REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Département du **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : **Electronique**

Spécialité : **Instrumentation**

Conception et réalisation d'un système de mesure de charges mécaniques adapté à un dispositif de compression à base d'un microcontrôleur

---

Présentés par :

Mr.BELKHEIR Salim

Mr.BENYAHIA Ahmed

Proposés et Dirigés par :

Dr. BENTOUATI Smain

Dr. AMOURA Nasreddine

Promotion 2022

Remerciement

Je commence par remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour pouvoir réalisé ce modeste travail.

J'aimerais chaleureusement remercier Dr AMOURA Nasreddine et Dr. BENTOUATI Smain. Ils ont accepté de nous accompagner, dans des circonstances particulières, afin que nous puissons enfin relever ce défi stimulant.

Les membres de jury qui voudront bien évaluer notre travail.

J'ai aussi une importante dette de gratitude à l'endroit de ma mere, qui m'a encouragé tellement pour vivre cette experience.

je dédie ce mémoire a ma grand-mère Khadidja, mais aussi, et de plus en plus, ma fille MERIEM et mes fils IMAD et NASSIM, mes soeurs et mes frère et leurs memberes de la petite famille: Mohamed, amina, Naima, Fatiha, Lyes mon ami et frere Djamel.

Ma conjointe Fatima, a droit, elle aussi, à toute mon appréciation. Elle a dû et su conjuguer, au fil des ans, ses obligations personnelles et professionnelles avec nos responsabilités parentales a son pere Amor et sa mere fatma ces frères et soeurs Wahiba ; Malika,Hanane; Bachir, Sadek, Lakhdar,Rafik,Ayoub.
Mais, j'offre specialement tout ce travail à celui qui sans le savoir m'a servi de source d'inspiration, , de modèle, de repoussoir, et à partir duquel j'ai forgé mon identité et que je suis devenu qui je suis. Ce memoire est pour vous papa!

A la memoire de mon grand pere et mon frère Nassim qui nous a quitté, paix a ses ames

BELKHEIR Salim.

Remerciement

Je commence par remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, l'amour du savoir et surtout la patience pour pouvoir réalisé ce modeste travail.

J'aimerais chaleureusement remercier Dr AMOURA Nasreddine et Dr. BENTOUATI Smain. Ils ont accepté de nous accompagner, dans des circonstances particulières, afin que nous puissons enfin relever ce défi stimulant.

Les membres de jury qui voudront bien évaluer mon travail

A toute personne qui a contribué de près ou de loin a la réalisation de ce modeste travail et a tous ceux qui m'ont apporté leurs aides.

je dédie ce mémoire a mon pere Brahim , mes frere et mes soeurs et ma conjointe et aussi a mes amis

J'offre specialement tout ce travail à la memoire de mon frère boudherssaia et sa fille et ma mere qui nous a quitté, paix a ses ames.

BENYAHIA Ahmed.

ملخص

لقد وجدت مقاييس الإجهاد العديد من مجالات التطبيق مثل الصناعة والبيئة والهندسة المدنية والهندسة الميكانيكية وحتى المجال الطبي.

ساعد التطور الرقمي في حدوث هذه التكنولوجيا في أنظمة وأجهزة قياس متعددة.

سيجمع عملنا أو يجمع بين هذه التقنيات القديمة والرقمية الحديثة لتحقيق نظام قياس القوة والتشوه.

الكلمات المفتاحية: مقياس الإجهاد ، جسر ويتستون ، تشوه ، حساس القوة ، اردوينو ،مضخم تجهيز.

Abstract

Strain gauges have found several fields of application such as in industry, the environment, civil engineering, mechanical engineering and even the medical field.

Digital development has helped this technology to take place in multiple measurement systems and instrumentation.

Our work will assemble or bring together these old analog technologies with modern digital to achieve a force and deformation measurement system.

Keywords: strain gauge, Wheatstone bridge, deformation, force sensor, Uno, instrumentation amplifier, measurement.

Résumé

Les jauge de contraintes ont trouvé plusieurs champs d’applications tel que dans l’industrie, l’environnement, génie civile, génie mécanique et même domaine médical.

Le développement numérique à aider cette technologie à prendre place dans multiples systèmes de mesure et instrumentation.

Notre travail va assembler ou réunir ces technologies analogiques ancienne avec le numérique moderne pour réaliser un système de mesure de force et de déformation.

Mots clés : jauge de contrainte, pont de Wheatstone, déformation, capteur de force, arduino Uno, amplificateur d’instrumentation,

Table des matieres

Introduction générale ..... **Error! Bookmark not defined.**
1.1 FONCTIONNEMENT DES JAUGES DE CONTRAINTES..... 3
1.1.1 Facteur de jauge..... 4
1.2 Les différents types de jauges de contraintes 4
1.2.1 Les jauges métalliques 5
1.2.2 Jauges soudables pour haute température 7
1.3 Les paramètres d'influence 7
1.3.1 Température..... 7
1.3.2 Hystérésis mécanique..... 8
1.3.3 Erreur de linéarité..... 8
1.3.4 Effet thermique..... 8
2 Introduction 9
2.1.1 CONDITIONNEMENT DES JAUGES : PONT DE Wheatstone 9
2.2 Principe de fonctionnement..... 10
2.3 Différents types de déformation 13
2.4 les diffèrent type de contrainte mécanique..... 14
2.4.1 la traction-compression..... 14
2.4.2 La flexion : peut se modéliser selon les cas comme une traction-compression ou comme un..... 14
2.4.3 La torsion :se modélise comme un cisaillement..... 14
2.5 Contrainte de traction-compression..... 14
2.5.1 contrainte de flexion..... 16
2.5.2 contrainte de torsion..... 17
2.5.3 Rapport entre déformation et réaction électrique dans les jauges de contraintes 18
2.5.4 Méthodes de mesure pour les jauges résistives 18
2.5.5 Position des jauges dans un pont complet et mesure du rapport déformations / reaction electrique en traction/compressionuni axiale : 19
2.5.6 Position des jauges et mesure de déformations en flexion..... 19
2.6 Caractéristiques et avantage de la jauge de contrainte dans le pont de weatstone 20

Table des matieres

2.6.1 Sensibilité du montage 20
2.6.2 Calibration par résistance de shunt 21
2.6.3 Désensibilisation due à la longueur des câbles 22
2.6.4 Puissance maximale recommandée 23
2.6.5 Elongation maximale 23
2.6.6 Réponse dynamique 23
2.6.7 Equilibrage du pont 24
2.7 Capteurs à jauges de contraintes 25
2.7.1 Les capteurs de force 25
2.7.2 Capteur de couple 26
2.7.3 Les capteurs de position 27
2.7.4 CAPTEUR DE PRESSION 28
2.8 Conclusion 28
3 Introduction 30
 Contrôleur de la carte arduino qui permet le calcul de la force et de déformation. 30
3.1 Structure générale du système électronique à réaliser 30
3.2 Amplification d'instrumentation 31
3.3 la carte ARDUINO UNO 35
3.4 Les différentes cartes ARDUINO 37
3.4.1 Le logiciel 38
3.4.2 L'interface 38
3.5 Le langage Arduino 40
3.5.1 Test de la carte 41
3.6 Connexion carte Arduino avec MATLAB et Simulink 45
Conclusion : 46

introduction générale

Le domaine de l'instrumentation et des capteurs offre une variété de systèmes intéressants à exploiter. De plus, ce domaine permet l'étude de phénomènes physiques et leur mise en forme pour devenir exploitable au niveau d'une acquisition de données.
On tient à souligner que bien que le numérique prenne dans nos enseignements une place de plus en plus prépondérante, l'électronique analogique conserve une relation très forte et nécessaire avec la physique. « Sans analogique plus de physique ! ». On a choisi de mettre en œuvre des jauges de contrainte facilement disponibles dans le commerce et très utilisées dans la mesure.
Notre sujet est suffisamment ambitieux pour pouvoir illustrer un nombre important de fonctions de l'électronique analogique et permettre une étude théorique intéressante.

Ce sujet permettre une initiation à la théorie des résistances des matériaux, à la théorie des jauges de contraintes et au pont ou au leurs conditionnements pour pouvoir arriver à une réalisation simple suivie d'essais, de réglages et de mesures avec un prix de revient compatible et un budget à respecter. [1]

Notre travail va se concentrer sur les caractéristiques des jauges de contrainte et le rapport déformation tension électriques pour réaliser un système de mesure de forces et déformation qui va supporter les étudiants de génie civiles et même génie mécanique dans l'études des contraintes. Cette réalisation va nous donner aussi la possibilité de voir de près l'études et la réalisation des capteurs intelligents et, à l'aide d'un microcontrôleur ladéformation d'un pont. [2]
Le premier chapitre introduit les jauges de contraintes par la définition de la contrainte, la jauge et sa constituants ainsi que le principe de fonctionnement des jauges puis en citant les différents types de jauges et leurs caractéristiques.
Dans le deuxième chapitre on va entamer le conditionnement des capteur qui sera traduite par l'études des diffèrent pont de mesures (pont de Wheatstone) et le rapport déformation et grandeurs électriques.
Le chapitre suivant va citer quelques systèmes de mesures ou capteurs des jauges de contraintes déjà connus.
Finalement ; Le quatrième chapitre est destiné à la réalisation qui se compose des

ponts de jauge, carte ARDUINO et d'autres accessoires (affichage ; acquisition des données avec d'autres applications) avec une petite description de la carte ARDUINO UNO et de son microcontrôleur et de l'amplificateur d'instrumentation ,la mise en fonction de la réalisation et l'acquisition des données afin d'atteindre notre objectif d'avoir les résultats de la force et la déformation instantanément synchronisées et visualisées par des courbes.[3]

1.1 FONCTIONNEMENT DES JAUGES DE CONTRAINTES

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

Admettant que le fil va subir les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée.

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

$$\boldsymbol{R = \frac{\rho L}{S}} \qquad \textbf{(I.1)}$$

R : la résistance électrique.

ρ: la résistivité du matériau.

L :la longueur du fil.

S : la section du fil.

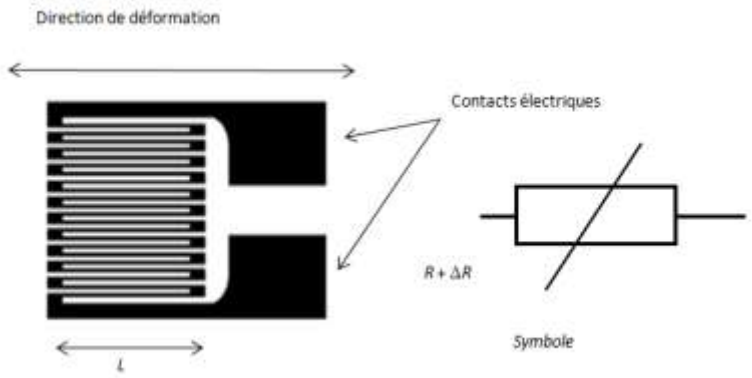


Figure I.1 jauge de contrainte.

