الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ Dr. YAHYA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIES
Département du Génie de la Matière

Projet de Fin d'Etudes

Présenté pour l'obtention du diplôme de

Master en Génie Mécanique

Option : Mécatronique

THEME

Conception et réalisation un dispositif de mesure des déformations à base de jauges extensométriques

Proposé et dirigé par

Dr N. AMOURA

Mr S.TCHOUKETCKH KEBIR

Préparé et présenté par

Melle Nacera CHERIET

Mme Mounira ASSAD

Promotion 2015/2016

Remerciements

Nos premiers remerciements vont à ALLAH SOUBHANOUHOU Wa TAALA

Nous tenons à remercier nos encadreurs, Messieurs N. AMOURA et S. TCHOUKETCH KEBIR, pour efforts, disponibilité, et leurs contributions à l'élaboration de ce travail.

Nous souhaitons également remercier tous nos professeurs de la faculté des Sciences et Technologies ainsi que le directeur du Laboratoire LMP2M de l'université de Médéa le Pr Abdellah El Hadj Abdellah, qui a mis à notre disposition les ateliers du laboratoire ainsi que les équipements nécessaires pour la réalisation de ce projet.

Merci à nos parents, à l'ensemble de nos amies ''SAMSHRL'' qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à Mr et Mme ZOUAOUINE. Du centre de formation professionnelle de Ain D'heb, et à la promotion de la spécialité mécatronique 2016.

Et mercis à vous qui allez lire ce mémoire.

Dédicace

Mes chers parents K.SEMANI et O.CHERIET aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement le respect que j'ai toujours eu pour vous.

Je dédie ce mémoire à mes frères HOCINE et MOHAMED et ma sœur HADJER, qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Aussi à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Et puis, un remerciement très chaleureux à mon amie S.BELLAIRACHE.

CHERIET NACERA

Dédicace

Je dédie ce mémoire à : Mes parents : Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien. À tous mes proches de la famille ASSAD et plus particulièrement KAYAT, ZOUHIER, ISMAIL, HAKIM, HICHEM.

Je dédicace ce travail à mon très cher mari AANIBA AHMED.

A tous ceux qui ont contribué près ou de loin pour que ce projet soit possible, je veux dit merci.

ASSAD MOUNIRA

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION GENERALE 14

CHAPITRE 1 : GENERALITE ET NOTIONS 16

1.1 Introduction 16

1.2 La mécanique des milieux continus 16

1.3 Les essais en mécaniques 17

1.4 Forces externes et équilibre mécanique : 17

1.5 Forces internes, forces de surface et transmission des efforts 18

1.6 Raideur, rigidité, état mécanique local 19

1.7 Raideur de l'éprouvette et rigidité du matériau 19

1.8 Les contraintes 20

1.9 Les déformations 21

1.10 Élasticité linéaire 24

1.11 Extensomètre 25

1.12 Extensomètre avec contact 26

1.13 Extensomètre sans contact 28

1.14 Essai de flexion 29

1.15 Flexion pure 29

1.16 Flexion simple 30

1.17 Appuis et charges 31

1.18 Distribution des contraintes normales dans une section droite 33

1.19 Distribution des contraintes tangentielles dans une section droite 36

SOMMAIRE

1.20 Contraintes admissibles 36

1.21 Conclusion 36

2 CHAPITRE 2 : JAUGES DES DEFORMATIONS 37

2.1 Introduction 37

2.2 Principe des jauges 38

2.3 Principe de mesure 39

2.4 Montage 41

2.5 Effet thermique 43

2.6 Le support 44

2.7 La colle 44

2.8 Exemples 45

2.9 Conclusion 49

3 CHAPITRE 3 : CHAINE D'ACQUISITION 50

3.1 Introduction 50

3.2 Définition d'un capteur 50

3.3 Classification des capteurs en fonction 52

3.4 Caractéristiques métrologiques 54

3.5 Domaines d'utilisation des capteurs 58

3.6 La chaine d'acquisition des données 59

3.7 Amplification 60

3.8 Conversion analogique/numérique 60

3.9 La carte d'acquisition 61

3.10 Extrait de la documentation sur l'amplificateur 64

3.11 Conclusion 65

4 CHAPITRE 4 : PARITE PRATIQUE 67

4.1 Introduction 67

4.2 Description 67

4.3 Formules de conversion des déformations en tensions pour les différents montages en pont de Wheatstone à base de jauges extensométriques[8] 69

4.4 Calcule la pression 70

4.5 Calcule des déformations à base de courbe de déformation-pression 71

4.6 Les résultats d'ANSYS 71

4.7 Les caractéristiques du capteur 74

4.8 Conclusion 75

5 CONCLUSION GENERALE 76

6 LES RESULTATS DES ESSAIS 77

ملخص

الهدف من هذا العمل تصميم وإنجاز جهاز اِستشعار الحُمولة استنادًا إلى تقنية أجْهزة قياس التشوهات. الداعم الذي رُكبت فيه أجهزة القياس عبارة عن عارضة من الألمنيوم، بحيثُ نقطة التأثير على أجهزة القياس لا تتعلّق بالمسافة التي وُضعت فيها الأحمال المُراد قياسُها لوجود صفيحة معدنية مثبتة عن طريق برغيين على العارضة، لوضع الأثقال. يتمّ قياس الحُمولة بتحْويل تشوّهات العارضة في مجال مرونتها إلى تيار كهربائي ناتج عن تشوّه أجهزة التشوّه من خلال جسر "ويتستون". صُمم الجهاز على برنامج سوليد وُركس 2013،و تمّت محاكاة تشّوه العارضة الناتج عن تطبيق الحُمولة ببرنامج أنسيس2014. النتائج الرّقمية و التجريبية المتحصّل عليها تُشير إلى علاقة خطية بين عملية التحميل والتيار الكهربائي .

كلمات مفتاحية: **تقنية أجْهزة قياس التشوهات، جسر "ويتستون"**.

Summary

The aim of this work is the conception and realization of a load sensor based on strain gauges. The support of gauges is an aluminium beam, designed to avoid the influence of the load position on strain deformation. The load is measured by a conversion of the gauge strain to a bridge tension, which is amplified before to be displayed. The sensor conception is done with SolidWorks 2013 and the beam simulation under ANSYS 2014. The Experimental and numerical obtained results, show an exact linearity correlation between the applied load and the output tension between the limits of the fixed functional interval.

Keyword: **Strain gauges, Wheatstone bridge**, **acquisition chain**

Résumé

L'objectif de ce travail de fin d'étude est la conception, et la réalisation, d'un capteur de charge à base de jauges extensométriques. Le support élastique est une poutre, en aluminium, conçue de telle sorte que la position de fixation du pont de jauges ne soit pas influencée par la position du point d'application de la charge. Le principe de mesure des charges est basé sur la conversion d'une déformation élastique (de la poutre) en tension de sortie du pont de Wheatstone. La conception est réalisée sous SolidWorks 2013, et la réponse du support à la charge appliquée, simulée sous ANSYS 14. Les résultats obtenus, aussi bien numériques qu'expérimentaux, montrent une très bonne corrélation linéaire entre le chargement est la tension de sortie entre les limites de fonctionnement fixées.

Mot clé : **Jauges extensométriques**, **pont de Wheatstone**, **Chaine d'acquisition**.

LISTE DES SYMBOLES

l : Longueur initiale

Δl : Allongement

K : Raideur

σ: Contrainte

ε : Déformation

ν : Coefficient de Poisson

$\varepsilon_{\parallel}$: Déformations axiales

$\varepsilon_{\perp}$:Déformations radiales

K : Facteur de jauge

R : Résistance électrique

$\mathbf{M_f}$: Moment fléchissant

V : Effort tranchant

σ_{adm} : Contrainte admissible

$\mathbf{R_e}$: Limite d'élasticité

$\mathbf{R_m}$: Résistance à la rupture

E : Module d'Young

I : Moment d'inertie de la section

$\mathbf{V_s}$: Tension de sortie

$\mathbf{V_e}$: Tension d'entrée

ρ : Résistivité du matériau.

K : Facteur de jauge

ΔR : Variation des résistances

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

FIG. 1. 1 PRINCIPE DE L'ACTION ET DE LA REACTION : L'ACTION DE LA PARTIE A SUR LA PARTIE B EST EGALE ET OPPOSEE A L'ACTION DE LA PARTIE B SUR LA PARTIE A [1]. 18

FIG. 1. 2 RAIDEUR DE L'EPROUVETTE ET RIGIDITE DU MATERIAU [1]..... 19

FIG. 1. 3 COURBE CONTRAINT-DEFORMATION POUR UN ALLIAGE METALLIQUE[2]. 20

FIG. 1. 4 TRANSFORMATION GEOMETRIQUE DE PASSAGE ENTRE L'ETAT INITIAL ET L'ETAT FINAL[1]. 22

FIG. 1. 5 DEFORMATIONS NOMINALE ET VRAIE[1]..... 23

FIG. 1. 6 SCHEMA DE PRINCIPE DU FONCTIONNEMENT D'UNE JAUGE DE DEFORMATION[5]..... 27

FIG. 1. 7 JAUGE COLLEE SUR UNE EPROUVETTE (IMAGE CDM)..... 28

FIG. 1. 8 EXTENSOMETRES DIAMETRAL ET LONGITUDINAL SUR UNE EPROUVETTE DE TRACTION (CLICHE CDM)[5]. 28

FIG. 1. 9 UNE BARRE SOUMIS A FLEXION PURE[7]. 30

FIG. 1. 10 UNE FLEXION SIMPLE[7]. 31

FIG. 1. 11 TROIS TYPES D'APPUIS[7]. 31

FIG. 1. 12 CHARGES CONCENTREES[7]. 32

FIG. 1. 13 CHARGES REPARTIES[7]. 33

FIG. 1. 14 UNE BARRE SUR APPUIS SIMPLES[7]. 34

FIG. 1. 15 CONTRAINTES NORMALES[7]. 34

FIG. 1. 16 FIBRE NEUTRE DE LA SECTION[7]. 35

FIG. 2. 1 JAUGE DE CONTRAINTE[8]. 38

FIG. 2. 2 MONTAGE EN PONT DE WHEATSTONE[10]. 41

FIG. 2. 3 MONTAGE QUART DE PONT[9]. 41

FIG. 2. 4 MONTAGE EN DEMI-PONT[8]. 42

FIG. 2. 5 CABLAGE TROIS FILS [12]. 42

FIG. 2. 6 MONTAGE EN PONT COMPLET[8]. 43

FIG. 2. 7 CABLAGE QUATRE FILS[11]. 43

FIG. 2. 8 INSTALLATION D'UNE JAUGE AVEC DE LA COLLE[8]. 45

FIG. 2. 9 VIBRATIONS, ACCELERATIONS[10]. 45

FIG. 2. 10 TORSIONS, COUPLES [10]. 46

FIG. 2. 11 PRESSIONS P[10]. 47

FIG. 2. 12 MESURE DE FLEXION A L'AIDE D'UN PLEIN PONT[8]. 48

FIG. 2. 13 EXEMPLES DE JAUGES A TRAME PELLICULAIRE : (A-C) JAUGES SIMPLES ;(D-F) ROSETTES A DEUX JAUGES ;(G-H) ROSETTES A 3JAUGES[8] 48

FIG. 3. 1 SCHEMA DE LA CHAINE D'ACQUISITION D'UNE MESURE[14]. 50

FIG. 3. 2 CORPS D'EPREUVE[13]. 51

FIG. 3. 3 MASSE SISMIQUE-CAPTEUR DE FORCE[13]. 52

TABLEAU 1. 1QUELQUE PROPRIETES D'UN CAPTEUR ACTIVE[13].....53

TABLEAU 1. 2 QUELQUE PROPRIETES D'UN CAPTEUR PASSIF[13]. 53

FIG. 3. 4 PLAGE DE MESURE[13]. 54

FIG. 3. 5 UNE RELATION FONCTIONNELLE[13]. 55

FIG. 3. 6 LA SENSIBILITE[13]. 56

FIG. 3. 7 LA FIDELITE ET DE LA JUSTESSE[13].....57

FIG. 3. 8 HYSTERESIS[13]. 57

FIG. 3.9 ECHANTILLONNAGES D'UN SIGNAL DE MESURE (A) AVEC UNE FREQUENCE D'ECHANTILLONNAGE PLUS ELEVEE DANS LE CAS (B) QUE LE CAS (C), FE_B>FE_C [14]. 61

FIG. 3. 10 LA CARTE ARDUINO[16]. 62

FIG. 3. 11 CARTE ARDUINO "DUEMILANOVE" ET "UNO" AVEC LAQUELLE NOUS ALLONS TRAVAILLER[16]. 63

FIG. 3. 12 CARTE ARDUINO "MEGA"[16]. 64

FIG. 4. 1 CAPTEUR DES DEFORMATIONS.....67

TABLEAU 4. 1 VALEURS MESUREES. 68

FIG. 4. 2 ETALONNAGE DU CAPTEUR (TENSION AMPLIFIE –TENSION A REPOS). 68

FIG. 4. 3 LINEARITE DES DIFFERENTS MONTAGES EN PONT DE WHEATSTONE[8].....69

FIG. 4. 4 COUBRE DEFORMATIONS _ PRESSION.....70

TABLEAU 4. 2 VALEURS DE DEFORMATION CALCULEES.....71

FIG. 4. 5 MODELE (A4) > MAILLAGE 71

FIG. 4. 6 MODELE (A4) > STRUCTURE STATIQUE (A5) > CHARGES. 72

FIG. 4. 7 GRAPHIQUE : PRESSION EN FONCTION DU TEMPS. 72

FIG. 4. 8MODELE (A4) > STRUCTURE STATIQUE (A5) > SOLUTION (A6) > DEFORMATION ELASTIQUE NORMALE2. 73

FIG. 4. 9 DONNEE TABULAIRE 73

FIG. 4. 10 COURBE DEFORMATION ANSYS-PRESSION.....74

Introduction générale

Les déformations des solides sont une partie très importante dans la mécanique des milieux continus. Ainsi, et pour la connaissance du comportement d'un matériau (aciers, aluminium…), elles permettent de déterminer leurs caractéristiques générales, (élasticité, plasticité, la rupture, et la fiabilité,…), par conséquent l'homme a toujours fait des essais mécaniques (traction, compression, flexion,…).et travaillé sur les matériaux.

Pour étudier ses déformations on utilise une mesure basée sur des jauges de contraintes, elles ne mesurent pas des contraintes, mais des déformations, celles du corps d'épreuve sur lequel elles sont collées. La méthode des jauges est de plus en plus utilisée dans le domaine extensométriques, pour fabriquer les différents types de capteurs qui mesurent la force, la pression, et les déplacements,…

Les applications des jauges de déformation débordent de la seule analyse des contraintes, c'est-à-dire la seule qui donne le module d'Young expérimentalement. En effet toute grandeur physique, en particulier mécanique, dont l'action sur un corps d'épreuve entraîne sa déformation est mesurable par extensométrie : c'est le cas de la pression, de la force, de l'accélération, du couple. La jauge et le corps d'épreuve constituent alors un capteur composite de la grandeur physique agissante.

Le type le plus souvent utilisé étant la jauge résistive. Les jauges résistives sont des capteurs passifs traduisant en variation de résistance leur propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où elles sont collées.

Le rapport contient quatre chapitres. Le premier chapitre contient des définitions simples pour les notions étudiées, le deuxième chapitre a abordé le principe de fonctionnements des jauges, et leur différent type de montages, le troisième chapitre est consacré aux définitions d'une chaine d'acquisition. La partie pratique, qui montre le travail de la réalisation du capteur, est donnée dans le dernier chapitre.

Problématique

La problématique du présent sujet est centrée sur la réalisation du pont et le câblage d'une chaine d'acquisition ; comment réaliser un pont de Wheatstone avec quatre jauges (pont complet) basé sur notre formation universitaire et les conseils des encadreurs.

D'autre part, dans la chaine d'acquisition, un certain nombre de possibilités de choix des composantes (amplificateurs, filtres, … etc.) se pose, et la difficulté à surmonter est de connaître tous les composants pour être utilisés dans ce projet, cette connaissance est nécessaire pour obtenir de bons résultats à moindre coûts.

L'objectivité

Le but de ce travail est de mettre en valeur nos connaissances acquises durant les trois semestres d'enseignement de Master Mécatronique, en particulier, les cours d'élasticité, de dynamique du structure, d'asservissement et d'électronique industriel.

Chapitre 1 : Généralité et notions

1.1 Introduction

Ce chapitre présente les notions élémentaires de la mécanique des milieux continus qui vont être utilisées dans les chapitres suivants.

1.2 La mécanique des milieux continus

C'est le domaine de la Science qui étudie et modélise le comportement de la matière en prenant en compte, contrairement à la mécanique rationnelle, sa déformabilité. Comme les déformations dépendent non seulement des forces, mais aussi de la température, il faut également prendre en compte les lois d'échange de chaleur et les principes de la thermodynamique. Contrairement à ces principes bien établis, les lois de déformation sont loin d'être simples et connues avec autant de certitude. Si théorie et calculs sont nécessaires pour modéliser et prédire, la théorie doit être précédée d'observations et les calculs vérifient par l'expérience.

Avec l'avènement des matériaux composites modernes, la science des matériaux ne peut plus faire l'impasse sur la texture de la matière pour préciser les lois de comportement. En passant directement de l'échelle microscopique, l'angström des liaisons atomiques, aux dimensions macroscopiques on oublie que les matériaux comportent des textures aux échelles macroscopiques intermédiaires, textures qui vont influer considérablement sur certaines de leurs propriétés, tout particulièrement sur leurs caractéristiques de résistance mécaniques.

Cependant, il faut garder présent à l'esprit le fait que tous les développements théoriques sont bases sur la conception fondamentale d'un milieu continu dont les transformations sont continués. Or nous savons que la matière est discontinue à l'échelle moléculaire, souvent même à une échelle beaucoup plus grande : cristaux d'un métal, grains d'une roche, granulats d'un béton. Mais la Mécanique se place à une échelle macroscopique, c'est à dire à une échelle suffisamment grande pour que la matière apparaisse comme continue, sauf éventuellement le long de certaines surfaces de discontinuité comme les fractures [1].

