient alors : [3]

$$M_t = G \cdot \theta \cdot I_0 \dots\dots\dots(96)$$

Contraintes :

Soit M un point de la section droite (S) de la poutre située à une distance ρ du centre G de la section. On définit la contrainte de torsion τ en M par la relation : [3]

$$\tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho}\right)} \dots\dots\dots(97)$$

Avec : τ contrainte tangentielle en MPa.

M_t moment de torsion en N.mm.

I_0 moment quadratique polaire de la section (S) en mm⁴.

Contrairement aux phénomènes étudiés jusqu'à maintenant, la contrainte varie en fonction du point choisi dans une section droite. Plus ce point est éloigné du centre de la section, plus la contrainte y sera importante. La contrainte est maximale pour

$$\rho = \rho_{max} \text{ soit } \tau_M = \frac{M_t}{\left(\frac{I_0}{\rho_{max}}\right)} [3] \dots \dots \dots (98)$$

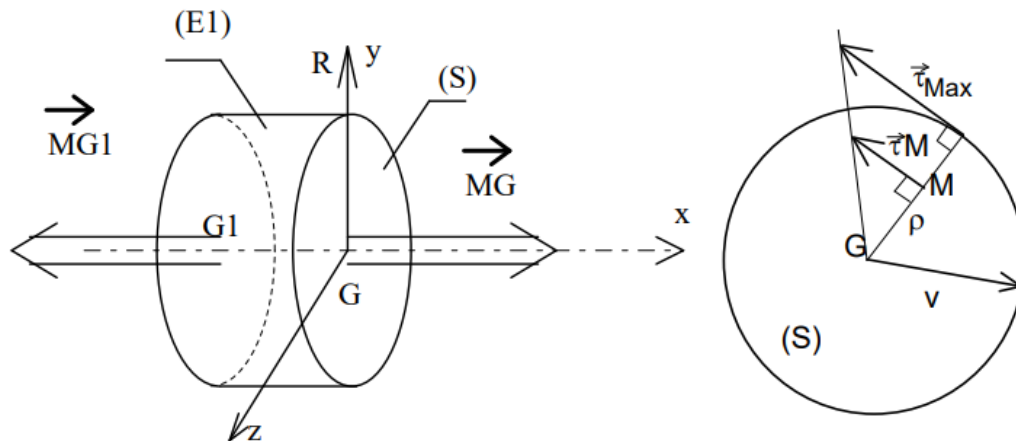


Figure 128 : Distribution des contraintes de torsion dans une section droite (S)

6.5 Flexion :

Il existe plusieurs types de flexions (pure, plane, déviée). Nous limiterons notre étude au cas de la flexion plane simple. [3]

Hypothèses :

En plus des hypothèses déjà énoncées au début du cours de RDM, la flexion plane simple nous amène à supposer que :

- la ligne moyenne de la poutre est rectiligne. - la section droite de la poutre est rectiligne.
- la poutre admet un plan de symétrie longitudinal.
- toutes les forces appliquées à la poutre sont disposées perpendiculairement à la ligne moyenne et dans le plan de symétrie longitudinal (ou symétriquement par rapport à celui-ci).

Les forces appliquées sont soit concentrées en un point, soit réparties suivant une loi déterminée. [8] [3]

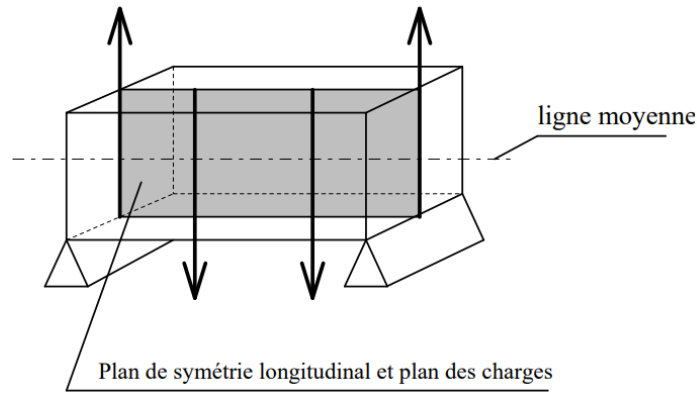


Figure 129 : Représentation schématique des hypothèses de la flexion plane simple

Définition

Une poutre est sollicitée en flexion plane simple lorsque le système des forces extérieures se réduit à un système coplanaire et que toutes les forces sont perpendiculaires à la fibre moyenne. [3] [8]