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

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

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

$\frac{\Delta S}{S} = 2\frac{\Delta L}{L} = -2\mu\frac{\Delta L}{L}$ (puisque $\varepsilon_{zz} = -\mu\varepsilon_{xx}$).

$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L}(1 + 2\mu)$ (étant supposé constant)

Ou K est le facteur de jauge

$\frac{\Delta R}{R} = K\frac{\Delta L}{L}$ (en supposant ρ constant).

Ou K est une constante qui dépend de la nature du fil.

1.1.1 Facteur de jauge

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

$$\frac{\Delta \boldsymbol{R}}{\boldsymbol{R}} = \boldsymbol{K}\frac{\Delta \boldsymbol{L}}{\boldsymbol{L}} \qquad \textbf{(I.2)}$$

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

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

1.2 Les différents types de jauges de contraintes

On peut citer Trois principaux types de jauges de contraintes :

- Les jauges à semi-conducteurs.
- Jauges métalliques à trame pelliculaire et à trame pelliculaire.
- Jauges soudable pour application à haute température

Les jauge a semi-conducteurs sont des résistances variables fabriquées par un matériau piézorésistant et sont utilisées pour les jauges de contraintes. La variable K d'un semi-conducteur peut être cent fois supérieure à celle des métaux et Sont 50 à 100 fois plus sensibles que les jauges extensométriques.

Une contrainte appliquée sur un semi-conducteur (silicium) entraine la modification de son conductibilité pour deux raisons : sa variation géométrique mais aussi sur la conductibilité

intrinsèque du matériau. Ce qu'implique une amplitude très importante comparativement avec des capteurs métalliques.

La piézorésistance est le changement de conductibilité d'un matériau dû à une contrainte mécanique La piézorésistance dans les semi-conducteurs a été découverte sur un cristal de silicium.

Les jauges de contrainte à semi-conducteur ne sont pas largement utilisées dans l'analyse expérimentale des contraintes pour plusieurs raisons :

- Les caractéristiques non linéaires de la jauge de contrainte à semi-conducteur nécessitent une mesure correction exigeant une grande précision.

- Les jauges de contrainte à semi-conducteurs sont plus chères que les types métalliques.

- Même lorsque la plus grande sensibilité est prise en compte, la température défavorable

Les effets dépendants sont plus sévères avec les jauges de contrainte à semi-conducteur qu'avec le métal et ces effets sont plus difficiles à compenser.

- La manipulation est plus difficile en raison de la fragilité du semi-conducteur.D'autre part, la sensibilité élevée est une raison d'utiliser des jauges de contrainte à semi-conducteur pour la mesure de très petites déformations

1.2.1 Les jauges métalliques

Ces dernières sont les plus utilisées en extensomètrie. A l'origine, elles étaient constituées d'un fil (généralement en constantan) collé en spires rapprochées sur un support mince on distingue ici deux types aussi.

- **Jauge a trame pelliculaire**

Les jauges de contrainte à trame pelliculaire sont basées sur des principes scientifiques bien établis qui ont été perfectionnés par des progrès technologiques pour améliorer leur fonctionnement. En outre les jauges de contrainte à trame pelliculaire sont très simples à installer et à utiliser tout en étant d'un coût faible pour des solutions individuelles et uniques. Les avantages de ce type de jauges sont de loin supérieurs à leurs éventuels inconvénients.
Les jauges à trame pelliculaire obtenues à partir d'une feuille métallique mince (quelques µm) et d'un support isolant (une résine synthétique) similaire à un circuit imprimé

❖ Autres caracteristiques

- Grille très mince (0.004mm)
- Grande variété des dimensions (0.2mm a 50mm et plus)
- Support mince (0.013mm)
- Très flexible (époxy ou polyamide)
- Résistances disponibles 120, 350, 1000,5000Ω
- Bonne adhésion, dissipation de chaleur et auto compensation en température.
- Possibilité de combiner plusieurs jauges sur un seul support (rosettes).

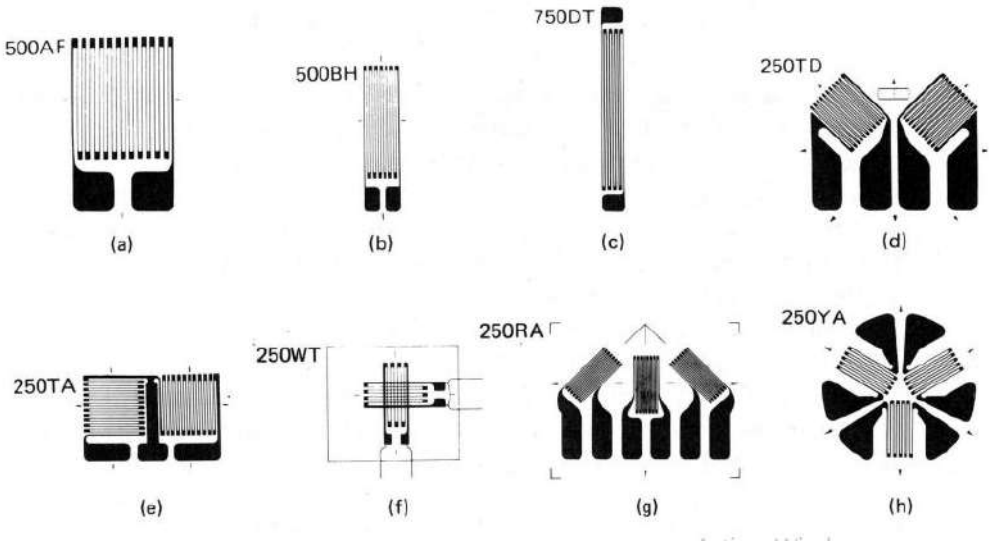
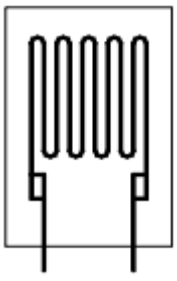


Figure I.2 Exemple des jauges a trame pelliculaire

❖ Jauge a fil tramé

- En général 10 à 12 cm de constant de diamètre 0.025mm pour une résistance totale de120Ω



- Trame plate-longueur minimum 6mm.
- Bobine aplatie-longueur minimum 0.25mm.
- Support, papier, plastique souvent temporaire.
- Auto compensation en température difficile.
- Facteur de sensibilité transversale (k) plus grande que pour les jauges a trame pelliculaire.
- Peu répandues de nos jours, sauf pour des applications spéciales,comme la haute température.

1.2.2 Jauges soudables pour haute température

Ce type est utilisé pour effectuer des mesures dans des conditions extrêmes près des sources de chaleurs pour des hautes températures allantes jusqu'à (650° C) car elles ne contiennent pas de matière organique. Ils existent deux types : une variation de résistance d'un fil Ni-Cr ou bien variation de capacitanced'un condensateur a plaques. Leurs Dimensions sont importantes (50mm et plus) pour surfaces planes seulement

- **Les matériaux utilisés pour les jauges**

Les jauges sont fabriqué à partir des matériaux ayant une bonne résistance à la fatigue une aptitude au soudage et une bonne tenue en température. On peut citer les matériaux suivants :

1. Constantan : c'est un alliage 55% Cu, 45% Ni, couramment utilisé. Il supporte des températures de200 °C.
2. Karma : c'est un alliage 74 Ni, 20 Cr, 3% Cu, 3% Fe, meilleure sensibilité et peut être utilisé jusqu'à350 °C.
3. Platine – Tungstène :92% Pt, 8% W, plus cher mais présente une meilleure résistance à lafatigue. Il reste donc pour des utilisations spécifiques.

Semi-conducteurs (Silicium). Ils ont une sensibilité bien meilleure (50 à 100 fois plus) mais ont une moins bonne linéarité et sont plus sensibles aux variations de température

1.3 Les paramètres d'influence

1.3.1 Température

Les changements de température pendant une mesure avec des jauges de contrainte peuvent avoir fréquemment des effets indésirables sur le résultat de cette mesure. Heureusement un certain nombre d'options sont disponibles : par exemple de faire le bon choix de la jauge de déformation, de prendre celle qui adaptent au mieux à l'application, de réaliser le câblage en montage de Wheatstone pour bénéficier des avantages d'un demi pont ou d'un pont complet on peut utiliser une configuration en double pont. Une jauge active, soumise à la déformation et aux variations de température,et une jauge passive soumise uniquement aux variations de température. En pratique, pour corriger les dérives de pente (sensibilité) en température, on place dans les deux branches d'alimentation une résistance en Nickel pur. Ces résistances vont modifier la tension d'alimentation aux bornes du pont de manière à compenser la dérive thermique. Une autre alternative existe également par des solutions informatiques dans le but de compenser en grande partie les effets de température.

1.3.2 Hystérésis mécanique

L'hystérésis mécanique d'une jauge de contrainte est définie comme la différence entre la valeur mesurée affichée pour les charges de déformation croissantes et décroissantes avec la même valeur de déformation sur l'éprouvette. L'hystérésis dépend non seulement de la jauge de contrainte,

mais aussi dans une large mesure sur les paramètres d'application tels que le type et l'épaisseur de couche de l'adhésif, etc. Pour cette raison, les spécifications incluent des valeurs d'hystérésis pour différents paramètres d'installation

1.3.3 Erreur de linéarité

L'erreur de linéarité d'un capteur de force dépend du design du capteur (par exemple, lorsque la force croît, la répartition des forces varie ce qui influence la linéarité), mais aussi du choix des jauges. On doit toujours minimiser cette erreur. En production de série, le capteur est calibré en passant par deux points : le zéro et la force nominale. En minimisant l'erreur de linéarité, cette calibration suffit. Si l'erreur de linéarité est importante, il est nécessaire de passer par d'autres étapes intermédiaires d'étalonnages.

1.3.4 Effet thermique

Après le collage de la jauge sur un matériel déterminé, elle va subir des déformations dues à la dilatation propre du matériau par les effets thermiques. C'est pourquoi les jauges actuelles sont auto-compensées. Il faut bien choisir une jauge avec un coefficient de dilatation compatible au matériel sur lequel elle sera collée.

- **Dérive thermique du zéro**

En l'absence de contrainte, la résistance augmente avec la température. Le signal même très proche de zéro, n'est pas nul. Cette dérive est aléatoire et est intrinsèque au pont de jauges.

- **Effet thermique sur la sensibilité**

L'élasticité du corps d'épreuve ainsi que le coefficient de jauge (k) dépendent de la température. Cela implique une variation de la sensibilité.

2 Introduction

Les jauges de déformation sont basées sur la propriété de variation de leurs conductivité lorsqu'ils sont soumis à des contraintes, pressions ou déformations. Elles permettent de fabriquer des capteurs de pression, accélération, etc. Comme les variations de résistance sont trop faibles pour être directement mesurables, il est nécessaire de faire appel à un montage pour la mise en œuvre des jauges qui est le **pont de Wheatstone.**

2.1.1 CONDITIONNEMENT DES JAUGES : PONT DE Wheatstone

Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure de petites variations de résistances électriques (maximum 10%).