1.3 Les essais en mécaniques

Dimensionner des structures pour qu'elles puissent supporter le chargement nécessite la résolution complète du problème mécanique associe. Aux équations de conservation (masse, impulsion, énergie) il faut adjoindre les lois de comportement des matériaux constitutifs, équations d'état reliant contrainte et déformation. L'établissement de la loi de comportement d'un matériau est généralement phénoménologique, basée sur l'expérimentation macroscopique et l'identification des paramètres dans le cadre de la formulation thermodynamique. Cependant l'identification expérimentale du comportement mécanique d'un matériau est par nature une opération délicate car elle ne peut s'effectuer qu’à partir d'essais mécanique sur des éprouvettes qui, par leur taille, doivent être considérées comme des structures. Or, on ne peut déduire le champ de contraintes à partir des efforts globaux dans une structure, condition nécessaire à l'identification du comportement, que si l'on connait déjà le comportement. Pour vaincre cette difficulté, force nous est de recourir à des géométries et des sollicitations spécifiques permettant de déduire les variables mécaniques locales à partir des grandeurs globales quel que soit le comportement. Les essais mécaniques classiques s'effectuent donc sur des éprouvettes normalisées et des sollicitations particulières telles que la traction uni axiale d'un barreau long, la torsion ou la mise en pression interne d'un tube mince, . . . [1].

1.4 Forces externes et équilibre mécanique :

La loi fondamentale de la dynamique $m\vec{\gamma} = \sum \vec{F}$ appliquée à un corps en équilibre mécanique statique implique la nullité de la résultante et du moment résultant des efforts externes appliques.

$$\sum \vec{F} = 0 \quad \sum \vec{M} = 0$$

- Si le nombre d'efforts externes est égal au nombre d'équations, le corps est en état d'équilibre isostatique et les efforts sont entièrement détermines.

- Si ce nombre est supérieur au nombre d'équations, le corps est en état d'équilibre hyperstatique et la détermination des efforts implique la prise en compte de la déformation du milieu pour obtenir les équations complémentaires [1].

1.5 Forces internes, forces de surface et transmission des efforts

Sous l'action d'efforts externes tout corps se déforment. Cette déformation fait apparaitre des forces internes dont l'origine se situe à l'échelle atomique. Ce sont les liaisons atomiques distendues (ou comprimées) qui exercent des forces de rappel qui tendent à ramener les atomes à leur position d'équilibre et le corps dans son état initial. Ces forces se caractérisent par un rayon d'action de l'ordre de quelques distances interatomiques. Or la mécanique des milieux continus, théorie macroscopique, ne considère que des distances grandes par rapport aux dimensions atomiques et leur rayon d'action doit être considère comme nul à cette échelle. Les forces de rappel à l’origine de l'existence des forces internes sont des forces à courte portée qui ne se transmettent qu'à leur environnement immédiat [1].

Il en résulte que les forces exercées sur une partie du corps par les parties environnantes agissent directement par sa surface. Les forces internes sont des forces surfaciques, des actions de contact.

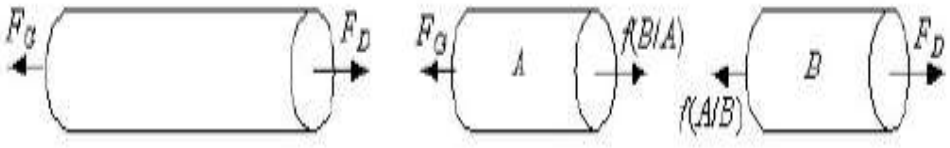


Fig. 1. 1 Principe de l'action et de la réaction : l'action de la partie A sur la partie B est égale et opposée à l'action de la partie B sur la partie A [1].

Considérons un corps soumis à l'action des forces externes $\vec{F}_G$et $\vec{F}_D$L'équilibre mécanique statique impose $\vec{F}_G + \vec{F}_D = 0$ .Séparons par la pensée ce corps en deux parties A et B. L'équilibre de la partie A prise isolement impose l'existence d'une force $\vec{f}(B/A)$ telle que $\vec{F}_G + \vec{f}(B/A) = 0$, force interne représentant l'action de la partie B sur la partie A.

Réciproquement, l’équilibre de la partie B prise isolement impose l'existence d'une $\vec{f}(A/B)$ telle que $\vec{F}_D + \vec{f}(A/B) = 0$, force interne représentant l'action de la partie A sur la partie B.

Il résulte de l'équilibre du corps pris dans son ensemble que la résultante des forces internes est toujours nulle [1]:

$$\vec{f}(B/A) + \vec{f}(A/B) = 0$$

1.6 Raideur, rigidité, état mécanique local

Un corps ne pouvant résister à la sollicitation appliquée qu'en se déformant, l'essai de traction donne accès à la raideur K de l'éprouvette définie comme le rapport de la force F de traction a l'allongement Δl résultant. La raideur K prend en compte à la fois la géométrie de l'éprouvette et la rigidité intrinsèque du matériau [1].

L'expérience a montré que pour étirer de la même quantité Δl deux éprouvettes du même matériau.

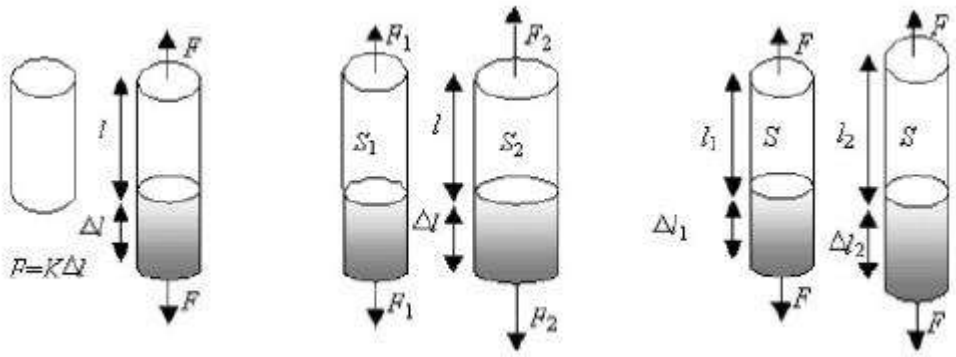


Fig. 1. 2 Raideur de l'éprouvette et rigidité du matériau [1].

1.7 Raideur de l'éprouvette et rigidité du matériau

De même longueur initialel mais d'aire de section droite S différente, la force F à appliquer varie proportionnellement à S.

Elle a également montre qu'a aire de section S et a force F fixées, l'allongement résultant Δl varie proportionnellement a la longueur initiale l.

Il en résulte que la raideur K varie proportionnellement à S et inversement proportionnellement à l de sorte que la relation $F = K\Delta l$ se met sous la forme [1]:

$$\frac{F}{S} = E\frac{\Delta l}{l}$$

La quantité E indépendante de la géométrie de l'éprouvette étant une caractéristique intrinsèque du matériau, donc dépend la rigidité.

Les variables décrivant l'état mécanique local, indépendamment de la géométrie de la structure, seront donc :

- la contrainte $\sigma = \frac{F}{S}$: densité surfacique de force.

- la déformation $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$: variation relative de longueur.

1.8 Les contraintes

On peut définir simplement la contrainte comme étant une force appliquée à une certaine unité de volume. Tout solide possède une force qui lui est propre pour résister à la contrainte. Lorsque la contrainte dépasse la résistance du matériel, l'objet est déformé et il s'ensuit un changement dans la forme et/ou le volume. Il existe des cas où la déformation n'est cependant pas perceptible à l'œil nu mais détectée seulement par des appareils sensibles[2].

.Le bris d'un vase qu'on échappe par terre est permanent, alors que la déformation d'une balle de tennis due à l'impact sur la raquette est éphémère. On reconnaît trois principaux types de déformations: élastique, plastique et cassante. Le schéma qui suit montre la relation générale entre contrainte et déformation[2].

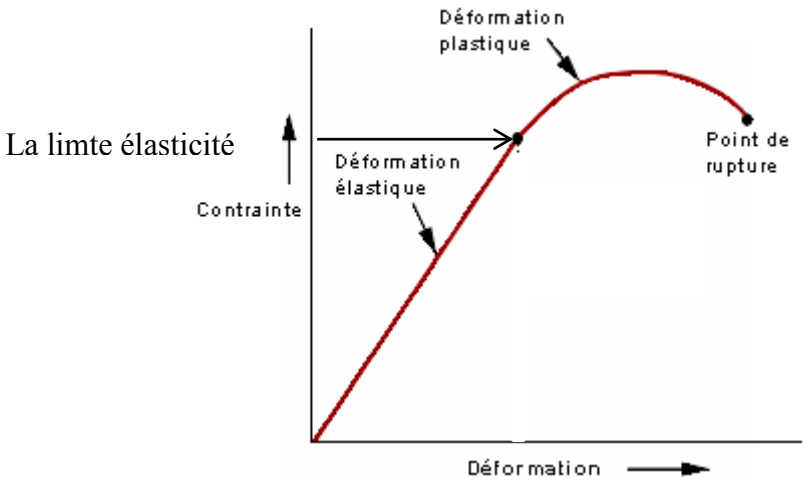


Fig. 1. 3 Courbe contraint-déformation pour un alliage métallique[2].

La première réponse d'un matériau à la contrainte est la déformation élastique. Quand la contrainte est relâchée, le matériau reprend sa forme et son volume initial, comme la bande élastique que l'on étire ou la balle de tennis frappée par la raquette. L'énergie emmagasinée

par le matériau durant la déformation est dissipée lorsque la contrainte est relâchée; cette énergie est transformée, par exemple, en mouvement dans le cas de la balle de tennis. Sur le schéma, la relation contrainte-déformation est linéaire dans le cas de la déformation élastique. À un point donné durant la déformation élastique, la relation contrainte-déformation devient non linéaire: le matériau a atteint sa limite d'élasticité. Si la contrainte dépasse cette limite, le matériau est déformé de façon permanente; il en résulte une déformation plastique (l'écrasement d'une balle de pâte à modeler par exemple) ou une déformation cassante (le verre qui se brise). Dans le cas de la déformation plastique, toute l'énergie est utilisée pour déformer le matériau. Avec une augmentation de la contrainte, le matériau atteint un second seuil, son point de rupture, et il casse; c'est la déformation cassante. Lorsqu'un matériau est soumis à des taux de contraintes très rapides, la déformation plastique est minime ou même inexistante [2].

1.9 Les déformations

Sous l'action d'un chargement, tous les corps subissent un changement de forme, de position et d'orientation entre un état initial avant application de la charge et un état final consécutif à son application. Les déformations caractérisent le changement de forme local en tout point du matériau, indépendamment de sa nature et de ses caractéristiques de résistance [1].

1.9.1 Etat local de déformation

La transformation géométrique qui décrit le passage d'un petit élément de matière de l'état initial à l'état final se décompose en translation, rotation et déformation, cette dernière étant seule responsable du changement de forme du petit élément. Translation et rotation sont des mouvements de corps rigides qui traduisent les changements de position et d'orientation. Du point de vue de l'état final, rotation et déformation ne sont pas commutatives. Si l'on ne s'intéresse qu'au changement de forme du petit élément et non plus à sa position absolue les deux configurations finales sont équivalentes pour un chargement donné [1].

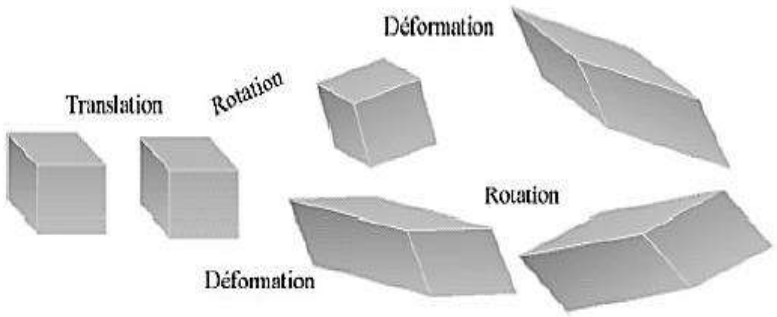


Fig. 1. 4 Transformation géométrique de passage entre l'état initial et l'état final[1].

Seule la déformation responsable des variations de longueur et des distorsions angulaires caractérise le changement de forme. Elle seule sera liée à la contrainte appliquée au travers de la loi de comportement du matériau. C'est la variable pertinente du mécanicien.

1.9.2 Petites et grandes déformations

Cependant, lors de l'application de deux chargements successifs, il faut tenir compte de l'ordre des chargements puisque le second agit sur un état intermédiaire - position, orientation et forme - induit par le premier, état qui devient le nouvel état de référence pour le calcul de la répartition des contraintes induit par le second chargement. Le calcul de la répartition des contraintes induit par le second chargement doit s'effectuer à partir de la forme modifiée par le premier. L'état de contrainte est donc différent de celui qui serait obtenu si le second chargement était applique à l'état initial sans tenir compte de la déformation induite par le premier.

Ce n'est que dans le cas où les variations de position, orientation et forme seront suffisamment faibles que l'on pourra les négliger et considérer qu'en première approximation le second chargement agit également sur la géométrie initiale, négligeant les variations de géométrie induites par le premier chargement. Il faudra donc distinguer le cas des petites déformations comme celles des matériaux cristallins travaillant en régime élastique de celui des grandes déformations comme celles qui interviennent dans les opérations de formage et d'emboutissage des métaux en régime plastique ou celles des élastomères supportant de grandes déformations en régime élastique[1].

1.9.3 Les grandes déformations

Nous nous limiterons à la présentation simplifiée dans un essai classique de traction. On enregistre l'allongement Δl d'une eprouvette de section initiale S_0 et de longueur initiale l_0 en fonction de la force appliquée F. Pour caractériser le comportement du matériau on s'affranchit de la géométrie de l'éprouvette en introduisant la contrainte nominale de traction $\delta_n = F/S_0$ et l'extension (stretch) [1]:

$$e = \frac{l + \Delta l}{l} = 1 + \frac{\Delta l}{l} = 1 + \varepsilon_n \, , \varepsilon_n = \frac{\Delta l}{l}$$

Étant la déformation nominale d'extension. La courbe d'essai $F \, , \Delta l$ tracee dans le plan δ_n, ε_n est alors representative du comportement en traction du seul matériau.

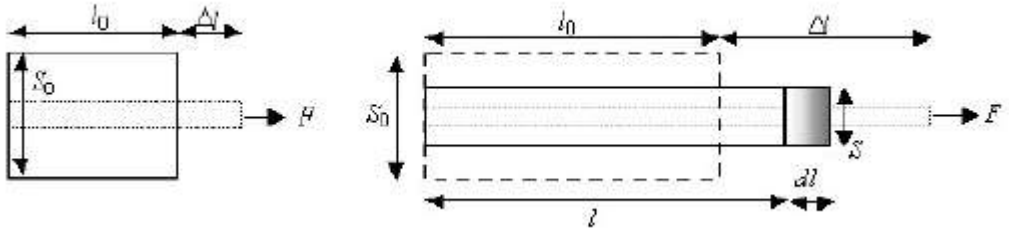


Fig. 1. 5 Déformations nominale et vraie[1].

Tant que l'allongement Δl reste petit devant la longueur initiale l_0 , typiquement tant $, \varepsilon_n <$ 1%, on peut négliger les variations de forme de l'éprouvette et les grandeurs nominales δ_n et ε_n sont représentatives de l'état de contrainte et de déformation vraies du matériau. C'est le régime des petites déformations.

Cependant, lorsque l'éprouvette s'allonge de manière importante, comme c'est le cas pour les métaux en régime plastique pour lesquels la déformation nominale a rupture atteint quelques dizaines de % ou les élastomères en régime élastique pour lesquels elle peut atteindre quelques centaines de %, on constate expérimentalement que l'aire de section droite S décroit au fur et à mesure de l'allongement de l'éprouvette. Il est donc naturel, pour s'affranchir de la géométrie de l'éprouvette, de prendre à tout instant du chargement les dimensions vraies $S < S0$ et $l > l0$ pour définir les vraies contrainte et déformation. La définition de la

déformation vraie devient incrémentale au sens où, sous l'action de la contrainte vraie $\sigma = \frac{F}{S}$ a un instant donne du chargement, le matériau subit un accroissement d'extension de = $\frac{l+dl}{l}$ auquel correspond l'accroissement de déformation vraie $d\varepsilon = \frac{dl}{l}$ La déformation vraie ε lorsque l'éprouvette s'est allongée de Δl s'obtient par intégration[1] :

$$\varepsilon = \int_{l_0}^{l_0+\Delta l} \frac{dl}{l} = \ln\left(1 + \frac{\Delta l}{l}\right) = \ln(1 + \varepsilon_n)$$

C'est le régime des grandes déformations.

1.9.4 Les petites déformations

La plupart des structures étant constituées de matériaux cristallins peu déformables travaillant en régime élastique, l'approximation des petites déformations est largement suffisante. Elle offre de plus l'avantage du principe de superposition nous nous limiterons a la présentation de la théorie des petites déformations [1].

1.10 Élasticité linéaire

Lorsqu’un corps solide est soumis à des forces extérieures, il peut se déplacer et /ou se déformer. Un solide sera dit élastique si, conformément à l’intuition, il reprend spontanément sa forme de départ lorsque les contraintes extérieures sont supprimées .Ainsi, les déformations des solides élastiques sont par définition réversibles. Dans ce qui suit, nous admettrons en outre que l’état naturel d’un solide élastique, c’est-à-dire son état en l’absence de toute force extérieure, est caractérisé par une forme bien déterminée ainsi que par l’annulation de toutes les contraintes internes[3].

La théorie de l’élasticité étudie les déplacements, les déformations et les contraintes dans un solide soumis à des forces extérieures.

Nous adopterons les hypothèses suivantes :

– Le matériau est homogène (il a les mêmes propriétés en tout point) et isotrope (en un point donne, il a les mêmes propriétés dans toutes les directions).

– Le comportement du matériau est linéaire (les relations entre les contraintes et les déformations sont linéaires) et élastique (le solide reprend sa forme initiale des que les forces appliquées sont supprimées)[4].

1.10.1 Les modules élastiques

Module d'Young et coefficient de Poisson

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

$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$$

- Le module d′Young E a la dimension d'une contrainte et se mesure généralement en GPa. Il représente la contrainte qu'il faudrait appliquer pour obtenir une déformation unité soit doubler la longueur initiale. Aucun matériau ne répond linéairement a une telle contrainte, la plupart ont cède bien avant[1].

-Le coefficient de Poisson est un nombre sans dimension compris dans l’intervalle$\left\{0, \frac{1}{2}\right\}$. A l‘exception des élastomères comme le caoutchouc dont le coefficient de Poisson $\nu \simeq \frac{1}{2}$, la plupart des matériaux isotropes continus ont un coefficient de Poisson compris dans l’intervalle$\{0{,}25 - 0{,}35\}$.

- Les matériaux structurellement complexes peuvent avoir des coefficients de Poisson supérieurs à 0,5. C'est le cas des granulaires, des poreux, des textiles et de nombreux tissus biologiques comme les muscles qui gonflent fortement lorsqu'on les contracte avec un coefficient de Poisson $\nu \simeq 1$. A l'oppose le coefficient de Poisson du liège $\nu \simeq 0$. Un bouchon ne s'allonge pas quand on l'étreint dans une bouche bouteille[1].