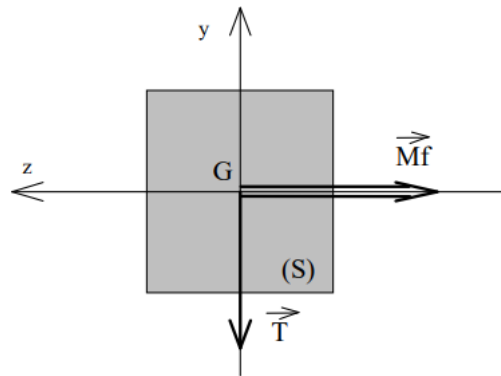


Figure 130 : Torseur des efforts de cohésion en flexion plane

Les éléments de réduction en G du torseur des efforts de cohésion s'expriment par :

$$\{cohésion\} = \begin{Bmatrix} 0 & 0 \\ T_y & 0 \\ 0 & Mf_z \end{Bmatrix}_{(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})} \dots\dots\dots(99)$$

Essai de flexion (domaine élastique)

Un dispositif représenté ci-dessous permet d'effectuer un essai de flexion plane simple sur une poutre reposant sur deux appuis A et B et soumise en C à une force $\vec{F}$.

Un comparateur placé en D permet de mesurer la flèche lorsque F varie. [3] [8]

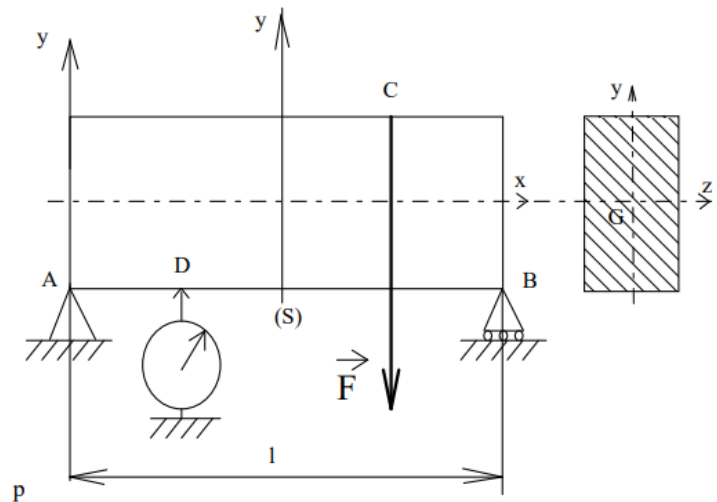


Figure 131 : Schéma de l'essai de flexion plane simple

Constatations [3] :

- La flèche est proportionnelle à l'effort F appliqué et ceci quel que soit le point D choisi.
- Pour une même valeur de F , la flèche est maximum lorsque D est au milieu de la poutre.
- On observe, en effectuant l'essai avec différentes poutres, que la flèche en D est inversement proportionnelle au moment quadratique IG_z de la section.
- Les fibres longitudinales situées au-dessus de la ligne moyenne se raccourcissent et celles situées en dessous de la ligne moyenne s'allongent.
- Les fibres appartenant au plan (G,x,z) ne changent pas de longueur.
- Les allongements et raccourcissement relatifs ($\Delta l/l$) sont proportionnels à la distance de la fibre considérée au plan (G,x,z) .
- Les sections planes normales aux fibres restent planes et normales aux fibres après déformation.

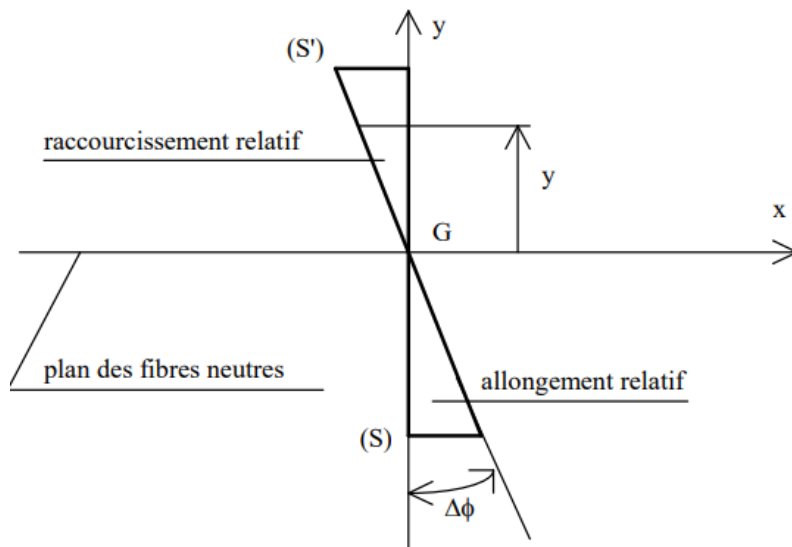


Figure 132 : Distribution des déformations en flexion plane : allongement et raccourcissement relatif des fibres