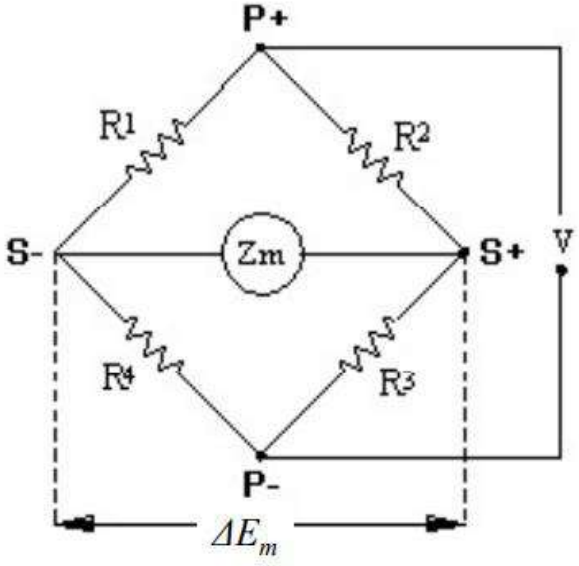


Figure II.1 : montage du pont de Wheatstone

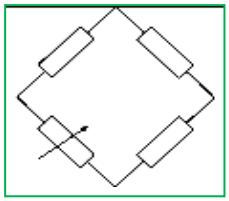
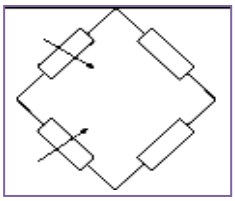
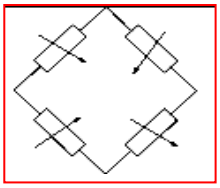
Au départ, si $V_{out} = 0$

Alors $\frac{R1}{R2} = \frac{R2}{R3}$ **(II.1)**

Remarques importantes

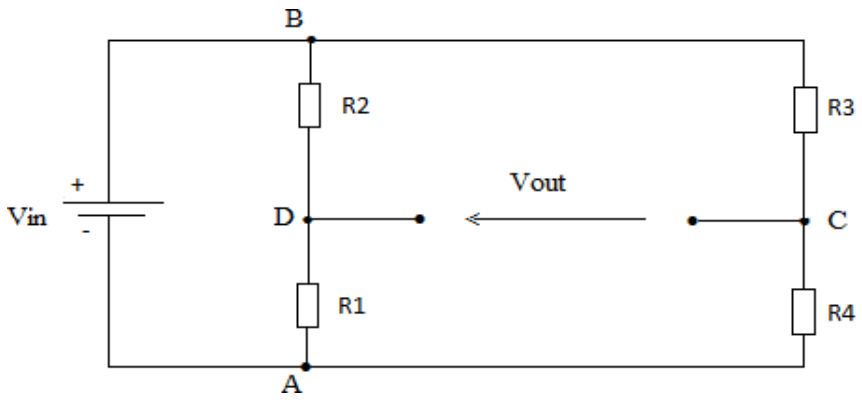
- Les éléments adjacents sont de signe contraire les éléments opposés sont de même signe
- Pour des montages très précis on peut être amener à compenser la longueur des lignes dont la variation sous l'effet de T peut être du même ordre de grandeur que les mesures voulues.
- Les principales configurations de montage sont résumées dans le tableau suivant.

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

Montage en quart de pont	Montage en demi de pont	Montage en pont complet
		
une seule résistance varie	Deux résistances varient : soit des adjacentes. Soit des opposés comportement dépend du choix. Mais généralement si 2 branches adjacentes	Les quatre Résistances varient selon les configurations de montage
montage non linéaire	Montage linéaire	montage linéaire.
montage sensible à la température	compensation de température	une meilleure sensibilité a la température ,Compense les efforts parasites sont compensé)

2.2 Principe de fonctionnement

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



FigureII.2 : Principe de fonctionnement du pont de Wheatstone.

Ce qui nous intéresse dans le montage est la variation de tension entre les points C et D, contenant un galvanomètre qui détecte cette variation une fois A et B sont reliés à une source de tension ou de courant.

En appliquant le théorème de Millman en C et en D, on a :

$$V_c = \frac{\frac{V_A}{R_4} + \frac{V_B}{R_3}}{\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3}} = \frac{V_A R_3 + V_B R_4}{R_3 + R_4}$$

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

Avec :

$$V_{in} = V_B - V_A \quad \text{et} \quad V_{out} = V_D - V_C$$

On a l'équation du pont

$$V_{out} = V_{in} \frac{(R_1 R_3 + R_4 R_2)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \qquad \textbf{(II.2)}$$

Pour que le pont soit équilibré $V_{out} = 0$ a condition suivante doit etre verifiée

$$(R_1 R_3 - R_2 R_4) = 0 \qquad \textbf{(II.3)}$$

a. Quart de pont (pont simple)

On prend $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ avec $R_1 = J_1 + dR$ ou $R_3 = J_3 + dR$ varie +dR

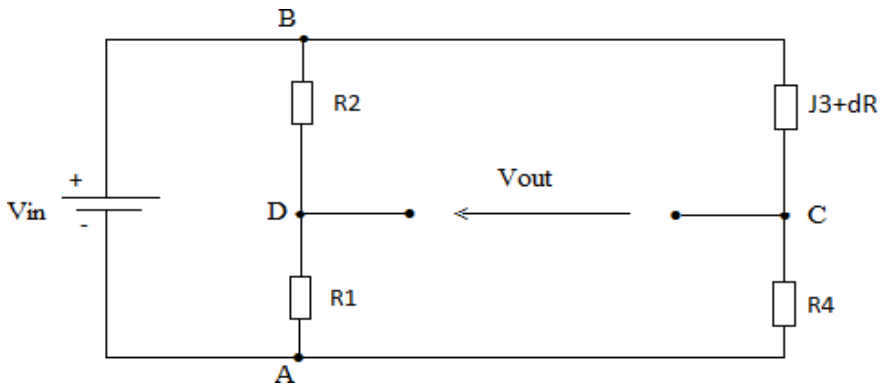


Figure II.3 : Schéma de principe du montage pont simple.

On obtient comme résultat :

$$V_{out} = \frac{V_{in} dR}{4R} \qquad \textbf{(II.4)}$$

Ce montage est simple et moins couteux mais avec des inconvénients

- Une résistance est induite par la longueur de câble en cas où la jauge est éloignée des autres résistances.
- La sensibilité du capteur (qui varie proportionnellement à la tension d'alimentation) s'est démunie.
- Une perte d'information est causée par La résistance du câblage ajouté. Par exemple, un câble de 100 mètres conduit à une variation de 10 %.

On peut doubler la sensibilité du pont à la déformation en rendant deux jauges actives dans une configuration en demi-pont.

b. Demi-pont

Le pont est initialement équilibré mais J_3 varie de $+dR$ et J_4 de $-dR$.

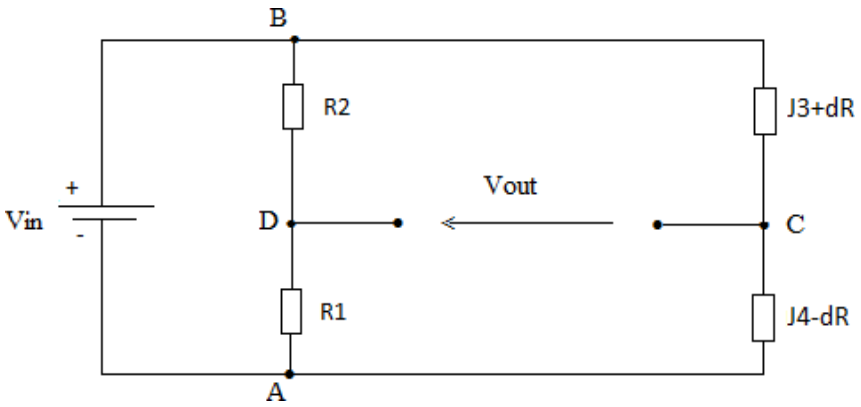


Figure II.4 : Schéma de principe du montage demi-pont

On trouve :

$$V_{out} = \frac{V_{in} dR}{2R} \qquad \textbf{(II.5)}$$

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

c. Pont complet

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

J_1 et J_3 varie de $+dR$ et J_2 et J_4 de $-dR$ et $J_3 = J_4 = J_2 = J_1 = R$.

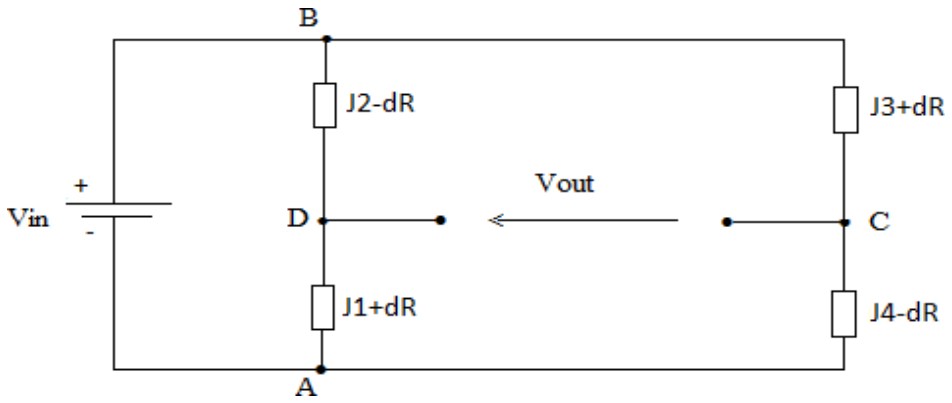


Figure II.5 : Schéma de principe du montage pont complet.

Donc l'équation de base devient alors :

$$V_{out} = \frac{V_{in\,dR}}{2R}$$

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

Le pont de Wheatstone réalise l'auto compensation des termes quadratique et par conséquent présente une réponse parfaitement linéaire.

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

2.3 Différents types de déformation

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

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

On peut distinguer différents types de déformations :

- La déformation élastique, qui est réversible
- La déformation plastique, qui est irréversible
- Le fluage qui est une déformation irréversible qui augmente avec le temps sous l'effet d'une contrainte constante. La vitesse de fluage augmente généralement lorsque la température du matériau augmente.

2.4 les diffèrent type de contrainte mécanique

On peut citer trois types de contrainte de déformation élastique :

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

2.5 Contrainte de traction-compression

La traction et la pression constituent les types de contraintes les plus simples. Un état de tension mécanique homogène s'établit dans l'échantillon de traction.