1.11 Extensomètre

Un extensomètre est un dispositif permettant de mesurer le déplacement directement sur la partie utile de l'éprouvette (i.e. où l'état de contrainte est homogène). Cela permet de s'affranchir de la raideur de la machine et des effets de tri axialité, et d'obtenir une mesure plus précise que par la mesure du déplacement de la traverse. Il existe deux types d'extensométrie : avec ou sans contact ; on choisira l'une ou l'autre selon les conditions expérimentales[5].

1.12 Extensomètre avec contact

1.12.1 Jauges de déformation

Un premier type d'extensomètres avec contact sont des dispositifs traduisant en variation de résistance électrique leur propre déformation, en principe égale à celle de la structure à l'endroit où ils sont collés. Ils permettent typiquement de mesurer des déformations de ±1μm/m. L'image de la **Fig. 1.6** présente le schéma de fonctionnement de ces dispositifs. Le conducteur est soit d'origine métallique, souvent des alliages à base de nickel, soit un semi-conducteur. Le nombre de brins de la grille diffère selon le type de conducteur. Il varie entre 10 et 20 pour un conducteur métallique et vaut 1 pour les jauges semi-conductrices. La relation qui lie déformation de l'extensomètre et résistance est :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{1\Delta R}{K\Delta R}$$

Où R est la résistance électrique et K le facteur de jauge, qui dépend très fortement du coefficient de Poisson($K = C(1 - 2\nu) + 1 + 2\nu$) où C dépend du matériau _ il varie d'environ 2 pour les métaux à plus de 100 pour les semi-conducteurs). Plus le facteur de jauge sera grand, plus la sensibilité de la jauge sera grande. Les résistances mises en jeu sont classiquement comprises entre 120 et 350 Ω. On peut facilement mesurer des déformations de plus de 4 %. La variation de résistance d'une jauge soumise à déformation reste faible Par exemple, pour ε = 0, 0014 et K = 2, 1, $\delta R/R$= 0,3%. Il est plus pratique alors de mesurer la variation du potentiel ΔV plutôt que celle de la résistance elle-même, via un pont de Wheatstone. Les jauges classiques produisent un signal de ±2 mV/V avec une tension d'alimentation maximale de 10 V environ, ce qui constitue donc un signal de sortie relativement faible, d'où la nécessité de disposer au minimum d'un bon amplificateur. Il faut également se méfier des effets de la température, qui peuvent induire une variation de la résistance et donc une déformation apparente qui n'existe pas réellement, ainsi qu'une dilatation différente de la jauge et de l'éprouvette et enfin une dilatation différentielle selon l'hétérogénéité de la température le long de l'extensomètre[5].

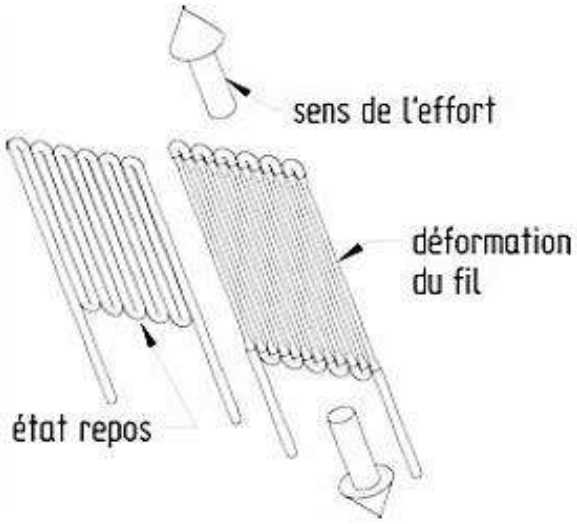


Fig. 1. 6 Schéma de principe du fonctionnement d'une jauge de déformation[5].

Les jauges semi-conductrices ont une sensibilité bien supérieure par rapport aux jauges métalliques. Cependant elles ont une moins bonne linéarité et sont plus sensibles aux effets de la température, elles trouvent leur intérêt dans la mesure de faibles déformations, dans un domaine de température restreint. Les jauges métalliques sont utilisées pour la mesure précise de déformation pouvant atteindre des amplitudes importantes et dans des domaines de température étendus, typiquement entre -40 et +200 °C pour des temps de mesure pas trop prolongés. Leur élongation maximale est d'environ 3 % et leur durée de vie de 10^5 à 10^6 cycles. L'image de la **Fig. 1.7** présente un montage de traction incluant deux jauges de déformation, une axiale et une transversale, ainsi qu'une mesure par extensomètre à pince [5].



Fig. 1. 7 Jauge collée sur une éprouvette (image CdM).

1.12.2 Extensomètres à pinces :

Le deuxième type d'extensomètres avec contact sont les extensomètres à pinces. Il en existe deux types. Les extensomètres à LVDT (Linear variable differential transformer) ont un corps constitué d'un noyau central autour duquel s'enroulent trois bobines. Une de ces bobines - primaire – est alimentée en courant et lorsque le noyau coulisse, cela induit du courant dans les bobines secondaires dont les variations sont proportionnelles au déplacement du noyau. Le courant augmente dans l'une des bobines et diminue dans l'autre, ce qui permet de mesurer la position du noyau. Le noyau est lui-même relié à l'éprouvette via des pinces qui l'enserrent légèrement, et il coulisse librement. Son déplacement autour de la position d'équilibre du pont génère deux tensions représentatives de l'amplitude du déplacement et de son sens. La valeur de ce déplacement est obtenue par comparaison des valeurs crêtes de chaque signal. La résolution est de l'ordre de 0,1 % de la plage de mesure qui peut varier de 1 à 100 mm environ. On peut donc espérer mesurer des déplacements, dans des conditions optimales, de l'ordre de 1 μm. La résolution en déformation est d'environ 0,5 % [5].

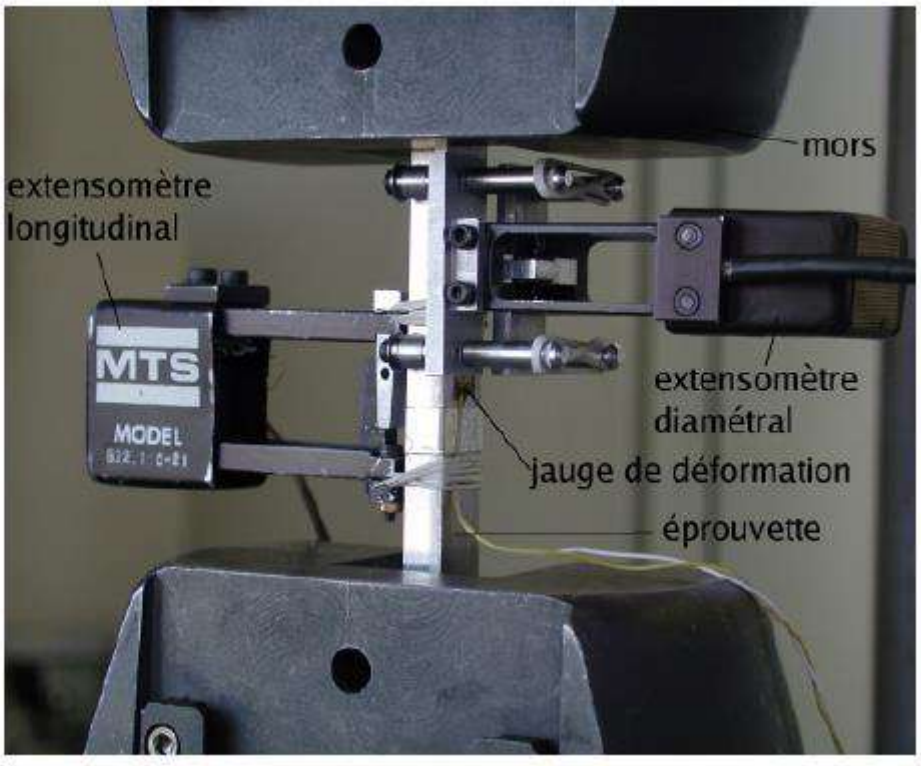


Fig. 1. 8 Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction (cliché CdM)[5].

1.13 Extensomètre sans contact

Il est également possible de réaliser des mesures de déplacement sans contact avec l'échantillon. Cela peut être particulièrement commode pour des essais en température, par exemple. On dépose sur la surface de l'échantillon deux points colorés dont les déplacements pourront être suivis par corrélation d'images, celles-ci étant prises à l'aide d'une caméra [5].

1.14 Essai de flexion

Il est réalisé sur des barrettes, avec 3 ou 4 points d’appuis, ce dernier cas permettant de bénéficier d’une zone centrale dans laquelle le «moment de flexion» est uniforme. Il est essentiellement utilisé avec des matériaux fragiles, dont le comportement sera élastique. La plastification, associée au fait que le comportement en traction et en compression peut être différent, conduit à des redistributions de contraintes complexes dans l’éprouvette, si bien que le dépouillement de l’essai lui-même peut nécessiter un calcul de structure.

Dans un même ordre d’idée, il existe également des essais de flexion rotative, dans lesquels une éprouvette en rotation, encastrée à une extrémité, subit un effort perpendiculaire à son axe, si bien que les points de la surface extérieure voient leur état de contrainte passer alternativement de la traction à la compression. Ces essais sont utilisés pour déterminer la «limite de fatigue», sollicitation en dessous de laquelle le matériau résistera à un chargement répété[6].

1.15 Flexion pure

La flexion pure est un état de charge tel que, dans toute section droite d’une pièce, il n’existe qu’un moment fléchissant M_f. Ce moment fléchissant doit être constant[7].

La **Fig. 1.9** donne un exemple d’une barre soumise à flexion pure. Les deux couples C agissent dans un plan de symétrie longitudinal de la poutre : dès lors, en effectuant une coupure suivant une section droite quelconque, on constate que tous les efforts internes y sont nuls sauf le moment fléchissant autour de l’axe Oz (perpendiculaire au plan dans lequel se trouve la poutre) qui est constant et égal à C[7].

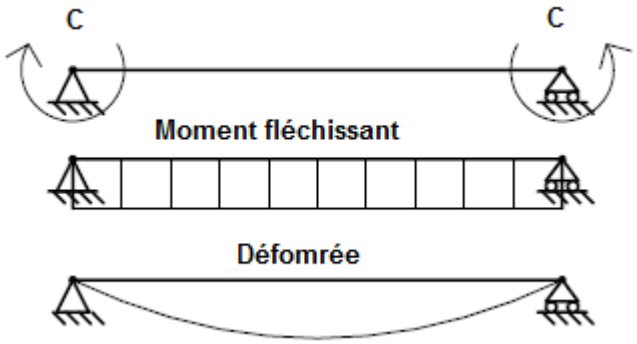


Fig. 1. 9 Une barre soumis à flexion pure[7].

Par des considérations de symétrie, on peut montrer que toute section droite de la barre le reste après déformation.

Le moment fléchissant étant, par définition, constant, la barre se déformera partout de façon identique. Elle adoptera donc une courbure constante en prenant la forme d’un arc de cercle.

1.16 Flexion simple

Il apparaît donc dans les sections transversales d’une barre, en même temps que les moments de flexion, des efforts tranchants, d’où :

La flexion simple est un état de charge tel que dans toute section droite d’une pièce il n’existe qu’un moment fléchissant $M_f$et un effort tranchant V associé.

La flexion simple entraîne sur toute la section perpendiculaire à la fibre moyenne de la pièce des contraintes normales et tangentielles. Ces dernières provoquent un gauchissement des sections droites[7].

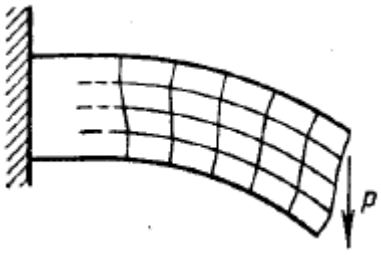


Fig. 1. 10 Une flexion simple[7].

Toutefois, la déformation du plan des sections transversales n’influe pas d’une façon notable sur la grandeur des contraintes normales.

L’erreur que l’on commet en ne tenant pas compte de cette déformation dans le calcul des contraintes normales est faible (voir nulle si l’effort tranchant est constant).

Une barre travaillant principalement à la flexion est appelée poutre.

1.17 Appuis et charges

1.17.1 Types d’appuis

Si on se limite au cas plan, on rencontre trois types d’appuis :

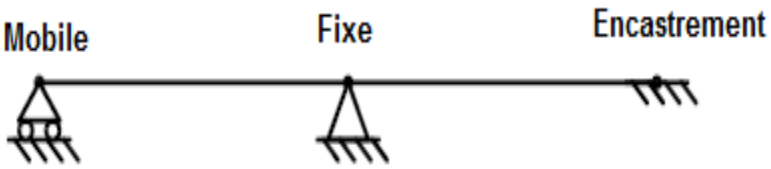


Fig. 1. 11 Trois types d’appuis[7].

1) L’encastrement : Degré de liberté : aucun.

D’où l’encastrement interdit tout mouvement (horizontal, vertical, rotation). Il crée une force de réaction (qui peut se décomposer en une composante verticale et une composante horizontale) et un couple appelé moment d’encastrement.

2) L’appui fixe : Degré de liberté : un (rotation)

(L’appui fixe est aussi appelé : appui à rotule ou appui articulé). D’où l’appui fixe permet uniquement la rotation. Il crée une force de réaction uniquement (qui peut se décomposer en une composante verticale et une composante horizontale).

3) L’appui mobile : Degré de liberté : deux (rotation, glissement)

(L’appui mobile est aussi appelé : appui simple, appui à rouleau, appui glissant). D’où l’appui mobile empêche uniquement le déplacement suivant une perpendiculaire au chemin de roulement. Il crée une force de réaction perpendiculaire au chemin de roulement.

Cet appui est largement utilisé afin de rendre possible les déplacements horizontaux et empêcher ainsi la naissance de contraintes thermiques éventuelles[7].

1.17.2 Charges supportées par les poutres

Les charges que les poutres ont à supporter se divisent en deux catégories :

- le poids propre;

- les charges proprement dites.

Le poids propre de la pièce s’évalue en Newton par mètre courant [N/m] pour les poutres, et en [N/m²] pour les planchers et les passerelles.

Les charges proprement dites sont les charges qui sollicitent les pièces. Il en existe de deux sortes :

- les charges concentrées;

- les charges réparties.

A) Les charges concentrées sont celles qui sont ramassées sur une très petite surface, tel une poutre s’appuyant sur une autre poutre qui lui est perpendiculaire, une colonne reposant sur une poutre, une charge pendue (cas d’un palan) fixe ou roulante[7].

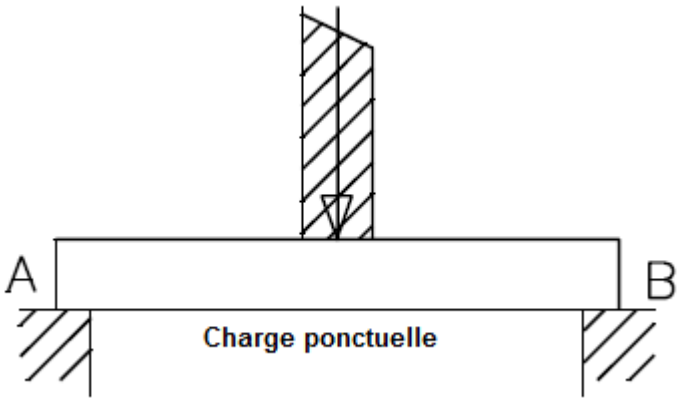


Fig. 1. 12 Charges concentrées[7].

B) Au contraire un mur élevé sur la longueur d’une poutre ou une matière répartie sur la surface d’un plancher sont des charges réparties. Elles sont dites uniformément réparties quand elles ont une valeur constante sur toute la longueur de la poutre ou sur toute la surface du plancher (le poids propre étant un exemple de charge répartie).

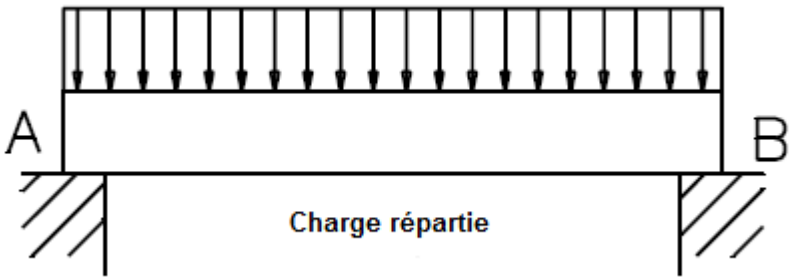


Fig. 1. 13 Charges réparties[7].

Suivant la position sur la poutre du point d’application d’une charge concentrée, la déformation et les efforts internes que la poutre subit varient beaucoup. Il en est de même, si à égalité de poids total, la charge est concentrée au lieu d’être répartie.

-Une poutre peut être capable de supporter une charge répartie de valeur donnée et peut ne pas pouvoir supporter la même charge appliquée localement.

-Une charge concentrée locale peut agir très différemment sur une poutre suivant l’emplacement de son point d’application. A ce point de vue il y a toujours intérêt à reporter la charge aussi près que possible des appuis.

Nous verrons les différentes possibilités de charge d’une poutre aussi bien encastrées que sur deux appuis et de l’influence des celles-ci sur la manière dont elles sont sollicitées[7].

1.18 Distribution des contraintes normales dans une section droite

1.18.1 Généralités

Si on considère une barre sur appuis simples, possédant un plan de symétrie longitudinal, dans lequel s’exerce une force F, celle-ci va se déformer comme indiqué à la **Fig. 1.14**.

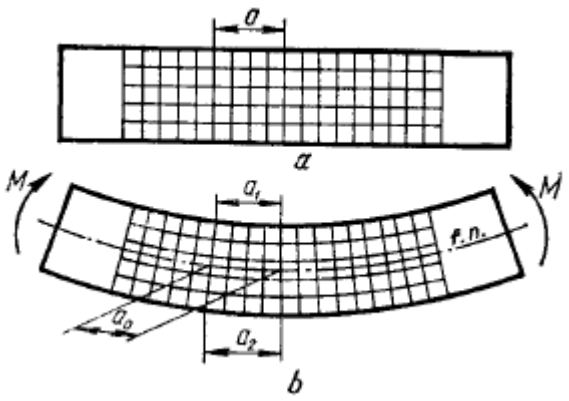


Fig. 1. 14 Une barre sur appuis simples[7].

Vu la courbure de la barre, les fibres longitudinales inférieures vont s’allonger et les fibres longitudinales supérieures se raccourcir. Dès lors on peut montrer, par la loi de Hooke [contrainte proportionnelle au déplacement], que lors de la flexion d’une poutre, les contraintes dans une section transversale varient selon une loi linéaire (**Fig. 1.15**. Ce sont donc bien des contraintes normales (c’est-à-dire perpendiculaires à la section)[7].