Contraintes :

Dans le cas de la flexion plane simple, les contraintes se réduisent essentiellement à des contraintes normales σ . Les contraintes de cisaillement τ sont négligeables. La contrainte normale σ en un point M d'une section droite (s) est proportionnelle à la distance y entre ce point et le plan moyen passant par G. [8] [3]

$$\sigma = \frac{Mf}{I_z} \cdot y \dots\dots\dots(100)$$

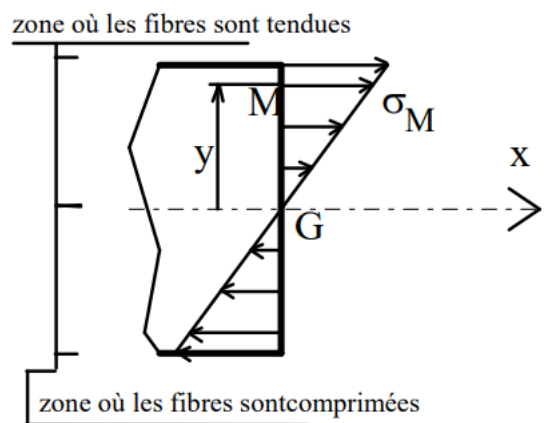


Figure 133: Distribution de la contrainte normale en fonction de la fibre neutre lors de la flexion plane

Élasticité plane :

L'élasticité plane concerne les corps dont la géométrie et les déformations peuvent être décrites de façon bi-dimensionnelle dans un plan de symétrie. Cela concerne par

exemple le cas des plaques. Si ce plan de symétrie est $(O, \vec{x}, \vec{y})$ alors la matrice des contraintes en élasticité plane s'écrit alors :

$$\overline{\overline{\Sigma(M)}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} [8] \dots\dots\dots(101)$$

Transformation des contraintes :

La transformation des contraintes consiste à exprimer les composantes des efforts internes (contraintes normales et de cisaillement) dans un nouveau repère d'axes (n, t) orienté selon une direction donnée par un angle θ , par rapport au repère global (x, y) . [36]

La matrice des contraintes dans le système global (x, y) s'écrit :

$$\overline{\overline{\Sigma(M)}} = \overline{\overline{\sigma}} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} \end{bmatrix} [8] [3] \dots\dots\dots(102)$$

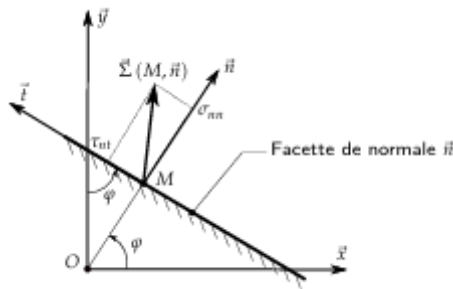


Figure 134 : Transformation des Contraintes dans un Repère Roté

Pour déterminer les contraintes dans un système d'axes orienté à un angle θ (appelé (x', y') ou (n, t)), on applique une transformation par rotation :

$$\overline{\overline{\Sigma(M)}}' = \overline{\overline{\sigma}}' = R \cdot \overline{\overline{\Sigma(M)}} \cdot R^T \text{ Et } R = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \dots\dots\dots(103)$$

est la matrice de rotation .

La matrice des contraintes dans le repère tourné devient :

$$\overline{\overline{\sigma}}' = \begin{bmatrix} \sigma_{x'x'} & \tau_{x'y'} \\ \tau_{y'x'} & \sigma_{y'y'} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(104)$$

Les composantes transformées de la contrainte sont données par les formules

Suivantes :

$$\sigma_{nn} = \sigma_{x'x'} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cos 2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta [8] [36] \dots\dots\dots(105)$$

$$\tau_{nt} = \tau_{x'y'} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \text{ [8] [36].....(106)}$$