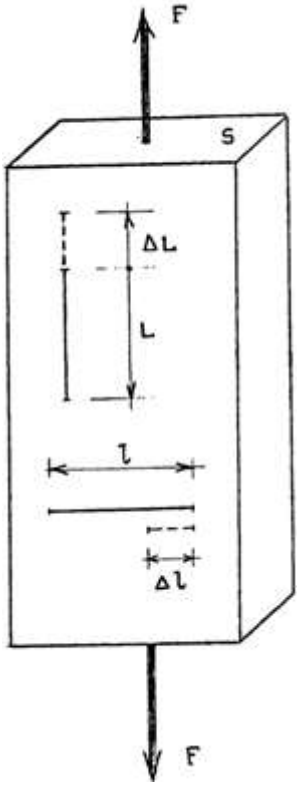


Figure II.5 : éprouvette d'essai de traction.

Une pièce parallélépipédique de section **S** est soumise à une traction suivant sa plus grande dimension. Un segment longitudinal de longueur initiale **L** s'allongera sous l'effet de la traction d'une quantité delta L(ΔL). L'allongement relatif (ou déformation longitudinale) sera par définition.

$$S_{ZZ} = \frac{\Delta L}{L} \qquad \textbf{(II.6)}$$

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

$$S_{XX} = \frac{\Delta I}{I} \qquad \textbf{(II.7)}$$

L'allongement relatif s_{zz} et lacontraction s_{xx} sont proportionnels :

$$S_{XX} = -\mu S_{ZZ} \qquad \textbf{(II.8)}$$

μ : est le coefficient de poisson :

- C'est un nombre sans dimension.

- $\mu = 0.3$ pour les métaux.

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

$$\boldsymbol{\sigma = \frac{F}{S}} \text{ (en } kg/cm^2)$$

$$\sigma = E\varepsilon \qquad \textbf{(II.9)}$$

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

2.5.1 contrainte de flexion

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

- Plongeoirs Piscine
- Ponts
- Supports d'étagère
- Ailes d'avion

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

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

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

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

$$\boldsymbol{\varepsilon = \frac{1}{K} . \frac{V_{out}}{Vin}} \qquad \textbf{(II.10)}$$

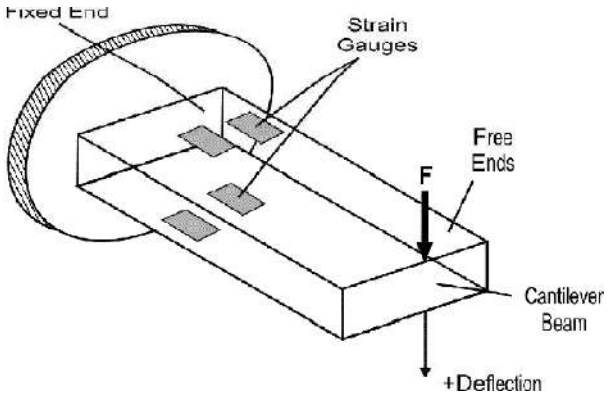


Figure II.6 : Poutre de flexion.

2.5.2 contrainte de torsion

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

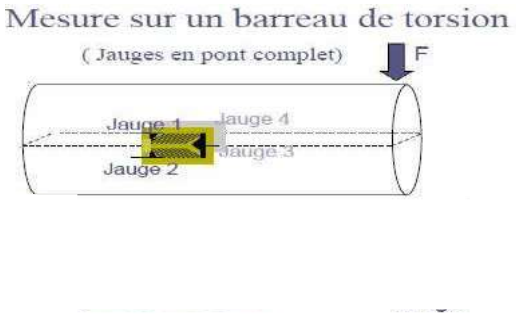
Pour la détermination de la contrainte de torsion ; l'éprouvette est menue de quatres jauges disposées suivant un angle de 45 degré .

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

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

L'allongement est peut calculée a l'aide de la formule.

$$\varepsilon = \frac{1}{K} . \frac{V_{out}}{Vin}$$



FigureII.7 : éprouvette d'essai de torsion.

2.5.3 Rapport entre déformation et réaction électrique dans les jauges de contraintes

2.5.4 Méthodes de mesure pour les jauges résistives

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

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

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad \Rightarrow V_{out} = 0$$

Après remplacement de R_1 par une jauge et en laissant R_2, R_3 et R_4 comme résistances fixes et équilibrées avant déformation de la jauge, la variation ΔR_1de R_1 provoque un déséquilibre et la tension de sortie V_{out} devient :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_1+\Delta R_1}{(R_1+\Delta R_1)+R_2} - \frac{R_4}{R_3+R_4} \qquad \textbf{(II.11)}$$

Pratiquement , on utilise trois résistances $(R_2, R_3\ et\ R_4)$ d'une valeur identique à la valeur nominale R_1 de la jauge, qui pour les jauges métalliques, vaut typiquement 300Ω. Puis, en tenant compte que $\Delta R_1 << R_1$, la formule se présente sous une forme plus simple et la tension de sortie du pont déséquilibré devient directement proportionnelle à ΔR_1 :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{\Delta R_1}{4R_1} = \frac{1}{4} K\varepsilon \qquad \textbf{(II.12)}$$

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

fixes. Elles doivent être collées sur le corps d'épreuve de façon à ce que les variations des résistances s'additionnent et augmentent ainsi la tension de sortie voir figure (II.8).Un pont en équilibre avec les résistances R_i et déséquilibré par les ΔRI Donne une tension de sortie V_{out} de :

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{4}\left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} - \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) \quad \textbf{(II.13)}$$

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

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad \textbf{(II.14)}$$

2.5.5 Position des jauges dans un pont complet et mesure du rapport déformations / reaction electrique en traction/compressionuni axiale :

Les jauges *R*1 et *R*3 sont arrangées suivant l'axe de la contrainte uni axiale et mesurent la déformation longitudinale alors que les jauges *R*2 et *R*4 sont disposées dans le sens orthogonalet mesurent la déformation transversale.

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{K}{2}(\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}) = \frac{K}{2}(1+\mu)\varepsilon_{zz} \quad \textbf{(II.15)}$$

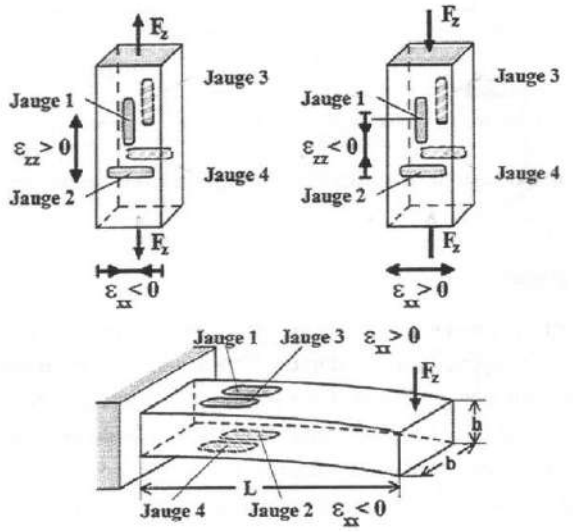


Figure II.8 : Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction, compression et en flexion

2.5.6 Position des jauges et mesure de déformations en flexion

Les jauges *R*1 et *R*3 sont sous traction et les jauges *R*2 et *R*4 sous compression

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = K\varepsilon_{zz} \qquad \textbf{(II.16)}$$

En flexion, les quatre jauges actives augmentent donc la résolution de quatre fois par rapport à un pont, qui ne contient qu'une seule jauge active (quart de pont). D'autres arrangements comme le demi-pont avec deux jauges actives et deux résistances fixes sont évidemment possibles et s'appliquent selon les circonstances (forme de la pièce à surveiller, accessibilité.

pour collage etc.).La plupart des capteurs de déplacement basés sur les jauges d'extensométrie profitent de l'avantage de la compensation de température et de la résolution élevée d'un pont complet. Le type de capteurs de déplacement préféré, constitue la lame en flexion, équipée de quatre jauges.

2.6 Caractéristiques et avantage de la jauge de contrainte dans le pont de weatstone

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

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

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

2.6.1 Sensibilité du montage

La sensibilité est le rapport entre la variation du voltage de sortie et la déformation mesurée

$$dV_{out} = KD\frac{R_i R}{(R_i+R)^2} \quad \textbf{(II.17)}$$

La sensibilité du montage est directement liée à la tension d'alimentation et à la résistance de la jauge.

Où dV_{out} est la différence de tension mesurée aux bornes du pont en $\mu V/\mu Str$

K le facteur de jauge

D la déformation (µStr)

R_i la résistance de la jauge $(350\ Ohm)$ la résistance du pont $(1\ kOhm)$

2.6.2 Calibration par résistance de shunt

Une autre méthode de détermination de la sensibilité du montage consiste à simuler une déformation en plaçant, en parallèle, sur l'un des bras du pont de Wheatstone une résistance de valeur élevée (figure.20). Cette différence de potentiel imposée par cette variation de résistance correspond à une variation de tension mesurée par l'instrument et simule une déformation qui peut être calculée par l'équation

$$D = \frac{-R_j.10^6}{K(R_{sh}+R)} \quad \textbf{(II.18)}$$

Où D est la déformation (μStr)

K le facteur de jauge donné par le fabricant

R_j la résistance de la jauge $(350Ohm)$

R_{sh} la résistance de shunt $100\ kOhm$

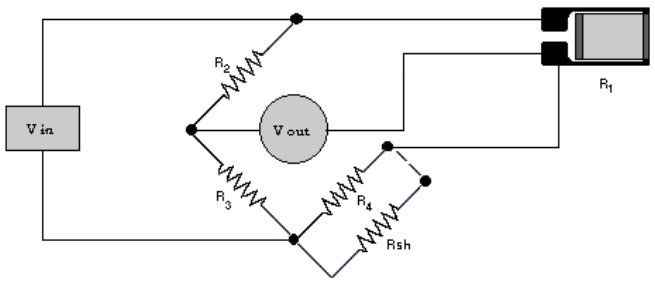


Figure II.9 : Calibration par résistance de shunt.

2.6.3 Désensibilisation due à la longueur des câbles

Le collage d'une jauge sur une structure nécessite de grandes longueurs de câble. Ces longs câbles causent les erreurs suivantes: Les longs fils causent les erreurs suivantes:

1. La résistance des fils varie avec la température. C'est un effet parasite non contrôlé (On peut isoler les fils thermiquement afin de réduire ce problème) thermiquement afin de réduire ce problème)

2. Les fils de liaison sont des résistances montées en série avec le circuit de la jauge ce qui a pour effet de :

- Désensibiliser le pont (output moins grand)
- Rendre difficile voire impossible l'équilibrage initial du pont
- Générer une erreur dans l'étalonnage électrique

F_e est le facteur de jauge effectif se calcule par la formule suivante

$$F_e = \frac{-KR_i}{R_i + R_c L} \qquad \textbf{(II.19)}$$

Où

K le facteur de jauge donné par le fabricant

R_j la résistance de la jauge (en Ohm)

R_c la résistance linéique du câble (en Ohm/m)

L la longueur du câble (en m)

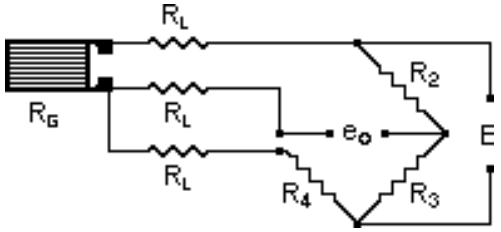


Figure II.10 : Montage en quart de pont en montage 3 fils.