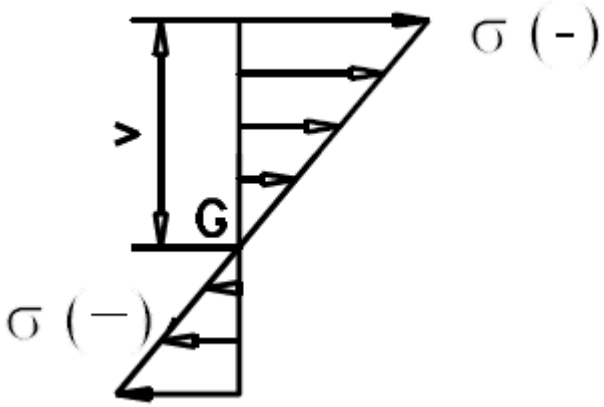


Fig. 1. 15 Contraintes normales[7].

Si les fibres inférieures s’allongent et les fibres supérieures se raccourcissent, il doit donc logiquement exister des fibres qui vont conserver leur longueur. D’où la définition :

Le lieu géométrique des points d’une section vérifiant la condition $\sigma = 0$ est appelé : ligne (ou fibre) neutre de la section.

Et dans le cas de la flexion pure et de la flexion simple, on peut montrer, par ailleurs, que la fibre neutre se confond toujours avec le centre de gravité de la section (sauf dans le cas particulier des pièces à fortes courbures)[7].

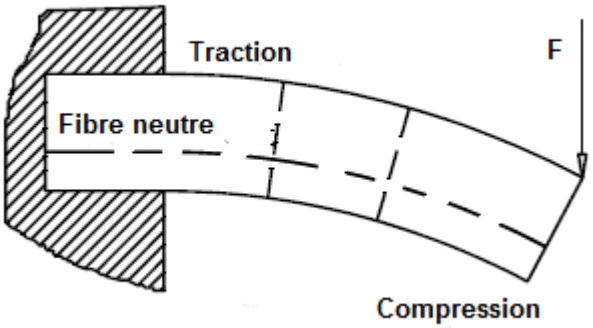


Fig. 1. 16 Fibre neutre de la section[7].

1.18.2 Relation fondamentale

Explicitons maintenant le lien existant entre la contrainte σ et le moment fléchissant M_f dans une section droite. L. Navier à démontrer que toute fibre longitudinale située à une distance y de l’axe neutre est le siège d’une contrainte donnée par la formule suivante :

$$\sigma = \frac{M_f}{I/y} = \frac{M_f}{I} \times y$$

Notations :

M_f : Moment fléchissant [Nmm]

I : Moment d’inertie de la section [mm^4]

y : Distance à partir de la fibre neutre [mm]

1.19 Distribution des contraintes tangentielles dans une section droite

L’objet de ce paragraphe est de rechercher la distribution des contraintes tangentielles (ou de cisaillement) agissant sur les facettes contenues dans une section droite.

On peut montrer que la distribution des contraintes tangentielles est telle que ces contraintes sont nulles au bord supérieur et inférieur de la section et maximales vers le centre (maximales au centre de gravité pour les sections symétriques (axe de symétrie perpendiculaire à la force))[7].

1.20 Contraintes admissibles

1) Dans le cas d’un matériau ductile, la contrainte admissible (σ_{adm}) en flexion est obtenue en tenant compte d’un coefficient de sécurité (S) par rapport à la limite d’élasticité (R_e) :

$$\sigma_{adm} = \frac{R_e}{S}$$

2) Si le matériau est fragile, la contrainte admissible (σ_{adm})) se déterminera à partir de la résistance à la rupture (R_m) et non plus à partir de (R_e) :

$$\sigma_{adm} = \frac{R_m}{S}$$

1.21 Conclusion

La compréhension de la mécanique des milieux continus nécessite des connaissances avancées en RDM et en MDS, ce chapitre donne quelques définitions simplifiées pour aborder un problème d’extensométrie.

Chapitre 2 : Jauges des déformations

2.1 Introduction

Le but de l'extensomètre est de mesurer un déplacement et de permettre l'acquisition de cette mesure, ce qui revient, en général, à traduire une déformation en signal électrique ou optique. [5].

Quelque caractéristique importante :

1. La technique de la jauge à résistance électrique est une méthode d’extensométrie indirecte ponctuelle, qui se pratique essentiellement sur des prototypes réels.
2. La jauge collée sur la pièce à étudier est un capteur passif qui nécessite un circuit de conditionnement
3. C’est la technique d’analyse expérimentale des contraintes la plus utilisée actuellement pour les raisons suivantes :

-fiabilité des mesures ;

-précision obtenue ($1\mu m/m$) ;

-simplicité des mises en œuvre par rapport à d’autre méthode ;

-possède une chaine de mesure efficace et performante ;

-cout faible par rapport aux autres méthodes.

4. l’utilisation des jauges se fait aussi bien en laboratoire qu’en chantier pour :

-états de contrainte statique et dynamique (basse fréquence) ;

-concentration des contraintes, contraintes résiduelles, contraintes thermiques ;

-fabrication des capteurs divers et de pseudo capteurs ;

-techniques connexes comme les indicateurs de propagation de fissure[8].

2.2 Principe des jauges

Sous sa forme la plus simple, une jauge est constituée d’un très fin fil (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la **Fig. 2.1** Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée[9].

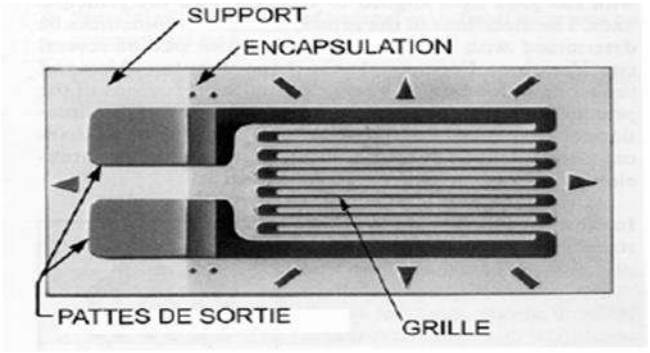


Fig. 2. 1 Jauge de contrainte[8].

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

$$R = \frac{\rho L}{s}$$

Où R est la résistance électrique.

ρ : La résistivité du matériau.

L : La longueur du fil.

S : La section du fil.

En prenant le logarithme népérien et la différentielle de chaque membre et en considérant que les paramètres varient très peu lors de la mesure, on obtient la relation :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta s}{s}$$

Qui peut se réécrire :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L}$$

Où K est appelé le facteur de jauge[9].

2.3 Principe de mesure

La méthode la plus précise pour mesurer une variation de résistance consiste à placer la jauge dans un pont de Wheatstone **Fig. 2. 2**. Lorsqu’un pont est constitué de 4 résistances de valeur égale et alimenté par une source de tension (P) constante aux points A et C, on obtient par symétrie, une différence de potentiel nulle entre les points B et D. Si la résistance R_1 varie légèrement, ce déséquilibre est mesuré par le galvanomètre (G)[9].

2.3.1 Principe du montage en pont

Soit un circuit constitué par quatre résistances égales R1, R2, R3, R4 montées en pont (**Fig. 2. 2**). Si nous l’alimentons par une source de courant P suivant une diagonale, nous avons à l’équilibre une tension nulle entre B et D. La variation de l’une quelconque des résistances fait apparaître une tension Vs entre B et D qui peut être mesurée par un instrument G. Pour de très faibles variations de résistance (de l’ordre de quelques microhms dans le cas des jauges), la tension de sortie V_s est pratiquement proportionnelle aux variations relatives de résistance ΔR/R de chacune des jauges. Négligeant les termes d’ordre supérieur, elle vaut[10]:

Relation:(1)

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

Avec V_e force électromotrice de la source. Les signes alternés + et – de cette équation caractérisent la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens inverse, cependant que deux résistances opposées agissent dans le même sens. Un capteur est constitué par un tel pont dont une, deux, ou quatre des résistances sont des jauges

électriques collées sur le corps d’épreuve, les autres étant des résistances fixes. Le cas le plus fréquent est celui de quatre jauges. D’après la règle des signes (1), on voit qu’il est possible d’ajouter ou de retrancher les effets séparés des jauges. C’est ainsi que sont éliminés les phénomènes parasites au profit de la grandeur recherchée.

La tension de sortie V_s peut être exploitée de différentes manières :

— on peut la mesurer directement à l’aide d’un millivoltmètre ;

— on peut la comparer, par méthode d’opposition, à une tension de référence ;

— on peut l’utiliser comme indication de déséquilibre pour rétablir.

La symétrie par variation de potentiomètres montés en parallèle sur les jauges.

Ces trois procédés sont les principes de base des instruments, mais, quel que soit le type utilisé, la règle des signes (1) est la même.

Lorsque les quatre bras du pont ne sont pas tous occupés par des jauges, on peut théoriquement les disposer à l’extérieur du capteur. Toutefois, comme l’on mesure de très faibles variations de résistance, tous les circuits qui constituent le carré ABCD du pont doivent être très stables. Une instabilité est très perturbatrice dans ce carré, alors qu’elle a moins d’importance sur les circuits extérieurs reliant les diagonales du pont à P et à G. C’est pourquoi, sauf cas de force majeure, il est préférable d’inclure les quatre branches du pont dans le corps du capteur.

La relation (1) est une approximation ne comportant que des ΔR du premier degré, ceux de degrés supérieurs ayant été négligés. De ce fait, il s’agit d’une fonction qui ne peut être considérée comme linéaire que pour de faibles variations (ΔR/R de l’ordre de 10–6). Pour assurer une meilleure linéarité dans le cas de variations importantes, on alimente le pont non pas par une tension constante mais par intensité constante. Le choix entre ces solutions dépend de l’étendue des variations de la grandeur mesurée et de la précision requise. Nous retiendrons que les caractéristiques d’un capteur donné ne sont pas toutes intrinsèques mais dépendent aussi des instruments qui, avec lui, constituent la chaîne de mesure[10].

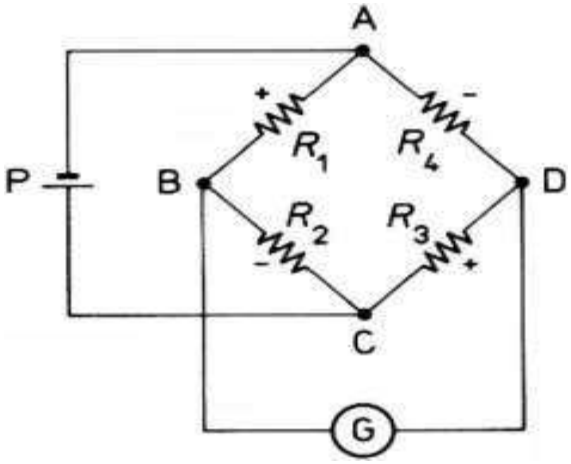


Fig. 2. 2 Montage en pont de Wheatstone[10].

2.4 Montage

2.4.1 Montage quart de pont

Dans un montage en quart de pont, une seule jauge est active. Les trois autres sont des résistances (ou des jauges dites de complément). Deux fils alimentent le pont ainsi formé, et deux autres servent à restituer le déséquilibre du pont lorsque la résistance de la jauge varie. Ce montage est le plus simple mais il présente de nombreux inconvénients (pertes en lignes, influence de la température sur la jauge et les câbles, etc.)[11].

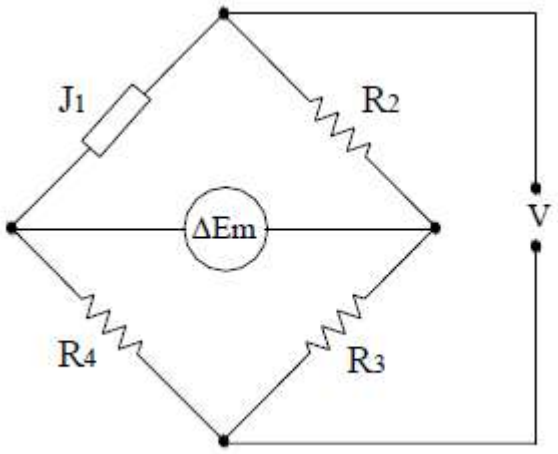


Fig. 2. 3 Montage quart de pont[9].

2.4.2 Montage en demi-pont

Dans ce montage, deux jauges sont actives, les deux autres résistances (ou jauges de complément) étant fournies par l’électronique associée aux jauges. Le demi-pont est relié à l’amplificateur par un câble à trois fils : deux servent à l’alimentation, et le troisième envoie le signal de mesure vers l’amplificateur. Dans ce montage, le câblage n’a pas d’influence sur l’équilibre du pont. L’effet thermique est également compensé, mais pas les pertes en ligne[11].

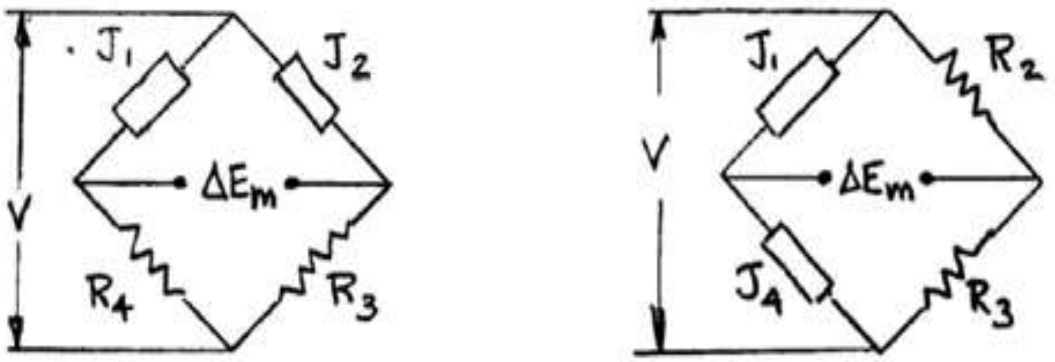


Fig. 2. 4 Montage en demi-pont[8].

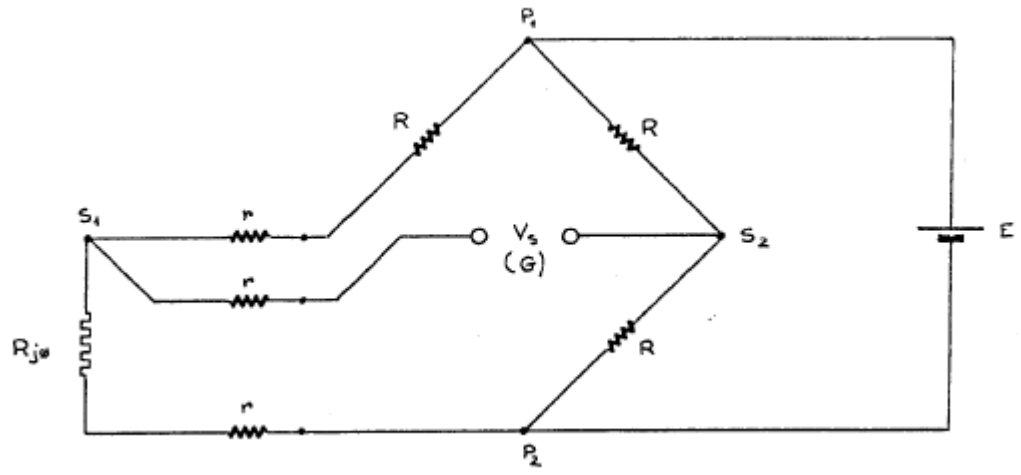


Fig. 2. 5 Câblage trois fils [12].

2.4.3 Montage en pont complet

Les quatre résistances du pont sont des jauges. L’influence du câblage et des variations de température est compensée. Les pertes en ligne, en revanche, sont toujours présentes[11].

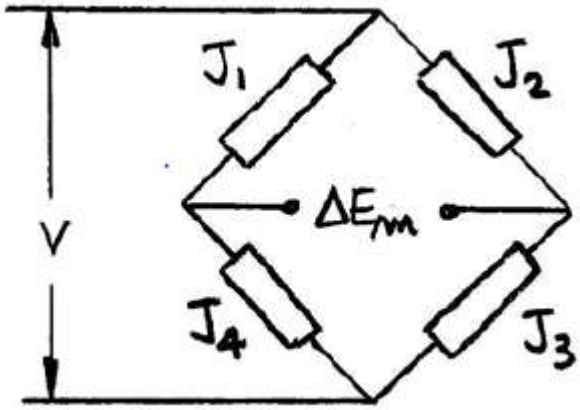


Fig. 2. 6 Montage en pont complet[8].

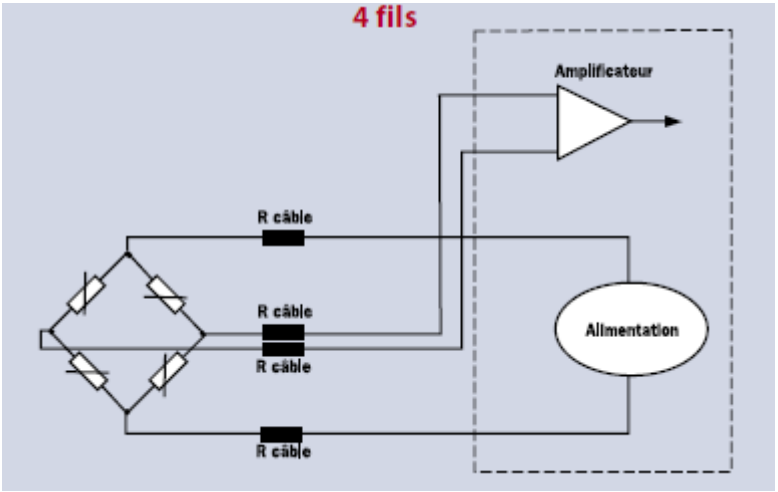


Fig. 2. 7 Câblage quatre fils[11].

2.5 Effet thermique

Lorsqu’une jauge est collée sur un substrat déterminé, elle subit des déformations suite à la dilatation propre du matériau due aux effets thermiques. C’est pourquoi les jauges actuelles

sont auto-compensées. Il faudra donc choisir une jauge dont le coefficient de dilatation est le plus proche de celui du substrat sur lequel elle sera collée[9].

2.6 Le support

Le support d’une jauge doit transmettre le mieux possible la déformation de la structure à la jauge, pour atteindre ce but les caractéristiques importantes du support sont :

-module du cisaillement G de valeur élevée (G diminue avec T, limitation) ;

-fluage minimum (variation de la déformation du temps) ;

-bonne flexibilité (pour collage sur les surfaces courbes) ;

-limite d‘allongements élevée (au moins aussi grande que celle de la jauge) ;

-bon collage de la grille ;

-grande résistance d’isolement électrique ($10^9\Omega$) ;

-bonne tenue mécanique et électrique avec la température ;

-bonne dissipation de la chaleur ;

-bonne aptitude au collage sur la structure (métal) ;

-coefficient de dilatation pas trop grand[8].

2.7 La colle

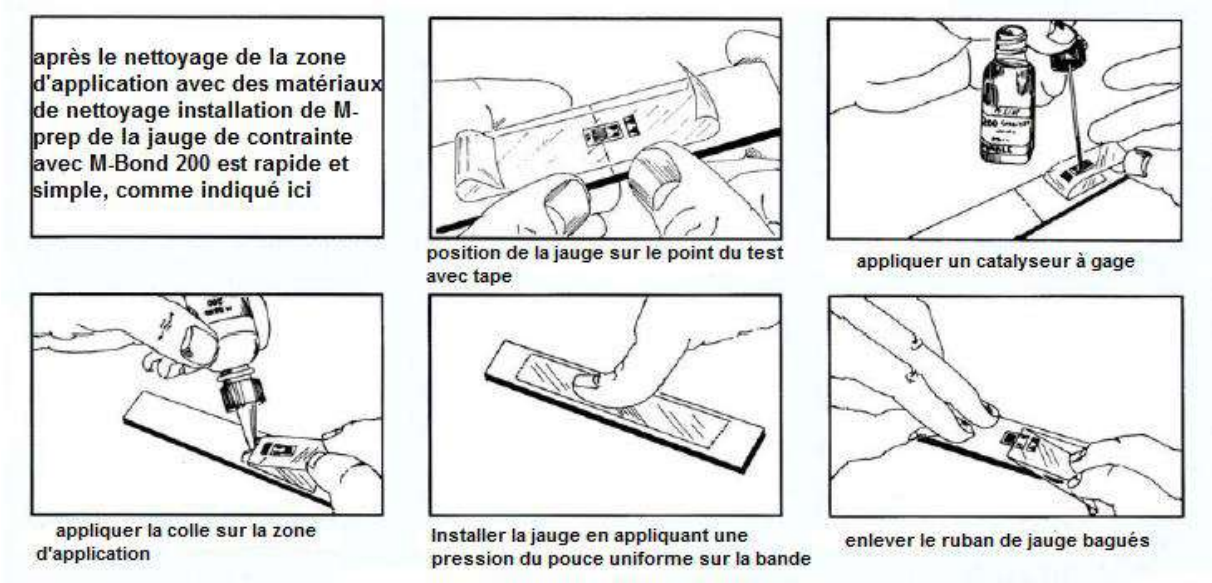


Fig. 2. 8 Installation d’une jauge avec de la colle[8].

2.8 Exemples

2.8.1 Quelques principes de capteurs

2.8.1.1 Exemples de capteurs extensométriques

Les jauges sont repérées par le symbole J.

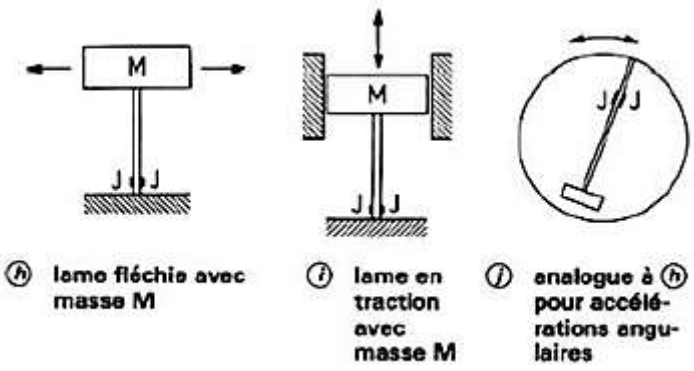


Fig. 2. 9 Vibrations, accélérations[10].

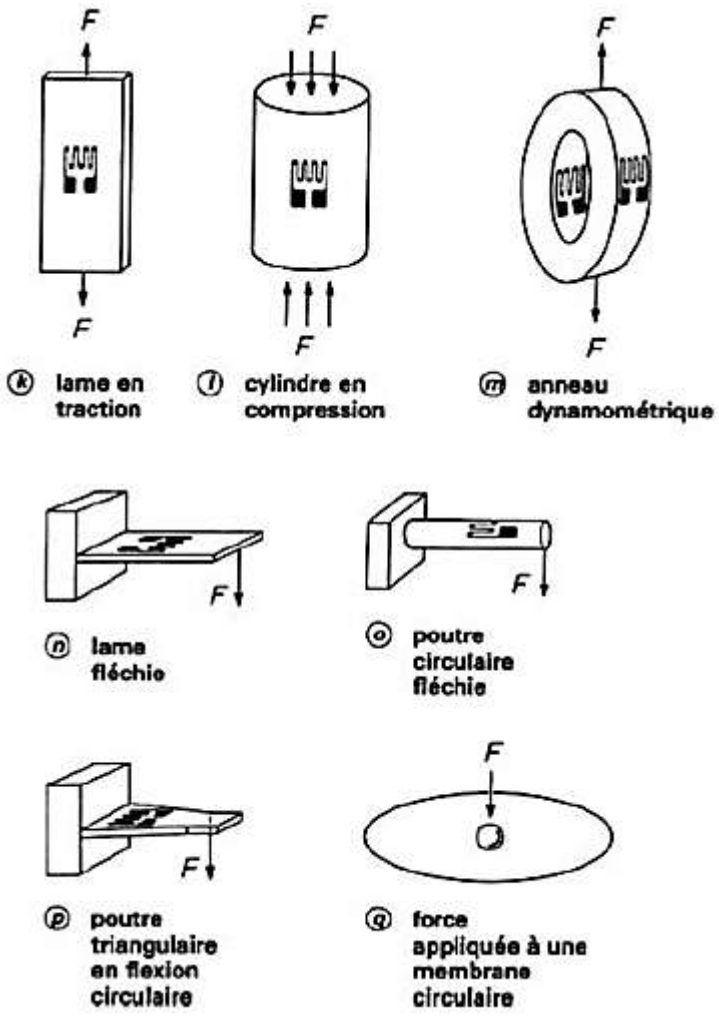
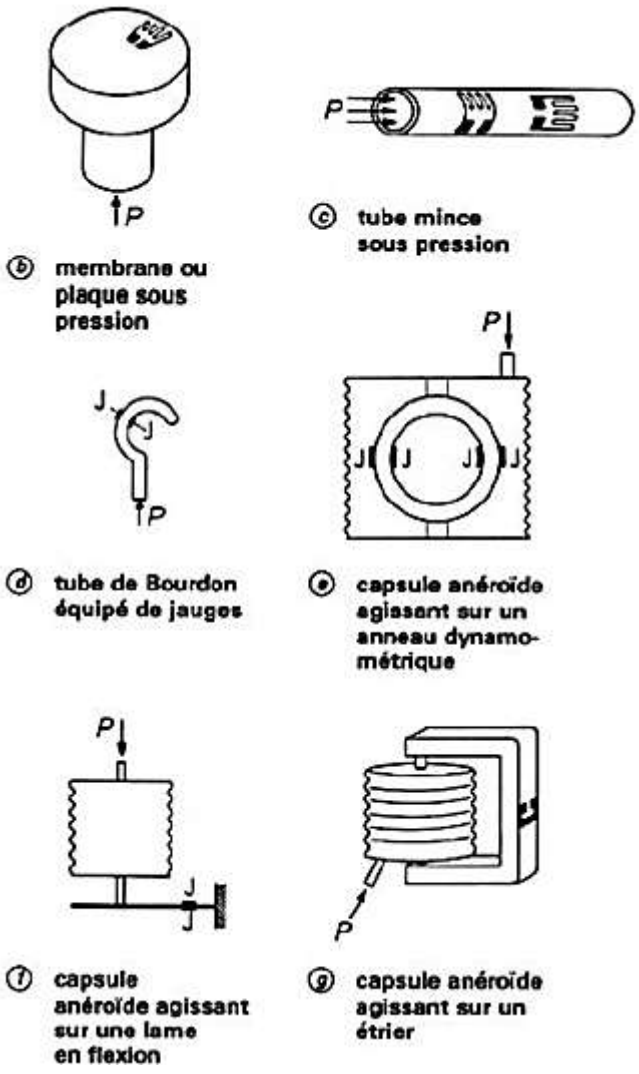


Fig. 2. 10 Torsions, couples [10].



ⓑ membrane ou plaque sous pression

ⓒ tube mince sous pression

ⓓ tube de Bourdon équipé de jauges

ⓔ capsule anéroïde agissant sur un anneau dynamo-métrique

ⓕ capsule anéroïde agissant sur une lame en flexion

ⓖ capsule anéroïde agissant sur un étrier

Fig. 2. 11 Pressions p[10].

2.8.2 Flexion avec un pont complet

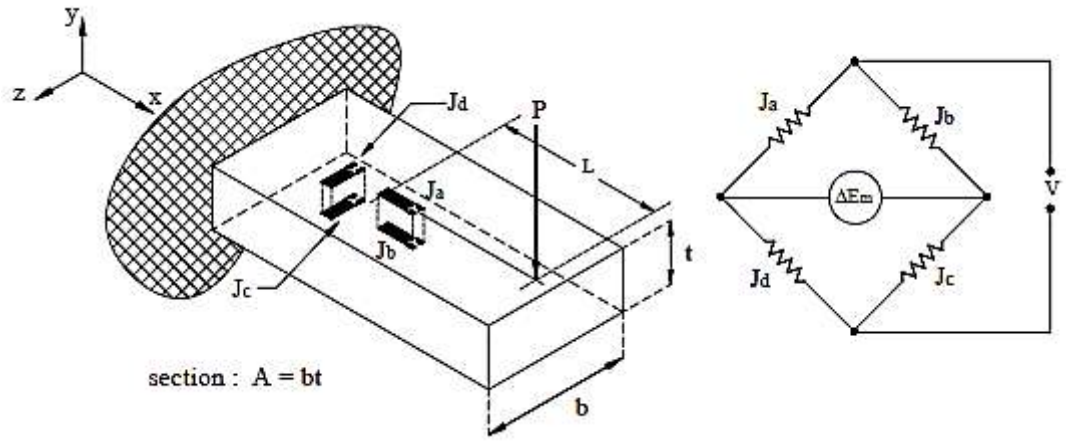


Fig. 2. 12 Mesure de flexion à l’aide d’un plein pont[8].

2.8.3 Type de jauges

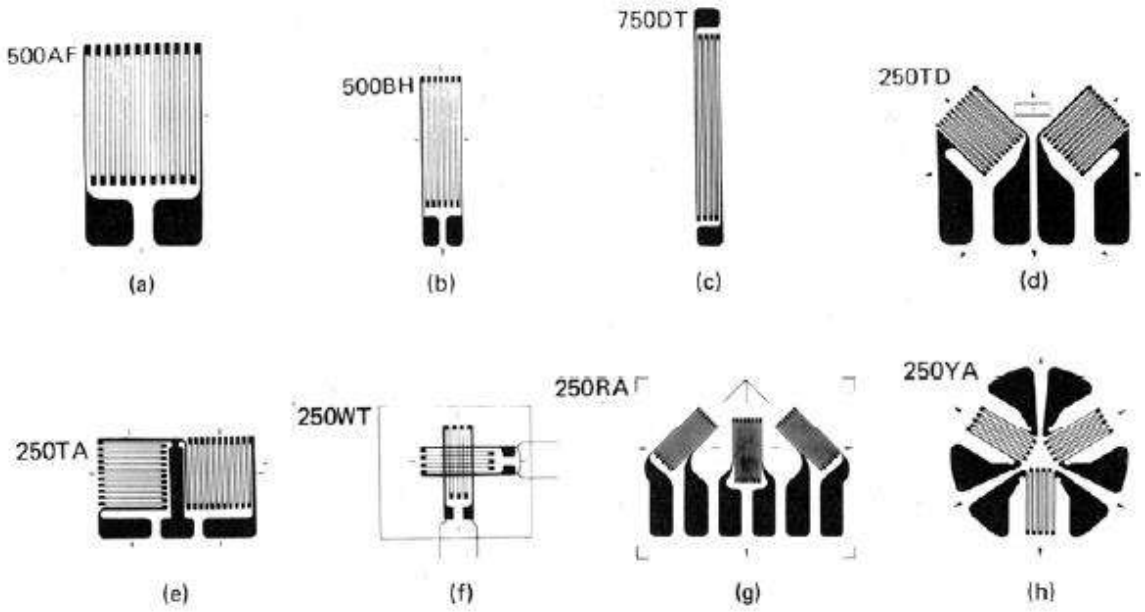


Fig. 2. 13 Exemples de jauges a trame pelliculaire : (a-c) jauges simples ;(d-f) rosettes à deux jauges ;(g-h) rosettes à 3jauges[8]

2.9 Conclusion

Ce chapitre explique que pour assurer la qualité d’une mesure basée sur des jauges de contrainte, il faut prendre en compte de nombreux critères. Les matériaux constituant la jauge, la colle, l’influence des variations de température ou encore le type de montage. Et pour compenser l’influence de la température et des longueurs de câbles, on doit bien choisir le câblage entre la jauge et l’électronique associée.

Chapitre 3 : Chaine d’acquisition

3.1 Introduction

Pour fabriquer un capteur, il doit assembler les parties suivantes :

-une jauge de déformation collée sur le capteur ;

- un pont de Wheatstone et un amplificateur d’instrumentation ;

- une carte Arduino (convertisseur analogique numérique) ;

-un afficheur.

3.2 Définition d’un capteur

Un capteur est un dispositif qui transforme une grandeur physique d'entrée, appelée mesurande [m], en une grandeur de nature électrique (en général) appelée réponse [s].

La relation entre la grandeur électrique et le mesurande doit être univoque[13].

Exemple : capteur de pression à jauges de contraintes mesurande : pression réponse : tension

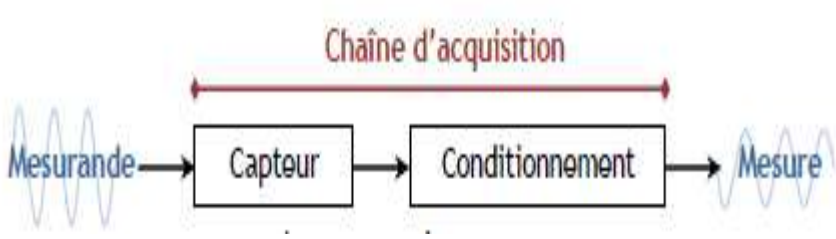


Fig. 3. 1 Schéma de la chaîne d’acquisition d’une mesure[14].

Le mesurande, grandeur physique à mesurer

Une mesure est une représentation quantifiée d'une grandeur physique (température, pression, champ magnétique …). On définit la terminologie suivante :



1. Mesurande : Grandeur physique soumise à un mesurage (pression, température, ...).
2. Mesurage : Toutes les opérations permettant l'obtention de la valeur d'une grandeur physique (mesurande),
3. Mesure : Valeur numérique représentant le mesurande (6 MPa, 20°C, 2 m. s^{-1}...).

Il est à noter qu’il est possible de réaliser des capteurs permettant de mesurer des grandeurs dérivées de la grandeur physique à laquelle ils sont sensibles (vitesse, contrainte mécanique, position ... [13]).

3.2.1 Corps d’épreuve

C'est un dispositif qui traduit le mesurande étudié en une autre grandeur physique non électrique appelée mesurande secondaire.

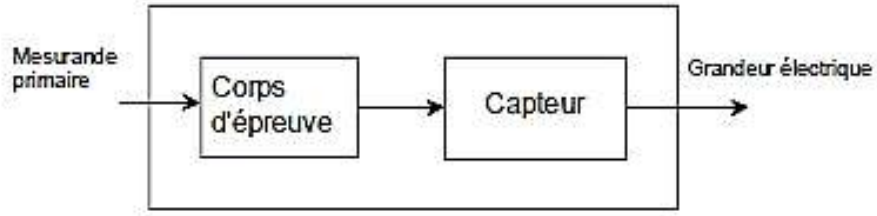


Fig. 3. 2 Corps d’épreuve[13].

3.2.2 Exemples de corps d’épreuve

Mesure d'une accélération à partir d'un capteur de force

Corps d'épreuve : Masse sismique

Accélération : Mesurande primaire

Force : Mesurande secondaire

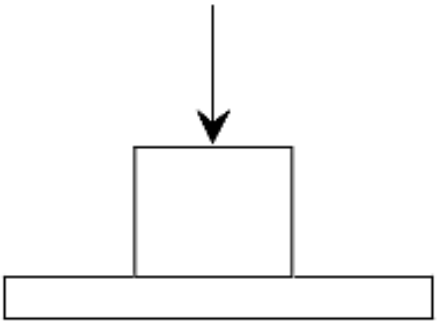


Fig. 3. 3 Masse sismique-Capteur de force[13].

3.3 Classification des capteurs en fonction

- du mesurande qu'il traduise (capteur de température, de pression, ...) ;

- de leur rôle dans un processus industriel (contrôle de produits finis, de sécurité, ...) ;

- du signal qu’ils fournissent :

- capteur analogique (catégorie la plus importante)

- capteur logique (key sensor)

- capteur digitaux

- de leur principe de traduction du mesurande (capteur résistif, à effet de Hall, ...) ;

-de leur principe de fonctionnement :

3.3.1 Capteurs actifs

Fonctionnent en générateur en convertissant la forme d’énergie propre au mesurande en énergie électrique.

Mesurande	Effet utilisé	Grandeur de sortie
Température	Thermoélectricité Pyroélectricité	Tension Charge
Flux lumineux	Photoémission Effet photovoltaïque Effet photoélectromagnétique	Courant Tension Tension
Force Pression Accélération	Piézoélectricité	Charge
Vitesse	Induction magnétique	Tension
Position	Effet Hall	Tension

Tableau 1. 1Quelque propriétés d’un capteur active[13].

3.3.2 Capteurs passifs

Il s’agit d’impédances (très souvent des résistances) dont l’un des paramètres déterminants est sensible au mesurande [13].

Mesurande	Caractéristique électrique sensible	Type de matériaux utilisés
Température Très basse T	Résistivité [ρ] Constante diélectrique [ε]	Métaux : Pt, Ni, Cu Semi-conducteur Verre
Flux lumineux	Résistivité [ρ]	Semi-conducteur
Déformation	Résistivité [ρ] Perméabilité magnétique [μ]	Alliage de Ni, Si dopé Alliage ferromagnétique
Position (aimant)	Résistivité [ρ]	Matériaux Magnétorésistant
Humidité	Résistivité [ρ] Constante diélectrique [ε]	Chlorure de lithium Alumine ; polymère
Niveau	Constante diélectrique [ε]	Liquides isolants

Tableau 1. 2 Quelque propriétés d’un capteur passif[13].