2.6.4 Puissance maximale recommandée

Pour une pièce d'acier soumise à une déformation statique la puissance à dissiper ne doit pas excéder 0,30 W/cm^2 Pour obtenir une précision élevée de mesure.

$$U_j = \frac{UR_j}{R_i+R} \quad \textbf{(II.20)}$$

$$P = \frac{{V_{in}}^2}{R_j} \quad \textbf{(II.21)}$$

Où : Uj = Tension appliquée aux bornes de la jauge

U = Tension d'excitation (en V)

Rj = Résistance de la jauge (en Ohm)

R = Résistance de compensation (en $kOhm$)

P = Puissance dissipée par la jauge (W)

S = Surface de la jauge (cm^2)

Di = Dissipation de la jauge (W/cm^2)

2.6.5 Elongation maximale

L'allongement maximal d'une jauge de contrainte est la déformation à laquelle la caractéristique courbe (caractéristique de déformation de changement de résistance) s'écarte de plus de ± 5% de la courbe caractéristique moyenne du type. C'est souvent le cas si l'installation ou la jauge de contrainte a été endommagée.

2.6.6 Réponse dynamique

Du fait de leur faible inertie, les jauges sont capables de suivre des déformations dynamiques, même à très hautes fréquences. Toutefois comme les déformations sont des phénomènes quise déroulent à la célérité de l'onde, une onde frontale plus petite ou égale à la dimension de la jauge ne donnera aucune indication. En règle générale, la jauge doit avoir une dimension de 1/10 de la longueur d'onde.

La longueur de grille de mesure active spécifiée est la longueur nette de la grille sans le Boucles d'extrémité (ponts transversaux). Si les faits suivants sont pris en compte, il est possible pour couper la feuille de support : Couper la feuille parallèlement à la grille de

mesure n'a que peu effets. Raccourcir la feuille de support perpendiculairement à la grille de mesure influence a la façon dont la contrainte est appliquée, modifiant ainsi également les propriétés essentielles de la jauge de contrainte.Une distance minimale de 1 mm entre l'extrémité de la grille de mesure et l'extrémité de la feuille de support doit donc être conservée.

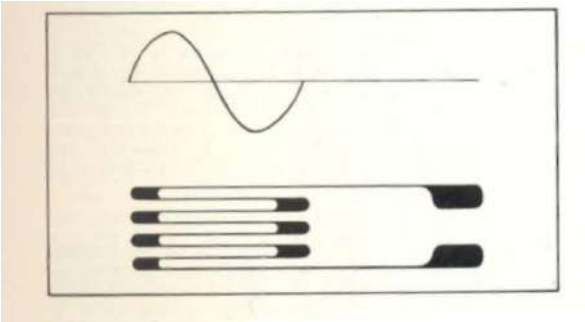


Figure II.11 : Longueur d'onde mécanique de l'ordre de grandeur de la jauge.

2.6.7 Equilibrage du pont

Il est rare que le pont soit initialement équilibré, le déséquilibre vient du fait que les jauges et les résistances du pont n'ont pas exactement la même valeur de résistance bien que leur résistance nominale soit la même les résistances nominales varient de $\pm\mathbf{0}.1$ à $\pm\mathbf{1}\%$ (en général $\mathbf{0}.\mathbf{3}\%$).

L'équilibrage initial permet d'avoir accès à la plage complète d'utilisation de l'instrument de mesure. Pour obtenir l'équilibrage initial, on ajoute au pont un petit circuit fait d'un potentiomètre et d'une résistance fixe.

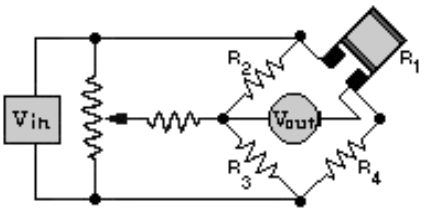


Figure II.12 : équilibrage par potentiomètre**.**

Pour assurer la qualité d'une mesure basée sur des jauges de contraintes, 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, sont parmi les plus importants…

Mais il en est un dont on sous-estime trop souvent l'importance : le câblage entre la jauge et

L'électronique associée. Pour compenser l'influence de la température et des longueurs de câbles, il faut en effet privilégier une technique de câblage particulière.

Dans tous les cas, le câblage joue un rôle essentiel. Il permet de compenser les pertes en ligneet l'influence de la température.

2.7 Capteurs à jauges de contraintes

2.7.1 Les capteurs de force

Les capteurs de force équipés de jauges de contrainte sont construits sur le principe d'un corps d'épreuve travaillant comme un ressort sur lequel les forces à mesurer sont appliquées. L'élément sensible se déforme et la contrainte se produit en surface. La tâche du corps d'épreuve est donc de convertir les forces à mesurer, d'une façon reproductible et linéaire. De nombreuses propriétés des capteurs de force sont définies par le choix du matériau et de la conception du corps d'épreuve. L'élément sensible du capteur est la jauge de contrainte, qui se compose d'une grille de mesure disposée sur un support et recouverte d'une couche protectrice. Ces jauges de contrainte sont collées sur le corps d'épreuve aux endroits appropriés. Généralement quatre jauges de contrainte sont utilisées et installées de sorte que deux d'entre-elles soient étirées alors que les deux autres comprimés quand la force est appliquée.

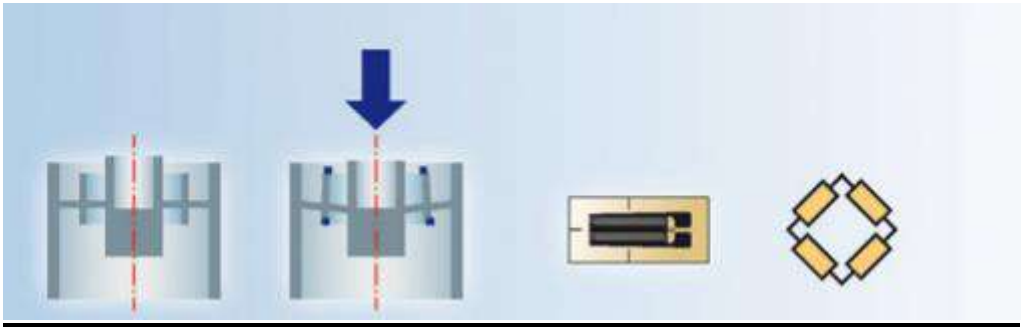


Figure II.13 : capteur de force.

- **capteurs de force utilisé en tractions & en compression**

- Ce sont des capteurs en conçus pour mesurer des efforts de $\mathbf{0}\boldsymbol{N}$ à $\pm\,\mathbf{20000}\boldsymbol{daN}$. On les

retrouve généralement dans des applications de mesures de tractions et de compressions.



Figure II.14 : Capteurs de mesures de tractions & de compression

- **Capteurs de mesure de flexions**

Les capteurs de mesures de flexions qui sont des capteurs de force précis et stables de type à flexion, généralement d'étendue de mesure allant de $0.5N$ à $+/-125N$. Ils trouvent généralement leurs applications dans des mesures de forces avec un encombrement réduit.

- **capteurs de mesures de tractions & de compression**

Ce sont des capteurs en « S » conçus pour mesurer des efforts de $0N$ à $\pm\,20000\,daN$. On les retrouve généralement dans des applications de mesures de tractions et de compressions.



Figure II.15 : Capteurs de mesures de tractions & de compression

2.7.2 Capteur de couple

Statiques et dynamiques, le capteur peut travailler en réaction ou sur l'arbre en rotation. Lors de développements spécifiques, ils peuvent également mesurer plusieurs moments ainsi que les efforts associés aux jauges de contraintes « Measurement Specialties » sont destinés à la mesure de couples chaque axe en un capteur multi-

composantes. Une large gamme d'options est disponible telle que la mesure de l'angle, la vitesse de rotation et/ou de l'intégration de butées mécaniques contre les surcharges. Les modèles sans contact sont adaptés aux grandes vitesses de rotation ainsi qu'aux conditions de températures extrêmes.



Figure II.16 : Capteur de couple.

2.7.3 Les capteurs de position

Les déplacements ou les positions que l'on mesure peuvent être linéaires ou angulaires. Les deux types de mouvement peuvent être convertis l'un dans l'autre grâce à des dispositifs mécaniques (crémaillère, vis sans fin, ...), mais ceux-ci entraînent des erreurs (jeux, hystérésis, influence de la température, ...). La plupart des capteurs de déplacement à sortie analogique sont des capteurs à impédance variable.

Les capteurs à résistance variable :

- potentiomètre linéaire = déplacements de quelques millimètres à plusieurs dizaines decentimètres
- potentiomètre angulaire = déplacements de quelques degrés à une dizaine de tours

jauges extenso métriques = micro-déplacements.



Figure II.17 : Capteur de position.

2.7.4 Capteur de pression

C'est la méthode la plus utilisée pour mesurer la pression. Bien que ces capteurs aient une faible sensibilité, ils sont robustes, relativement simples, possèdent d'excellentes caractéristiques de linéarité et d'hystérésis dans une grande gamme de températures. Ilsmesurent la différence entre la pression à mesurer appliquée au capteur et la pression interne du capteur. Comme généralement le vide est fait à l'intérieur du capteur celui-ci mesure la pression absolue qui lui est appliquée. La construction de ces capteurs dépend de la pression maximum qui leur est appliquée :
Pour une pression inférieure à 100 Kg/cm², deux jauges de contrainte mesurent la déformationd'un soufflet qui s'allonge ou d'un diaphragme qui se bombe en fonction de la pression appliquée entre l'extérieur et l'intérieur du capteur.

Dans le cas de pressions supérieures, les deux jauges de contrainte mesurent la déformation dela paroi d'un tube dont l'intérieur est soumis à la pression à mesurer. La résistance des deux jauges de contrainte varie en fonction de leur déformation et donc de la pression.

Deux autres jauges sont ajoutées dans le capteur de telle sorte qu'elles soient à la même température que les deux premières mais sans être soumises aux déformations dues à l'effet depression. Un montage en pont permet d'obtenir la somme des variations dues à la pression et d'annuler celles dues à l'effet de température. Il subsiste néanmoins une légère influence de la température qui peut être réduite, soit par un circuit électronique de compensation, soit en mesurant la température du capteur et en utilisant un algorithme de calcul de correction.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur les ponts de Wheatstone. Et le conditionnement des jauges et leurs principes de fonctionnement.
Lorsque les jauges sont collées sur le corps d'épreuve de façon à réaliser un demi pont ou préférablement un pont complet, on obtient:

- Une compensation thermique une compensation thermique
- Une isolation de l'effet mécanique désiré
- Un output électrique maximum un output électrique maximum

– Lorsqu'il s'agit de disposer les jauges dans le pont de Wheatstone, il faut se rappeler que :

- les branches 1 et 3 sont positives

- les branches 2 et 4 sont négatives.