3.4 Caractéristiques métrologiques

Rappel : Chaque application envisagée implique un cahier des charges. On choisit un capteur en fonction de ses attributs ou caractéristiques métrologiques. Ces caractéristiques font référence à des étalonnages réalisés en laboratoire. Elles sont définies quand le régime statique est atteint.

3.4.1 Etendue de mesure

Elle est la plage de valeurs du mesurande pour lesquelles le capteur répond aux spécifications du constructeur.

$$E.M = m_{max} - m_{min}$$

L'unité de l'E.M. est généralement l'unité du mesurande.

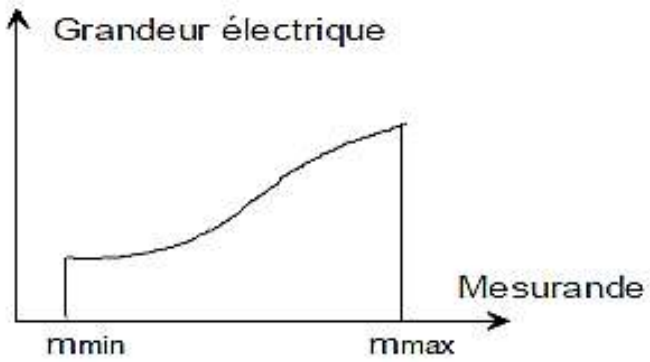


Fig. 3. 4 Plage de mesure[13].

Exemple : Capteur de force à jauges piezorésistives N556-1.

Domaine : Nominal

Mesurande : 0-10 N (E.M)

Température : 0°C à 60°C

3.4.2 Fonction de transfert

C'est la relation fonctionnelle qui relie le mesurande en entrée et la grandeur électrique en sortie du capteur. Elle est définie soit par un graphe, soit par une relation formelle (linéaire, exponentielle, logarithmique…).

Exemples

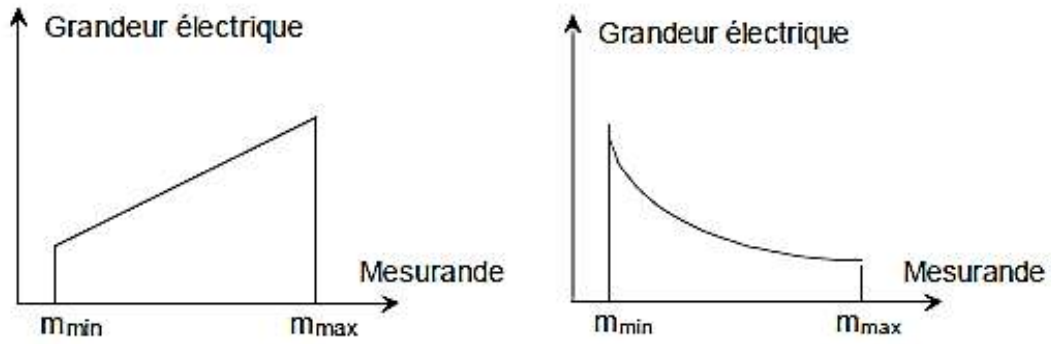


Fig. 3. 5 Une relation fonctionnelle[13].

3.4.3 Sensibilité

La sensibilité S(m) d'un capteur, pour une valeur donnée du mesurande, est égale au rapport de la variation du signal électrique sur la variation du signal physique.

$$S(m) = \left(\frac{\Delta_s}{\Delta_m}\right)_m$$

$$\text{unité de } S = \frac{\text{unité grandeur éléctrique}}{\text{unité mesurande}}$$

Remarque : la sensibilité d'un capteur linéaire est constante.

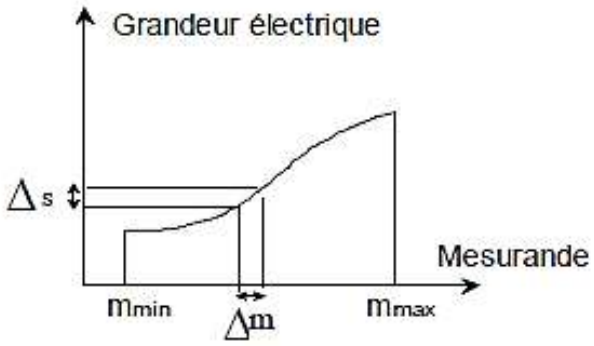


Fig. 3. 6 La sensibilité[13].

3.4.4 Précision

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner une mesure M proche de la valeur vrai m de la grandeur mesurée. L'incertitude de mesure δM est telle que : m = M ± δM

L'erreur relative de précision

$$\frac{\delta M}{M_{max} - M_{min}}$$

Erreur de précision = erreur de justesse + erreur de fidélité

3.4.5 Fidélité

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner, pour une même valeur de la grandeur mesurée, des mesures concordant entre elles. Les résultats de mesures répétées d'une même valeur de mesurande restent groupés autour d'une valeur moyenne.

La fidélité est souvent caractérisée par l'écart type.

3.4.6 Justesse

Elle caractérise l'aptitude d'un capteur à donner des mesures proches de la valeur vraie de la grandeur mesurée, les erreurs de fidélité n'étant pas prise en compte. La valeur la plus probable du mesurande est très proche de la valeur vraie

Illustrations de la fidélité et de la justesse

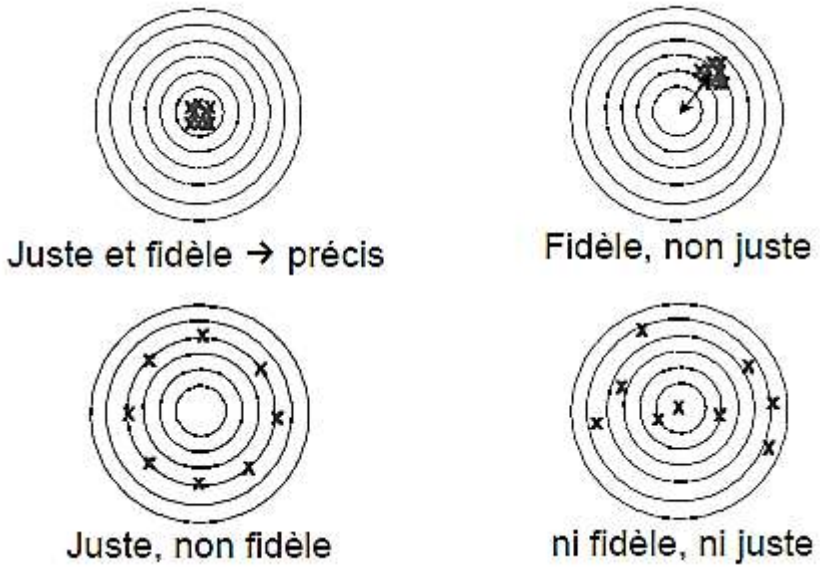


Fig. 3. 7 La fidélité et de la justesse[13].

3.4.7 Hystérésis

Certains capteurs ne retournent pas la même valeur de sortie, pour une même valeur du mesurande, selon la façon où cette valeur est obtenue (cycle croissant ou décroissant). L'hystérésis est la différence maximale entre ces deux valeurs de sortie.

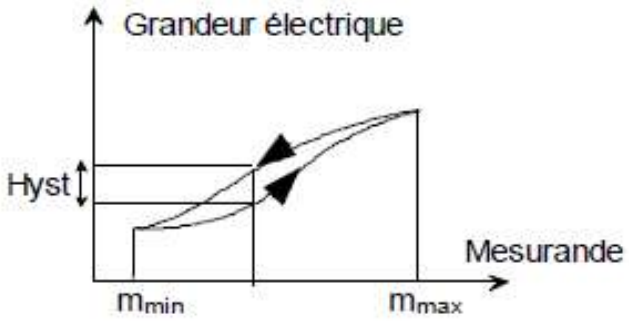


Fig. 3. 8 Hystérésis[13].

3.4.8 Bruit

Les capteurs délivrant une tension électrique génèrent, en plus de l'information sur le mesurande, du bruit. Si ce bruit n'est pas négligeable, alors il limite les performances du capteur. Dans ce cas, le constructeur spécifiera la densité spectrale du bruit, en supposant que le bruit est blanc.

Unité typique : $\frac{\mathrm{V}}{\sqrt{\mathrm{Hz}}}$

3.4.9 Résolution

La résolution est le plus petit incrément du mesurande détectable.

Unité : celle du mesurande.

Si le capteur génère du bruit, la résolution devient dépendante du niveau de bruit. Dans ce cas, elle s'obtient par le rapport de la densité spectrale du bruit sur la sensibilité.

Unité :

$$\frac{\text{unité mesurande}}{\sqrt{\mathrm{Hz}}}$$

3.4.10 Rapidité

Elle caractérise l'aptitude d'un dispositif à répondre aux variations temporelles du mesurande. Elle est spécifiée soit par la bande passante, soit par le temps de réponse. Les dispositifs de la chaîne doivent avoir des bandes passantes compatibles avec le signal de mesure[13].

3.5 Domaines d’utilisation des capteurs

Tous les domaines d’activité nécessitent l’emploi de capteurs

Exemples :

- automobile : domaine principal ;

- contrôle de la production ;

- agriculture ;

- sécurité ;

- médical (domaine du micro capteur) ;

- électroménager.

3.6 La chaine d’acquisition des données

La traduction par un capteur d’un mesurande en grandeur n’est généralement pas appropriée à son exploitation. Les capteurs sont les premiers éléments d’une chaîne de mesure ou chaîne d’acquisition de données. Ce sont les interfaces entre le "monde physique" et le "monde électrique".

3.6.1 Rôle de la chaîne

- recueillir les informations nécessaires à la connaissance de l’état d’un système ;

- délivrer ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

Sachant que l'état d'un système est caractérisé par des grandeurs physiques ou chimiques appelées mesurandes.

Assigner une valeur (un nombre) à un mesurande.

3.6.2 Constitution de la chaîne

Généralement, elle est constituée de 3 parties :

- acquisition des données (analogique)

Capteurs, conditionneurs, amplificateurs, multiplexage.

- transformation des données.

CAN.

- traitement des données.

Calculateur.

3.7 Amplification

Lorsque les signaux électriques issus des capteurs sont de faible amplitude, il peut être nécessaire de les amplifier pour les adapter à la chaîne de transmission. Il faut savoir que l’amplification (en tension ou en puissance) du signal électrique issu du capteur est un phénomène bruyant : elle s’accompagne d’une dégradation du rapport signal sur bruit. Cela signifie que si l’amplitude du signal utile issue du capteur se trouve augmentée, les parasites (bruit) le sont également mais dans des proportions plus grandes encore.

Les amplificateurs d’instrumentation sont conçus de manière à optimiser le rapport signal sur bruit, c’est à dire à « peu » le dégrader. Ils sont caractérisés par un gain d’amplification (en tension ou en puissance) ratio du signal électrique de sortie de l’amplificateur sur le signal d’entrée, ainsi que par un facteur fruit $F > 1$ qui quantifie la dégradation du rapport signal sur bruit entre l’entrée et la sortie[14].

3.8 Conversion analogique/numérique

La conversion analogique/numérique consiste à transformer la tension analogique (issue du capteur) en un code binaire (numérique) adapté à son exploitation dans un processus de régulation, de contrôle, de calculs ou encore de stockage. La conversion analogique/numérique n’est pas systématique, un stockage ou une régulation pouvant également être réalisés à partir de données analogiques.

Le convertisseur analogique numérique (CAN) transforme le signal analogique, signal continûment variable pouvant prendre une infinité de valeurs, en un signal numérique, signal discontinu pouvant être représenté aux moyens de données binaires (0 et 1). La conversion analogique/numérique comporte deux étapes, l’échantillonnage et la conversion proprement

dite. L’échantillonnage est une opération qui doit satisfaire un juste équilibre entre précision et rapidité[14].

La rapidité à laquelle sont prélevés les échantillons doit permettre une reconstruction fidèle du signal, elle est représentée par la fréquence d’échantillonnage f_e qui doit être suffisamment grande pour retranscrire les variations rapides du signal (**Fig.3.9**). Le théorème d’échantillonnage aussi dénommé théorème de Shannon-Nyquist, permet de déterminer la fréquence d’échantillonnage d’un signal donné. Il énonce que la reconstruction d’un signal de sortie fidèle au signal d’entrée, requiert de choisir une fréquence d’échantillonnage qui soit au moins deux fois supérieure à la fréquence maximale contenue dans le signal d’entrée, soit[14]:

$$f_e \geq 2f_{Max}$$

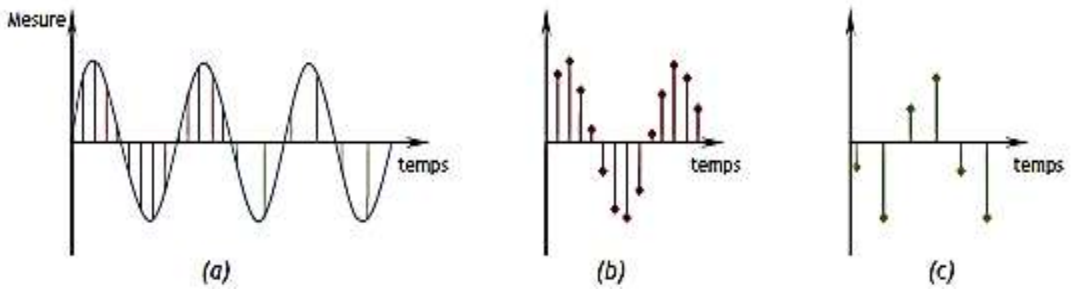


Fig. 3.9 Echantillonnages d’un signal de mesure (a) avec une fréquence d’échantillonnage plus élevée dans le cas (b) que le cas (c), fe_b>fe_c [14].

3.9 La carte d’acquisition

3.9.1 Arduino

L’Arduino est une carte électronique en Matériel Libre pour la création artistique interactive. Elle peut servir:

1/ Pour des dispositifs interactifs autonomes simples ;

2/ Comme interface entre capteurs/actionneur ordinateur ;

3/ comme programmateur de certains microcontrôleurs[15].



Fig. 3. 10 La carte Arduino[16].

Une carte électronique est un support plan, flexible ou rigide, généralement composé d’époxy ou de fibre de verre. Elle possède des pistes électriques disposées sur une, deux ou plusieurs couches (en surface et/ou en interne) qui permettent la mise en relation électrique des composants électroniques. Chaque piste relie tel composant à tel autre, de façon à créer un système électronique qui fonctionne et qui réalise les opérations demandées.

Un programme utilisateur Arduino est une suite d’instructions élémentaires sous forme textuelle, ligne par ligne. La carte lit puis effectue les instructions les unes après les autres, dans l’ordre défini par les lignes de code[16].

Dans ce projet on définit la carte Arduino comme un convertisseur analogique numérique (CAN).

3.9.2 Les types de cartes

Il y a trois types de cartes

-Lesdites « officielles » qui sont fabriquées en Italie par le fabricant officiel : Smart Projects

-Lesdits « compatibles » qui ne sont pas fabriqués par Smart Projects, mais qui sont totalement compatibles avec les Arduino officielles.

-Les « autres » fabriquées par diverse entreprise et commercialisées sous un nom différent (Freeduino, Seeduino, Femtoduino, …).

3.9.3 Les différentes cartes

Des cartes Arduino il en existe beaucoup ! Voyons celles qui nous intéressent… La carte Uno et Duemilanove Nous choisirons d’utiliser la carte portant le nom de « Uno» ou « Duemilanove ». Ces deux versions sont presque identiques[16].

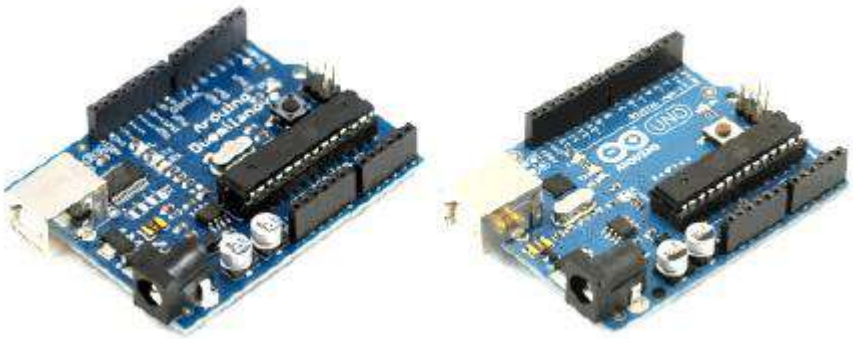


Fig. 3. 11 Carte Arduino “Duemilanove” et “Uno” avec laquelle nous allons travailler[16].

La carte Mega, la carte Arduino Mega est une autre carte qui offre toutes les fonctionnalités de la carte précédente, mais avec des fonctionnalités supplémentaires. On retrouve notamment un nombre d’entrées et de sorties plus important ainsi que plusieurs liaisons séries[16].

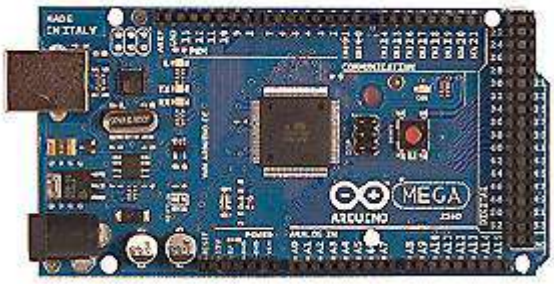


Fig. 3. 12 Carte Arduino “Méga”[16].

Il existe encore beaucoup d’autres cartes.

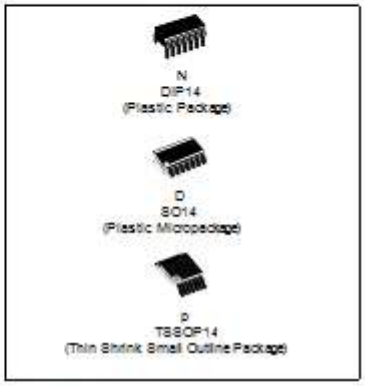
3.10 Extrait de la documentation sur l'amplificateur

Nous avons utilisés l’amplificateur TL084 pour amplifier les tensions de sortie car il y a très faibles variations de résistance (de l’ordre de quelques microhms dans le cas des jauges).