3 Introduction

Les jauges de contraintes permettent de déterminer de manière simple et fiable la répartition des contraintes et des déformations sur des composants réel ou éprouvettes soumis à une force.

- Cette technique est largement utilisée dans l'analyse expérimentale des contraintes, de plus les jauges de contraintes sont très répandues dans la fabrication de capteur (pesage, de force, couple…etc.).
- Notre système va introduire cette technique de jauge de contrainte qui permet l'étude des contraintes simples de la traction et la compression pour comparer aussi les valeurs mesurées et les valeurs calculées.
- Cette application permet aussi la connexion et le test des différents ponts toute en offrant une amplification de mesure à l'aide d'un amplificateur d'instrumentation qui est lié au micro (**figure III.1**)
- Contrôleur de la carte arduino qui permet le calcul de la force et de déformation.

Ces données acquises seront traitées finalement par un programme qui permet à son tour la visualisation des outputs (force et déformation) en courbes. **(figure III.1)**

3.1 Structure générale du système électronique à réaliser

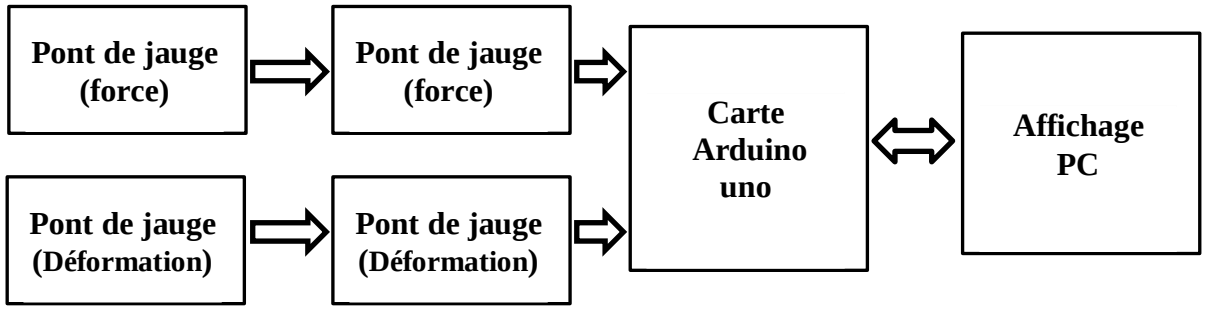


Figure III.1 : schéma bloc du système

Notre système contient deux inputs : force et déformation par deux ponts et deux amplificateurs d'instrumentation, suivi d'une carte ARDUINO- UNO qui va se charger de la numérisation, du calcul de la contrainte. Le dernier bloc de traitement et visualisation output sera réalisé en software par PC.

Nous proposons alors le schéma électrique suivant :

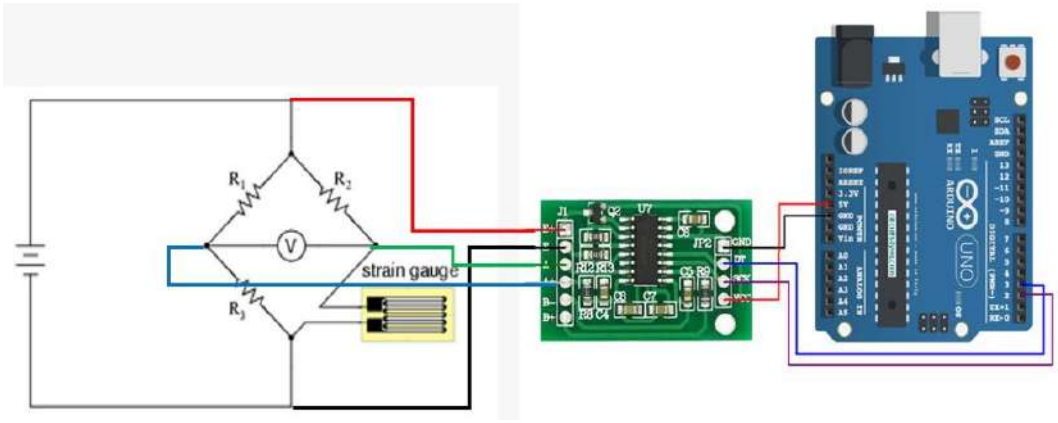


Figure III.2 : différents bloc du système

3.2 Amplification d'instrumentation

Un amplificateur de mesure est un dispositif électronique destiné au traitement de faibles signaux électriques. On le trouve également dans la littérature sous le nom d'amplificateur d'instrumentation.

L'amplificateur de mesure est un élément essentiel dans la partie de conditionnement d'une chaîne d'acquisition : il permet le traitement de signaux issus de capteurs de mesure.

Il est généralement réalisé à partir d'un ou de plusieurs amplificateurs opérationnels (AOP), de telle manière qu'il améliore leurs caractéristiques intrinsèques : composante continue, dérive, bruit d'amplification, gain en boucle ouverte, taux de réjection du mode commun, impédance d'entrée.

Ainsi la sortie est définie par deux broches (Vout et Ref en général) et la différence de potentiel entre ces deux broches défini le signal amplifié. La figure ci-après montre l'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation avec un pont de Wheatstone

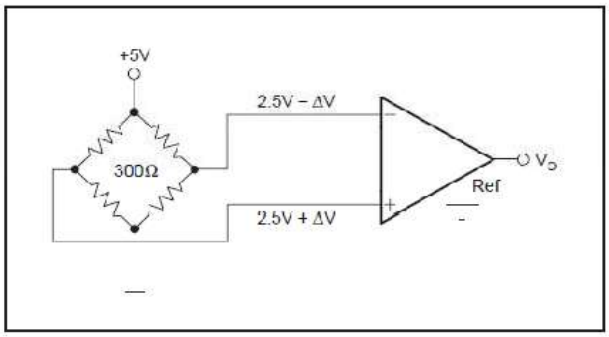


Figure III.3 : Amplificateur d'instrumentation avec un pont de Wheatstone

Pour cela on a choisis l'amplificateur à gain programmable à faible bruit (PGA) pour amplifier la tension de notre pont de mesure. Ce sont des amplificateurs d'instrumentation de précision pour l'acquisition précise et à faible bruit de signal différentiel.

le $HX711$ Figure (III.4) est un convertisseur analogique-numérique (ADC) 24 bits de précision conçu pour les balances et les applications de contrôle industriel pour s'interfacer directement avec un capteur de pont. Le multiplexeur d'entrée sélectionne l'entrée différentielle du canal A ou B à l'amplificateur à gain programmable à faible bruit (PGA). Le canal A peut être programmé avec un gain de 128 ou 64, correspondant à une tension d'entrée différentielle pleine échelle de ± 20 mV ou ± 40 mV respectivement, lorsqu'une alimentation 5 V est connectée à la broche d'alimentation analogique AVDD. Le canal B a un gain fixe de 32. Le régulateur d'alimentation sur puce élimine le besoin d'un régulateur d'alimentation externe pour fournir une alimentation analogique au CAN et au capteur. L'entrée d'horloge est flexible. Il peut provenir d'une source d'horloge externe, d'un cristal ou de l'oscillateur sur puce qui ne nécessite aucun composant externe. Le circuit de réinitialisation de l'alimentation sur puce simplifie l'initialisation de l'interface numérique. Aucune programmation n'est nécessaire pour les registres internes. Toutes les commandes du HX711 passent par les broches.

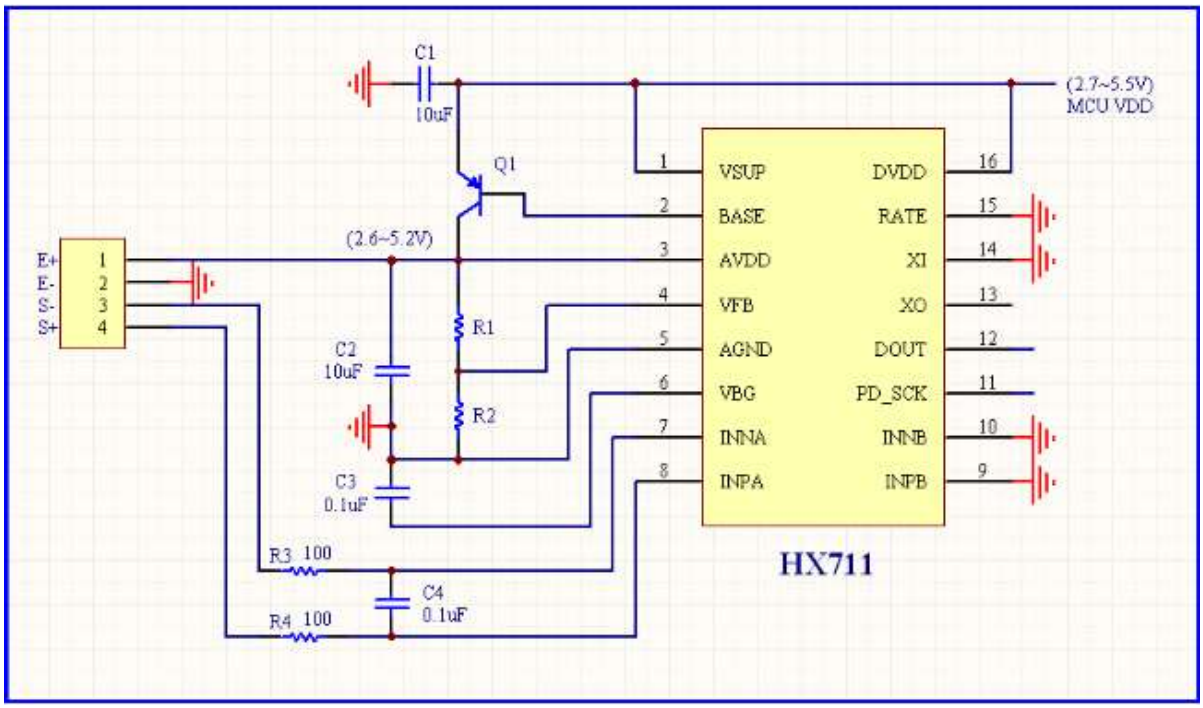


Figure III.4 : schéma Amplificateur d'instrumentation PGA.

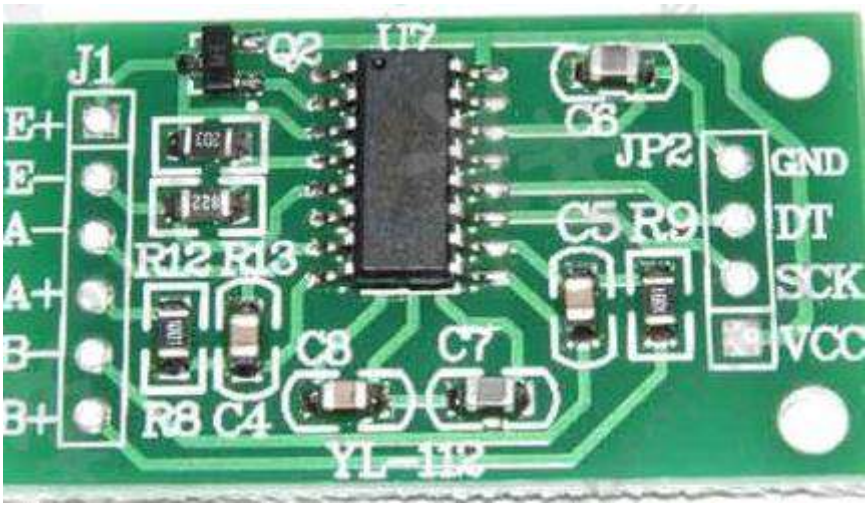


Figure III.5 : Amplificateur d'instrumentation PGA.

Dans notre système deux réglages sont nécessaires :

- Mise à zéro c'est à dire le capteur est à la charge nulle la sortie du pont doit être nulle.

- le gain de l'amplification du signal de sortie du capteur.

La mise à zéro est une commodité qui facilite le calcul de la déflexion du capteur. Lorsqu'un pont est installé, il est peu probable que sa sortie soit exactement de 0 V si aucune contrainte n'est appliquée. Au contraire, de légères variations de résistance le long des branches du pont génèrent une tension d'offset initial qui n'est pas nulle.

- Le réglage du gain permet d'ajuster le rapport entre la force appliquée au capteur et l'indication correspondante de façon à obtenir un rapport simple ou des indications permettant la lecture directe de la force et la déformation..

Le calibrage est un élément essentiel des ponts de mesure de précision. Il permet d'assurer la stabilité et la continuité des réglages du pont de mesure entre deux étalonnages. Il consiste soit en une résistance très stable substituée au pont de jauges du capteur, soit en une source de tension de référence permettant le calage électrique de l'amplificateur de mesure. Ce dispositif accessible à l'opérateur permet à tout moment de remettre le pont de mesure dans les conditions de référence obtenues lors de l'étalonnage du dynamomètre. Il permet en particulier de s'affranchir de l'évolution dans le temps des caractéristiques métrologiques des constituants du pont de mesure.

➢ **Microcontrôleur ATMEL ATMega328**

Le microcontrôleur ATMega328 est un circuit intégré qui muni d'un certain nombre de broches dont la programmation peut être réalisée en langage C.

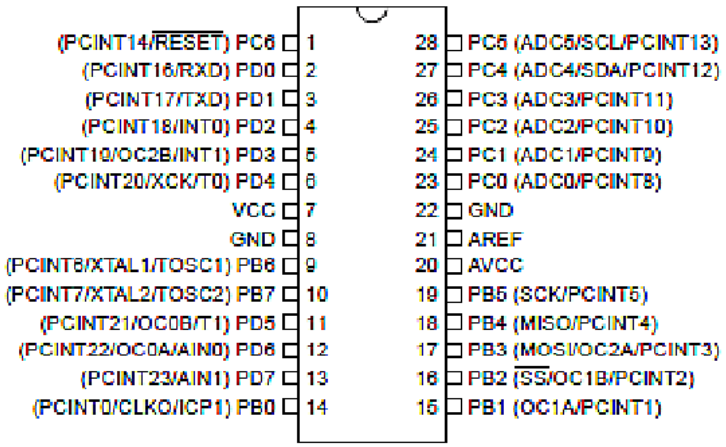


Figure III.6 : Microcontrôleur ATMEL ATMega328.

Le microcontrôleur ATMega328 est constitué par un ensemble d'éléments qui ont chacun une fonction bien déterminée. Il est en fait constitué des mêmes éléments que sur la carte mère d'un ordinateur. Globalement, l'architecture interne de ce circuit programmable se compose essentiellement sur :

- FLASH = mémoire programme de 32Ko
- SRAM = données (volatiles) 2Ko
- EEPROM = données (non volatiles) 1Ko
- Digital I/O (entrées-sorties Tout Ou Rien**)** = 3 ports PortB, PortC, PortD (soit 23 broches entout I/O).
- Timers/Counters : Timer0 et Timer2 (comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16bits) Chaque Timer peut être utilisé pour générer deux signaux PWM. (6 broches OCxA/OCxB)
- Plusieurs broches multifonctions : certaines broches peuvent avoir plusieurs fonctionsdifférentes choisies par programmation.
- PWM = 6 broches OC0A(PD6), OC0B(PD5), 0C1A(PB1), OC1B(PB3), OC2A(PB3),OC2B(PD3)
- Analog to Digital Converter (résolution 10bits) =6 entrées multiplexées ADC0(PC0) àADC5(PC5)
- Gestion bus I2C (TWI TwoWire Interface) = le bus est exploité via les broches

- SDA(PC5)/SCL(PC4).
- Port série (USART)=émission/réception série via les broches TXD(PD1)/RXD(PD0)
- Comparateur Analogique = broches AIN0(PD6) et AIN1 (PD7) peut déclencher interruption.
- WatchdogTimer programmable.
- Gestion d'interruptions (24 sources possibles**) .**

- Interruptions liées aux entrées **INT0 (PD2) et INT1 (PD3)**
- Interruptions sur changement d'état des broches **PCINT0** à **PCINT23**
- Interruptions liées aux Timers 0, 1 et 2 (plusieurs causes configurables)
- Interruption liée au comparateur analogique
- Interruption de fin de conversion **ADC**
- Interruptions du port série **USART**
- Interruption du bus **TWI** (**I2C**)

3.3 la carte ARDUINO UNO

Le système Arduino donne la possibilité d'allier les performances de la programmation à celles de l'électronique. Plus précisément, pour programmer des systèmes électroniques. Le gros avantage de l'électronique programmée c'est qu'elle simplifie grandement les schémas électroniques et par conséquent, le coût de la réalisation, mais aussi la charge de travail à la conception d'une carte électronique. Le système Arduino permet de :

- contrôler les appareils domestiques.
- fabriquer votre propre robot.
- faire un jeu de lumières.
- communiquer avec l'ordinateur.
- télécommander un appareil mobile (modélisme) .

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

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

- Sa capacité de communication avec Simulink/Matlab
- Ses performances, 32kB de mémoire flash, 14 entrées/sorties dont 6 PWM,

vitesse d'horloge 16Mhz et un port de communication USB. Ces performances sont largement suffisantes pour les applications que nous comptons réaliser.

- Son prix abordable, pour la dernière version d'Arduino Uno (R3).

Une vue réelle de la carte est schématisée par la figure (III.7)

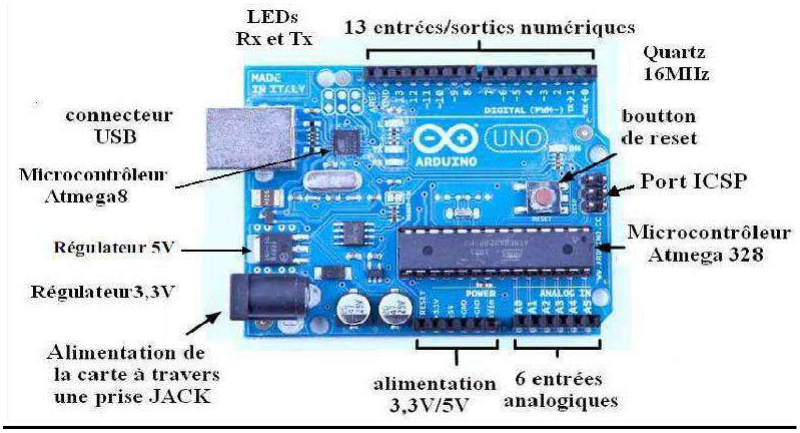


Figure III.7 : synoptique d'une carte Arduino Uno.

On note bien la présence des bornes suivantes (PIN) :

- Entrée alimentation externe 12V DC.
- Reset est une entrée pour un reset externe.
- Gnd, 3.3V et 5V sont des sorties d'alimentations régulées.
- Analog In (0..5) appelées aussi A0..5, sont des entrées analogiques 0-5V, la résolution du convertisseur ADC est 10bits, la référence de tension pour le convertisseur ADC est 5V par défaut.
- ICSP (In-Circuit Serial Programming) permet la programmation du microcontrôleur insitu, utile dans le cas d'une mise à jour du firmware du microcontrôleur.
- 13 entrées/sorties digitales, dont 6 PWM
- AREF entrée pour une référence de tension externe pour le convertisseur analogique numérique (ADC)
- SDA, SCL lignes de communication I2C

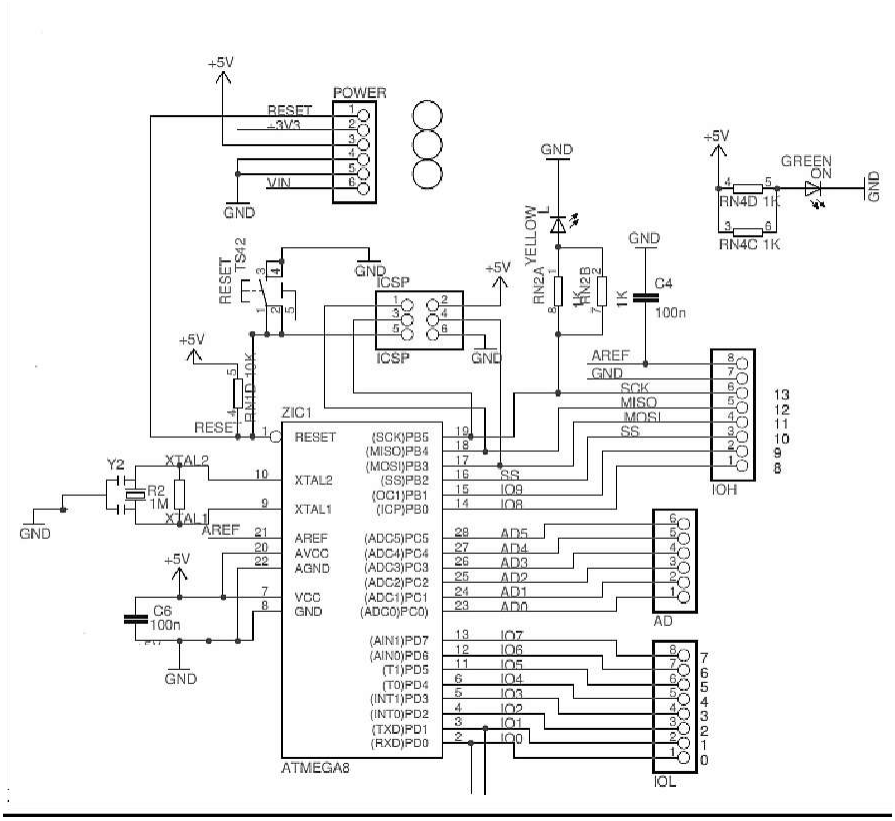


Figure III.8 : Schéma de la carte ARDUINO-UNO**.**

3.4 Les différentes cartes ARDUINO

Le tableau ci-dessous donne la liste des cartes ARDUINO, ainsi que leurs différentescaractéristiques.