TL084
TL084A - TL084B

GENERAL PURPOSE J-FET
QUAD OPERATIONAL AMPLIFIERS

- WIDE COMMON-MODE (UP TO V_{CC}^+) AND DIFFERENTIAL VOLTAGE RANGE
- LOW INPUT BIAS AND OFFSET CURRENT
- OUTPUT SHORT-CIRCUIT PROTECTION
- HIGH INPUT IMPEDANCE J-FET INPUT STAGE
- INTERNAL FREQUENCY COMPENSATION
- LATCH UP FREE OPERATION
- HIGH SLEW RATE : 16V/µs (typ)



ORDER CODE

Part Number	Temperature Range	Package		
		N	D	P
TL084M/AM/BM	-55°C, +125°C	•	•	•
TL084I/AI/B	-40°C, +105°C	•	•	•
TL084C/AC/BC	0°C, +70°C	•	•	•
Example : TL084CN, TL084CD				

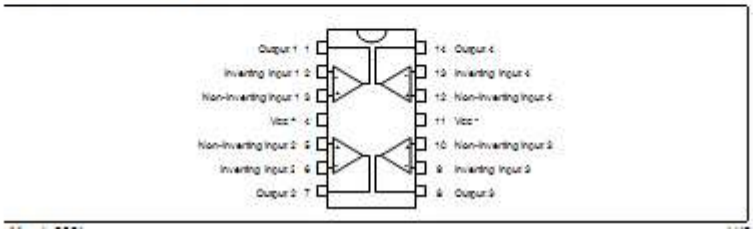
N = Dual In Line Package (DIP)
D = Small Outline Package (SO) - also available in Tape & Reel (DT)
P = Thin shrink Small Outline Package (TSSOP) - only available in Tape & Reel (PT)

DESCRIPTION

The TL084, TL084A and TL084B are high speed J-FET input quad operational amplifiers incorporating well matched, high voltage J-FET and bipolar transistors in a monolithic integrated circuit.

The devices feature high slew rates, low input bias and offset currents, and low offset voltage temperature coefficient.

PIN CONNECTIONS (top view)



3.11 Conclusion

Chapitre III : ‘’chaine d’acquisition’’

Dans ce chapitre, une chaine d’acquisition de la tension de sortie du pont est réalisée. La chaine permet d’amplifier la tension analogique avant de la convertir en en signal numérique. Les capteurs sont les premiers éléments constitutifs de la chaine, ils représentent l’interface entre grandeurs mécaniques et électriques.

Chapitre 4 : Parité pratique

4.1 Introduction

Dans le domaine des essais mécanique, la mesure précise des déformations est une étape très importante dans l'évaluation des contraintes et des forces. Afin d'y parvenir, l'extensométrie est, de nos jours, la technique la plus fiable et la plus précise. Elle consiste à utiliser différents types de capteurs, eux même, constitués de jauges extensométriques.

Dans ce mémoire, un capteur de charge formé par un pont de jauges est dimensionné afin de mesurer des charges statiques dans une plage déterminée à l'avance.

4.2 Description

Le principe de fonctionnement consiste à déformer un capteur de force dont la plage de mesure est comprise entre 0 et 20 kg. Le support, en aluminium est encastré à une extrémité et support des charges sur l'autre extrémité (sur un plateau). Sur ce capteur se trouvent collées quatre jauges de contraintes avec un montage en pont complet. Ces jauges sont des petites résistances dont la valeur varie avec la déformation. **Fig. 4.1.**

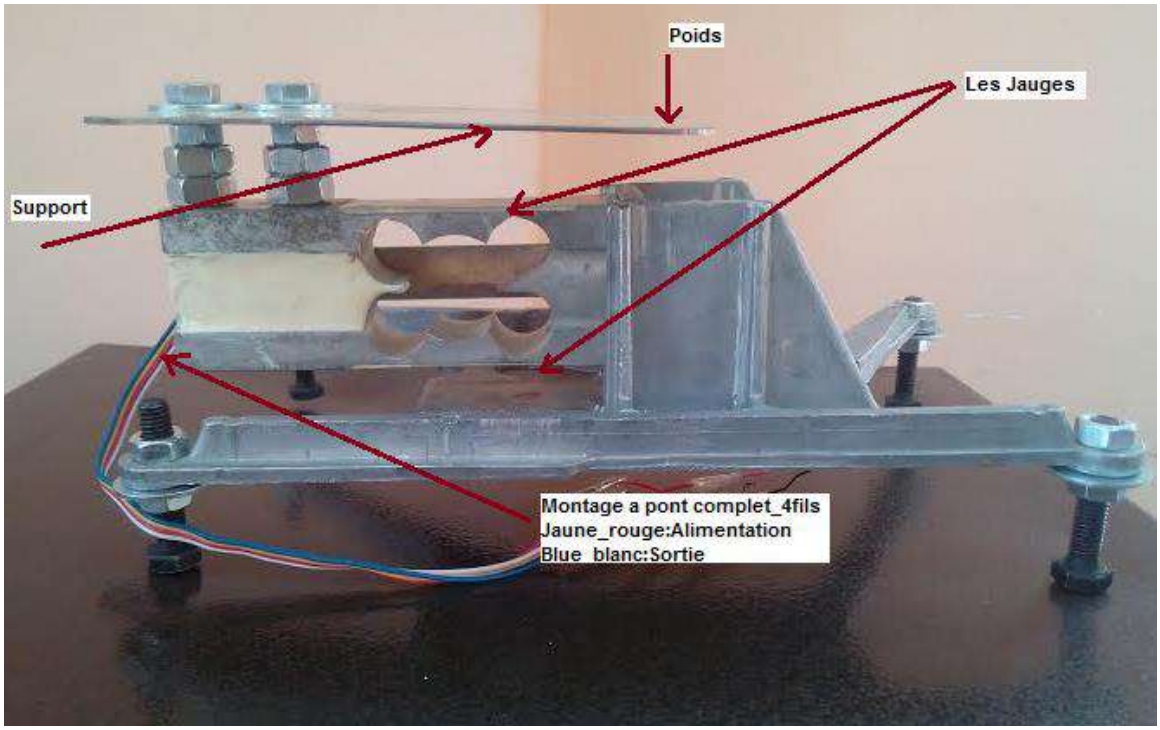


Fig. 4. 1 Capteur des déformations

A l'aide d'un petit programme MATLAB relié avec la carte « Arduino », et d'une réalisation du montage électrique basé sur l'amplificateur TL084. Voici les calculs de déséquilibrer du pont :

Masse g	Tension amplifié V	Masse g	Tension amplifié V
0	2,4609	373	2,4902
56	2,4658	429	2,5
82	2,4707	485	2,5049
110	2,4756	500	2,5098
179	2,4805	607	2,5146
261	2,4854	629	2,5195
317	2,4902	705	2,5244

Tableau 4. 1 Valeurs mesurées.

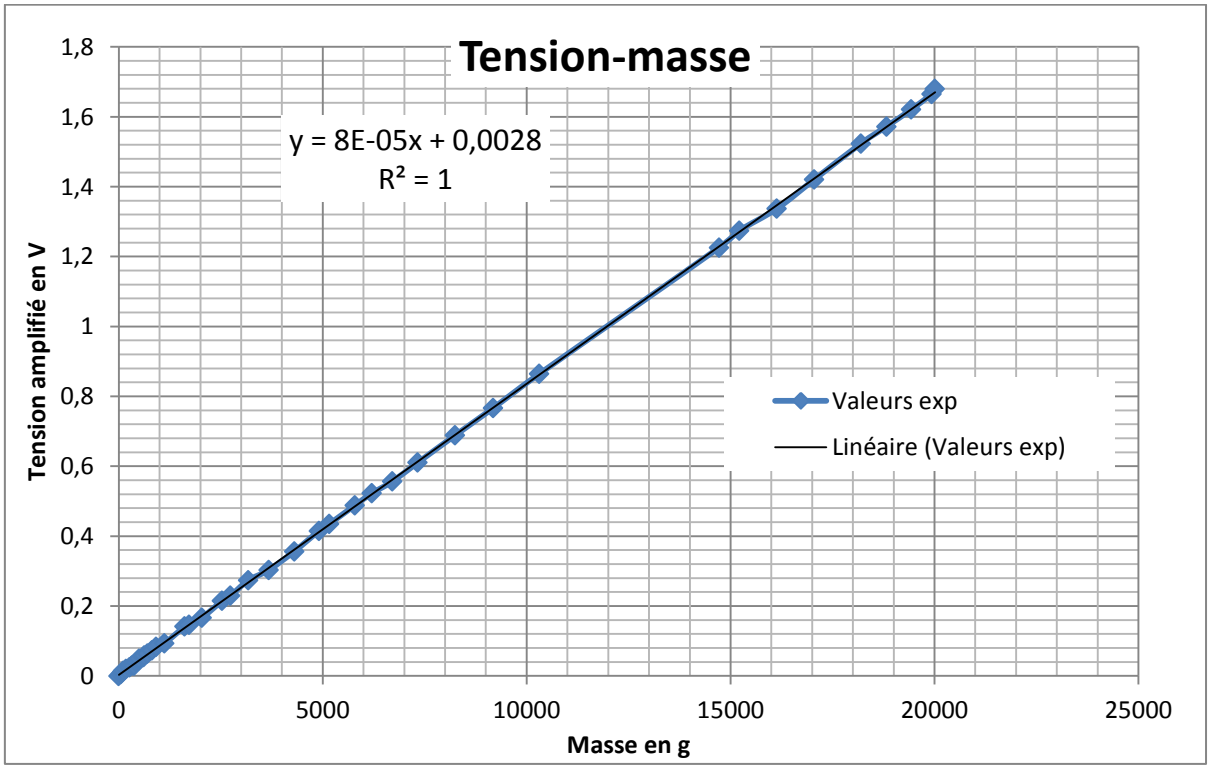


Fig. 4. 2 Etalonnage du capteur (tension amplifié –tension à repos).

2,4609= Valeur de la tension au repos (**TR**).

Poids(N)= Masse*9,80665/1000.

4.3 Formules de conversion des déformations en tensions pour les différents montages en pont de Wheatstone à base de jauges extensométriques[8]

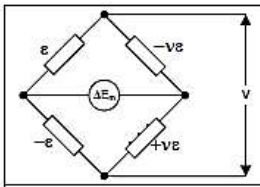
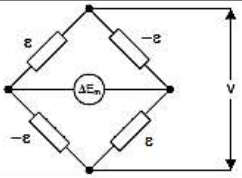
	flexion pont complet 2 jauges mesurent l'effet de Poisson	$\frac{\Delta E_m}{V} = \frac{S_G \cdot \varepsilon}{2}(1+\nu)$	Linéaire
	arbre en torsion pont complet	$\frac{\Delta E_m}{V} = S_G \cdot \varepsilon$	Linéaire

Fig. 4. 3 Linéarité des différents montages en pont de Wheatstone[8].

S_G =Facteur de jauge

ε En µm

On utilise la formule suivante pour Quatre jauges actives dont deux adjacentes subissant l'effet de Poisson. Par exemple, poutre en flexion.

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{k\varepsilon(1+\nu)\times 10^{-3}}{2}$$

$\nu = 0.34$

$k = 2$

$V_e = 5V$

$$\varepsilon = \frac{V_s}{5 \times (1 + 0.34)} \qquad \mu m/m$$

$$V_s = \text{tension de sortie(mV)} = \frac{\text{Tension V}}{220} \qquad \text{mV}$$

4.4 Calcule la pression

$$\text{pression(MPa)} = \frac{\text{poids(N)}}{\text{section(mm)}}$$

$$S = 2 \times 50.251 \qquad mm^2$$

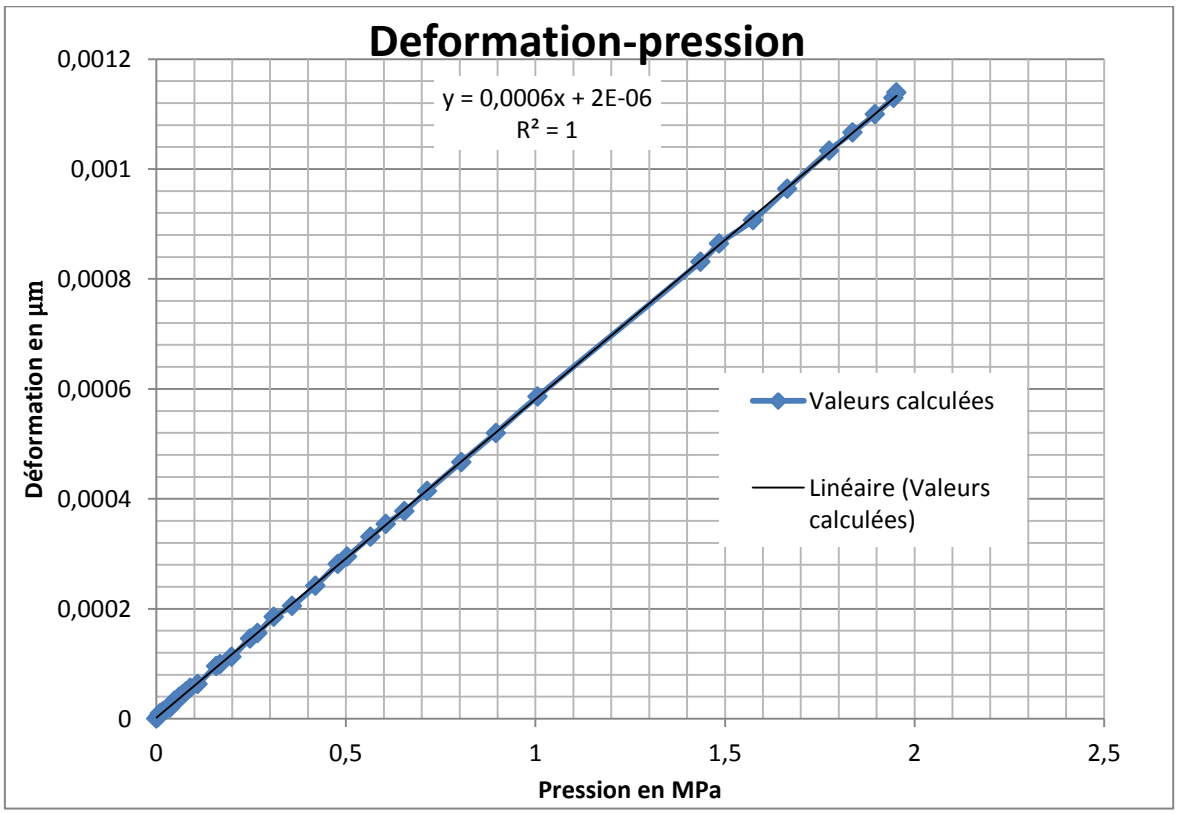


Fig. 4. 4 Coubre déformations _ pression.

4.5 Calcule des déformations à base de courbe de déformation-pression

$$\text{def calculée} = 0.0006 \times \text{pression}$$

Pression	Def calculée	Pression	Def calculée	Pression	Def calculée
0	0	0,6	0,00036	1,2	0.00072
0,1	0,00006	0,7	0,00042	1,3	0.00078
0,2	0,00012	0,8	0,00048	1,4	0,00084
0,3	0,00018	0,9	0,00054	1,5	0,0009
0,4	0,00024	1	0,0006	1,6	0,00096
0,5	0,0003	1,1	0,00066	1,7	0,00102

Tableau 4. 2 Valeurs de déformation calculées.

4.6 Les résultats d'ANSYS

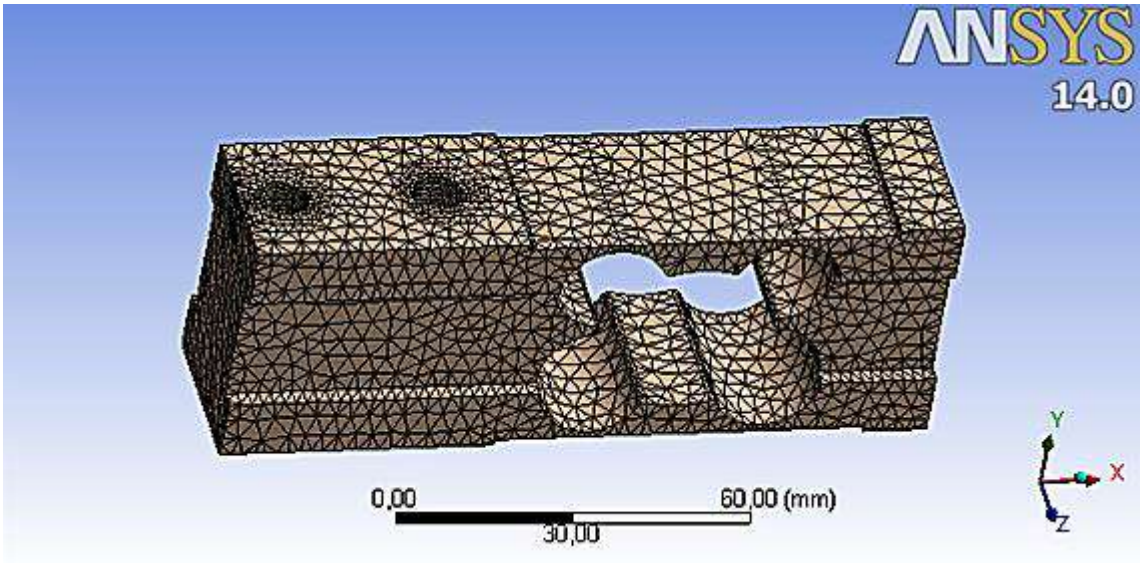


Fig. 4. 5 Modèle (A4) > Maillage

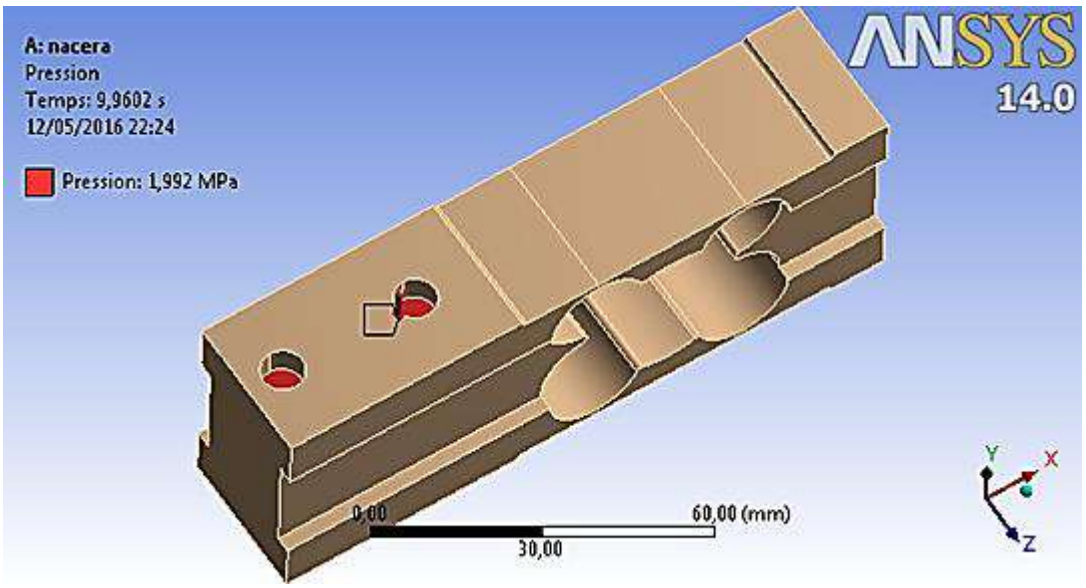


Fig. 4. 6 Modèle (A4) > Structure statique (A5) > Charges.

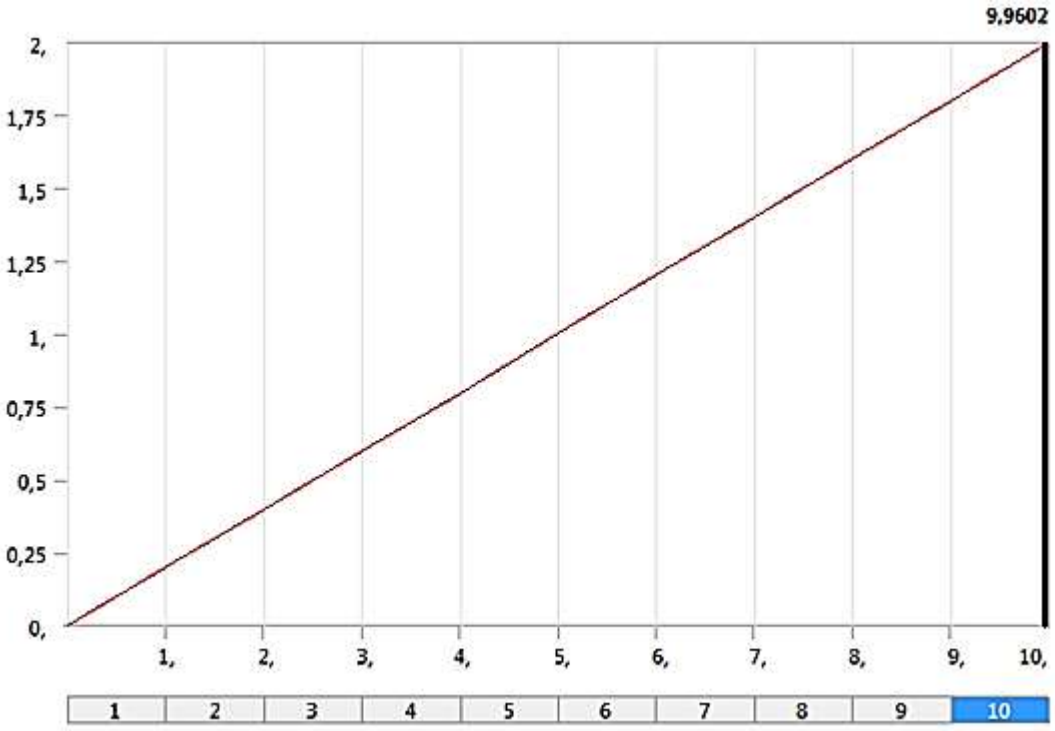


Fig. 4. 7 Graphique : pression en fonction du temps.

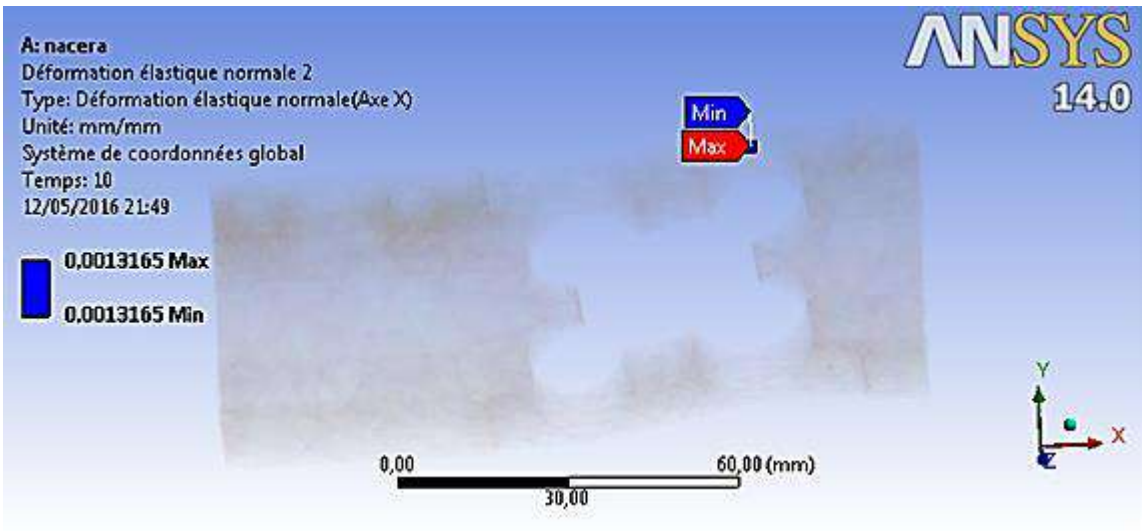


Fig. 4. 8Modèle (A4) > Structure statique (A5) > Solution (A6) > Déformation élastique normale2.

TABLEAU 34
Modèle (A4) > Structure statique (A5) > Solution (A6) > Déformation élastique normale 2

Temps [s]	Minimum [mm/mm]	Maximum [mm/mm]
1,	1,3165e-004	1,3165e-004
2,	2,633e-004	2,633e-004
3,	3,9495e-004	3,9495e-004
4,	5,2661e-004	5,2661e-004
5,	6,5826e-004	6,5826e-004
6,	7,8991e-004	7,8991e-004
7,	9,2156e-004	9,2156e-004
8,	1,0532e-003	1,0532e-003
9,	1,1849e-003	1,1849e-003
10,	1,3165e-003	1,3165e-003

Fig. 4. 9 Donnée tabulaire

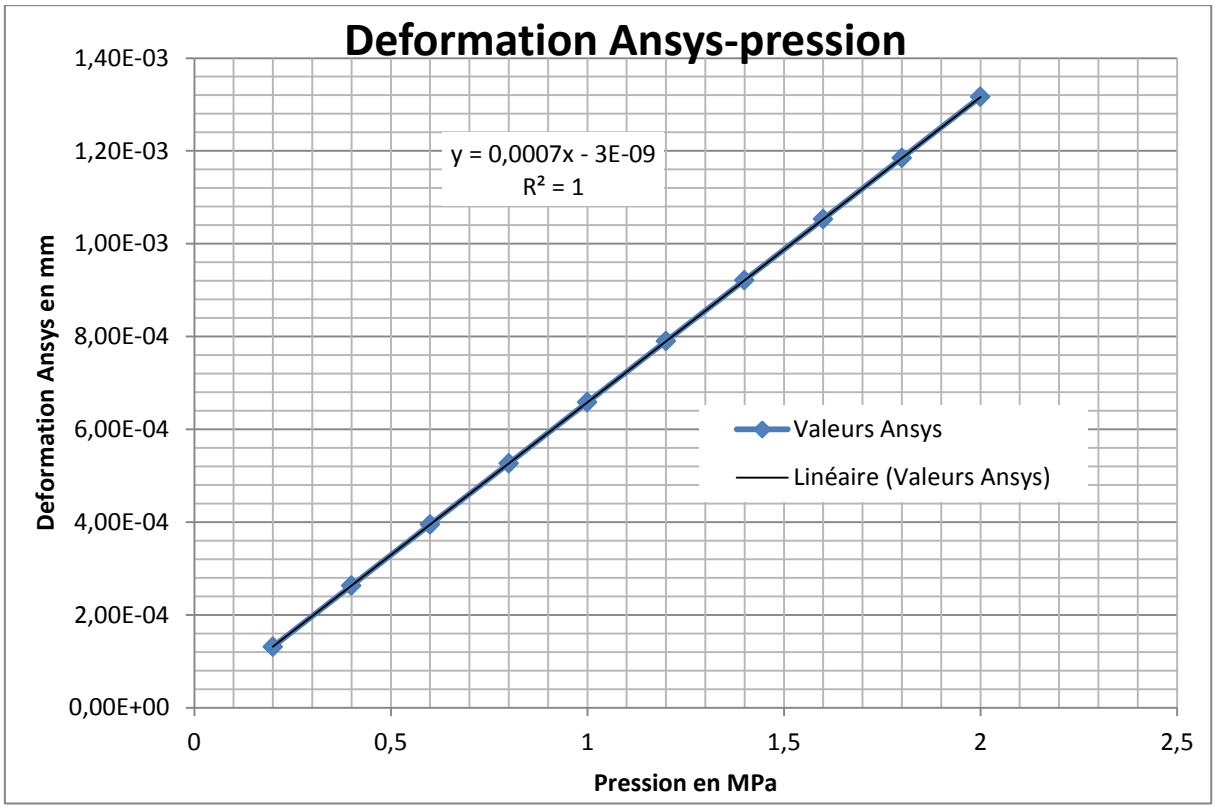


Fig. 4. 10 Courbe déformation Ansys-pression.

Quand on comparer les deux graphiques ‘déformations –pression’ et ‘déformations Ansys-pression’, on trouve les valeurs pratiquement identiques.

4.7 Les caractéristiques du capteur

4.7.1 Etendue de mesure

La plage des valeurs du poids est :

$$P_{min} = 50g$$

$$P_{max} = 20Kg$$

4.7.2 Fonction de transfert

y = 11998x - 33,902 (y=Masse, x=Tension)

y = 8E-05x + 0, 0028(y= Tension, x=Masse)

4.7.3 La linéarité

Le capteur et linéaire. $R^2 = 1$

4.7.4 La sensibilité

La sensibilité d'un capteur linéaire est constante.

4.8 Conclusion

Dans ce chapitre, le capteur est conçu, dimensionné et simulé sous ANSYS pour voir si les contraintes générées dans la plage de mesure (0-20 Kg) restent dans le domaine élastique.
Ensuite, le capteur a été connecté à la chaine de d'acquisition, et une opération d'étalonnage réalisée avec un chargement graduel appliqué. Les valeurs des tensions de sortie sont converties en déformations, ensuite en charge concentrées. Une courbe de tendance est tracée pour pouvoir interpoler n'importe quelle charge dans la plage de mesure.

Conclusion Générale

Dans ce projet de fin d'études de Master Mécatronique, nous avons conçu et réalisé un capteur de force à base de jauge extensométriques. Afin d'y parvenir, nous avons acquis la théorie nécessaire à la compréhension du fonctionnement des jauges de déformation. Cette théorie est basée sur les notions de la mécanique des milieux continus.

Ensuite, et selon les différents types de montages de jauges, disponibles dans la bibliographie, nous avons adopté un montage en pont complet linéaire, recommandé pour les poutres en flexion. Les quatre jauges, constituant le pont, sont fixés sur un support en aluminium conçu sous SolidWorks2013 et dimensionné sous Ansys14.

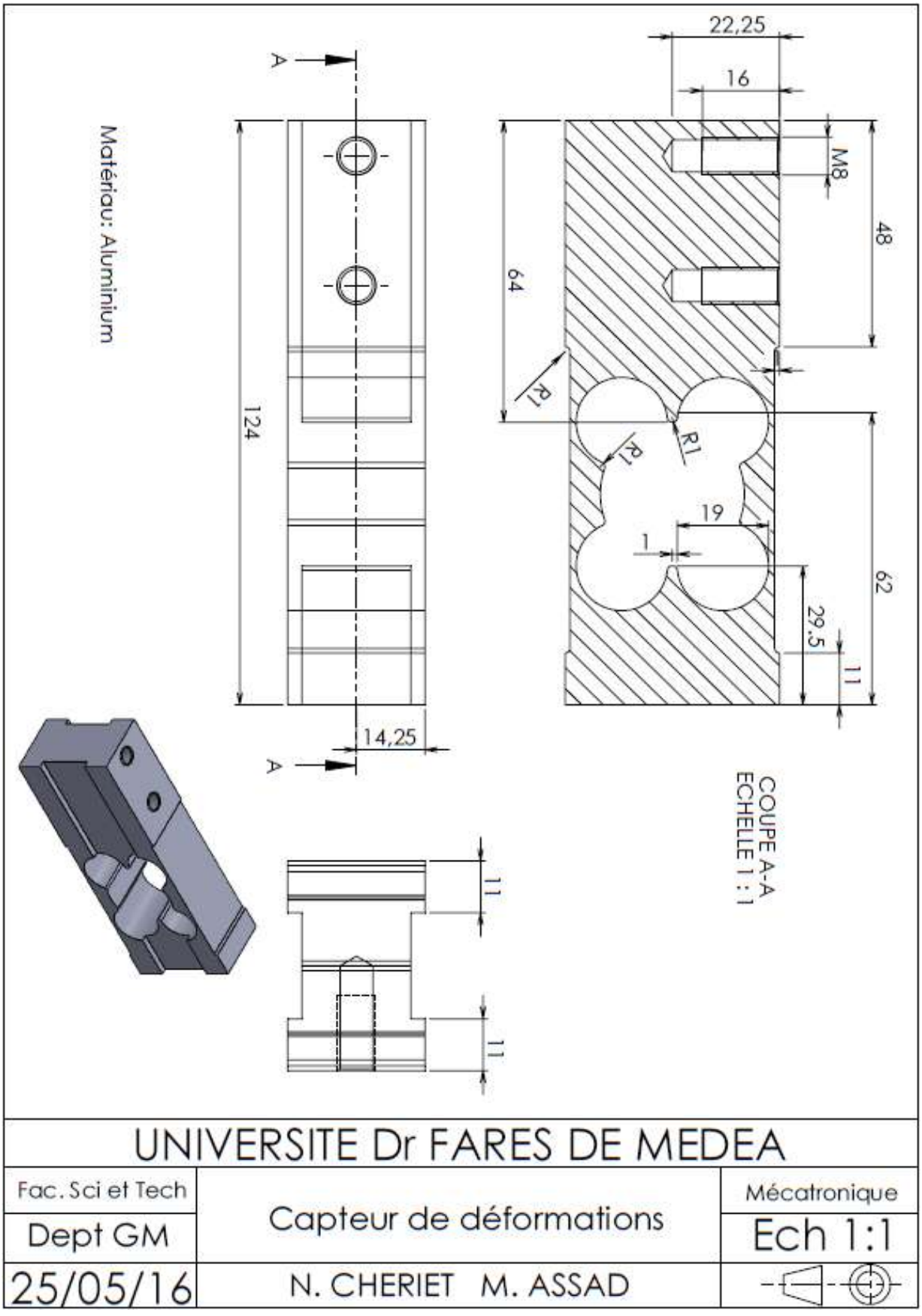
Afin de pouvoir utiliser le capteur, la tension de sortie du pont est amplifiée ensuite transformée via les formules de conversion tension-déformation, et affichée au moyen d'un programme Matlab-Arduino. Pour cela, nous avons réalisé un circuit imprimé, support des composants électronique de la chaine d'acquisition.

Des essais d'étalonnage du capteur sont réalisés pour déterminer ses limites (plage de mesures) et à l'issu de ses essais, une courbe de corrélation tension- charge est déduite. Cette courbe est utilisée pour afficher n'importe quelle charge appliquée dans le domaine de mesure.

Enfin, et comme perspective à ce travail, nous recommandons l'utilisation des résultats de ce mémoire pour adapter un capteur de charge (déformation) à la machine de traction disponible au niveau du laboratoire de RDM dans le Hall technologie.

Les résultats des essais

Masse (g)	Tension de sortie(V)	(Tension-**TR**)(V)
0	2,4609	0,0000
56	2,4658	0,0049
82	2,4707	0,0098
110	2,4756	0,0147
179	2,4805	0,0196
261	2,4854	0,0245
317	2,4902	0,0293
373	2,4902	0,0293
429	2,5000	0,0391
485	2,5049	0,0440
500	2,5098	0,0489
607	2,5146	0,0537
629	2,5195	0,0586
705	2,5244	0,0635
811	2,5342	0,0733
918	2,5439	0,0830
1118	2,5537	0,0928
1618	2,6025	0,1416
1725	2,6074	0,1465
2036	2,6270	0,1661
2536	2,6758	0,2149
2740	2,6904	0,2295
3175	2,7344	0,2735
3675	2,7637	0,3028
4304	2,8174	0,3565
5160	2,8955	0,4346
6208	2,9834	0,5225
7328	3,0713	0,6104
8246	3,1494	0,6885
9181	3,2275	0,7666
10309	3,3252	0,8643
14718	3,6865	1,2256
15218	3,7354	1,2745
16138	3,7983	1,3374
17056	3,8818	1,4209
18195	3,9844	1,5235
19431	4,0820	1,6211
19931	4,1260	1,6651
20013	4,1406	1,6797



UNIVERSITE Dr FARES DE MEDEA		
Fac. Sci et Tech	Capteur de déformations	Mécatronique
Dept GM		Ech 1:1
25/05/16	N. CHERIET M. ASSAD	

[1] Jean-Claude Charmet, Mécanique du solide et des matériaux-Elasticité-Plasticité-Rupture, 1998.

[2] webographique« http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s1/deform.html ».

[3] « Le solide élastique linéaire, ou solide de Hooke »,

[4] Yves Debard, Elasticité,

[5] Marc Blétry, Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux, Livre 2006-2007.

[6] g. cailletaud, S.CANTOURNET, Mécanique des matériaux solides, notes de cours, Mars 2012,

[7] Itterbeek, résistance des Matériaux, « Flexion ».

[8] notions d'éxtensométrie par jauge à résistance électrique.

[9] Encyclopédie VISHAY d'analyse des contraintes 1974.

[10] J.-L. L. GOËR et Jean AVRIL, Capteurs à jauges extensométriques. École Technique Supérieure du Laboratoire.

[11] Patrick Robert, MESURES MÉCANIQUES Des jauges, des pont et une solution de câblage pour chaque cas. HBM France.

[12]les jauges de déformation, Mars2002.

[13] Gwenaëlle TOULMINET, Généralités sur la chaîne d'acquisition des données et sur les capteurs, 2002-2003.

[14] Hélène HORSIN MOLINARO, Eric VOURC'H, et Jean-Pierre BARBOT, Capteurs et chaîne d'acquisition, 18/06/2015.

[15] Jean-Noël Montagné, Initiation à la mise en œuvre matérielle et logicielle de l'Arduino, livre, Centre de Ressources Art Sensitif, Novembre 2006.

[16]Simon Landrault (Eskimon) et Hippolyte Weisslinger (olyte), Arduino : Premiers pas en informatique embarquée, livre, 19 juin 2014.