Tableau III.1 : Cartes ARDUINO et caractéristiques.

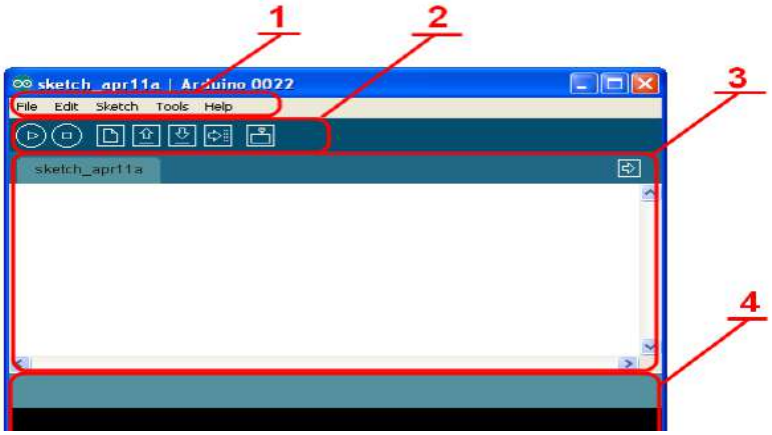
Name	Processor	Operating Voltage/Input Voltage	CPU Speed	Analog In/Out	Digital IO/PWM	EEPROM [KB]	SRAM [KB]	Flash [KB]	USB	UART
Uno	ATmega328	5 V/7-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	Regular	1
Due	AT91SAM3X8E	3.3 V/7-12 V	84 Mhz	12/2	54/12	-	96	512	2 Micro	4
Leonardo	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mega 2560	ATmega2560	5 V/7-12 V	16 Mhz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Mega ADK	ATmega2560	5 V/7-12 V	16 Mhz	16/0	54/15	4	8	256	Regular	4
Micro	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	12/0	20/7	1	2.5	32	Micro	1
Mini	ATmega328	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	1	2	32	-	-
Nano	ATmega168 ATmega328	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	0.512 1	1 2	16 32	Mini-B	1
Ethernet	ATmega328	5 V/7-12 V	16 Mhz	6/0	14/4	1	2	32	Regular	-
Esplora	ATmega32u4	5 V/7-12 V	16 Mhz	-	-	1	2.5	32	Micro	-
ArduinoBT	ATmega328	5 V/2.5-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Fio	ATmega328P	3.3 V/3.7-7 V	8 Mhz	8/0	14/6	1	2	32	Mini	1
Pro (168)	ATmega168	3.3 V/3.35-12 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	1
Pro (328)	ATmega328	5 V/5-12 V	16 Mhz	6/0	14/6	1	2	32	-	1
Pro Mini	ATmega168	3.3 V/3.35-12 V 5 V/5-12 V	8 Mhz 16Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	1
LilyPad	ATmega168V ATmega328V	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
LilyPad USB	ATmega32u4	3.3 V/3.8-5V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2.5	32	Micro	-
LilyPad Simple	ATmega328	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2	32	-	-
LilyPad SimpleSnap	ATmega328	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	4/0	9/4	1	2	32	-	-

3.4.1 Le logiciel

Au jour d'aujourd'hui, l'électronique est de plus en plus remplacée par de l'électronique programmée. On parle aussi d'électronique embarquée ou d'informatique embarquée.

3.4.2 L'interface

L'interface du logiciel Arduino se présente de la façon suivante :



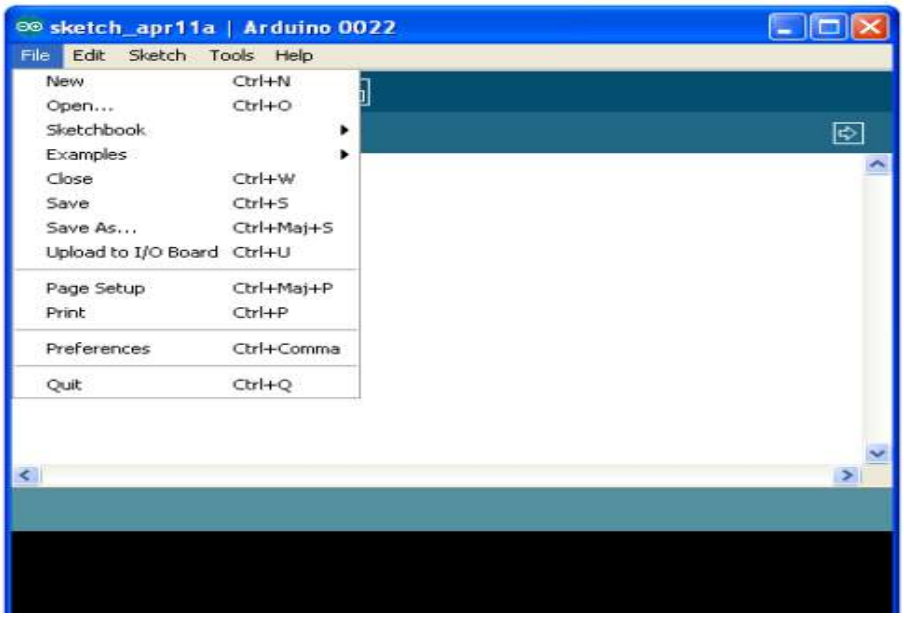
1 options de configuration du logiciel .

2 boutons pout la programmation des cartes .

3 programme à créer

4 débogueur (affichage des erreurs de programmation) .

Le menu File dispose d'un certain nombre de choses qui vont être très utiles :



New (nouveau) : va permettre de créer un nouveau programme. Quand on appuie sur ce bouton, une nouvelle fenêtre, identique à celle-ci, s'affiche à l'écran.

• Open... (ouvrir) : avec cette commande, on peut ouvrir un programme existant.

• Save / Save as... (enregistrer / enregistrer sous...) : enregistre le document en cours / demande où enregistrer le document en cours.

• Examples (exemples) : ceci est important, toute une liste se déroule pour afficher les noms d'exemples de programmes existant. Les boutons



1. permet de vérifier le programme, il actionne un module qui cherche les erreurs dans le programme arduino.odt.
2. Créer un nouveau fichier.

3. Sauvegarder le programme en cours
4. Liaison série.
5. Stoppe la vérification .
6. Charger un programme existant.
7. Compiler et envoyer le programme vers la carte .

3.5 Le langage Arduino

Le projet Arduino était destiné à l'origine principalement à la programmation multimédia interactive en vue de spectacle ou d'animations artistiques. C'est une partie de l'explication de la descendance de son interface de programmation de Processing.
Le Processing est une librairie java et un environnement de développement libre. Le logiciel fonctionne sur Macintosh, Windows, Linux, BSD et Android. Références :

- Le langage Java.
- Le langage C.
- L'algorithmique.

Cependant, le projet Arduino a développé des fonctions spécifiques à l'utilisation de la carte qui ont été listées ci-dessous. Vous obtiendrez la description de chacune d'elles dans le manuel de référence.

Tableau III.2 : instructions de programmation Arduino

Structure	Constants	Functions
• setup() • loop()	• HIGH, LOW • INPUT, OUTPUT, INPUT_PULLUP • LED_BUILTIN	E/S numérique • pinMode() • digitalWrite() • digitalRead() E/S analogique • analogReference() • analogRead() • analogWrite() - PWM E/S avancée • tone() • noTone() • shiftOut() • shiftIn() • pulseIn() Temps • millis() • micros()

		• delay() • delayMicroseconds() Bits et octets • lowByte() • highByte() • bitRead() • bitWrite() • bitSet() • bitClear() • bit() Interruptions externes • attachInterrupt() • detachInterrupt() Interruptions • interrupts() • noInterrupts() Communication • Serial • Stream

- **Le matériel**
- **Constitution de la carte**

Le micro-contrôleur

Il va recevoir le programme et le stocker dans sa mémoire puis l'exécuter.

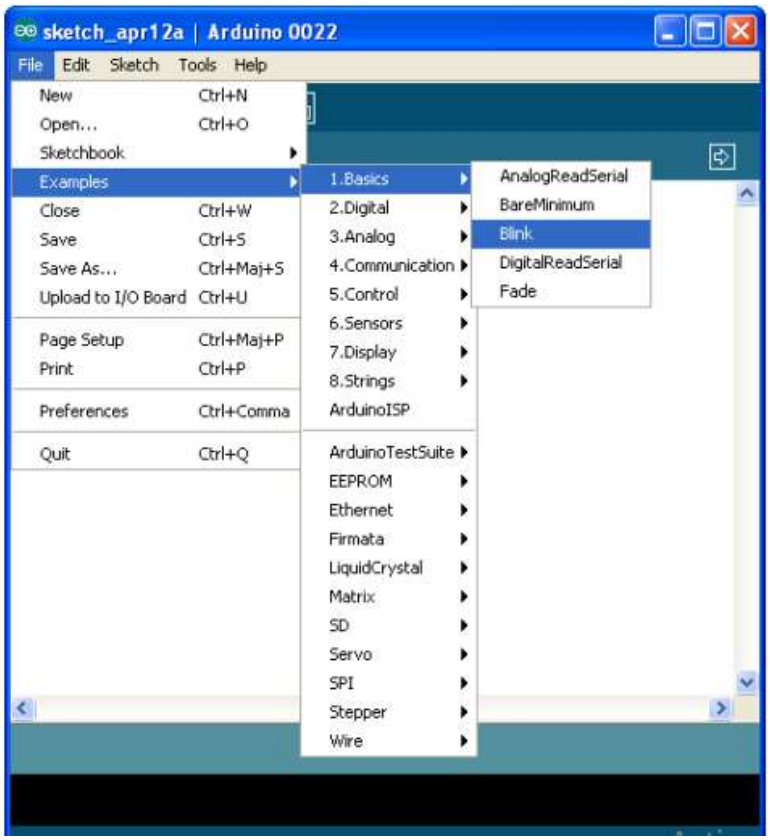
Alimentation : Pour fonctionner, la carte a besoin d'une alimentation.

Le microcontrôleur fonctionnant sous 5V, la carte peut être alimentée en 5V par le port USB (en 2) ou bien par une alimentation externe (en 3) qui est comprise entre 7V et 12V. Cette tension doit être continue et peut par exemple être fournie par une pile 9V. Un régulateur se charge ensuite de réduire la tension à 5V pour le bon fonctionnement de la carte.

Visualisation : Les trois "points blancs" entourés en rouge sont des LED dont la taille est de l'ordre du millimètre.

3.5.1 Test de la carte

On teste le matériel en chargeant un programme d'exemple que l'on utilisera pour tester la carte. On choisira un exemple qui consiste à faire clignoter une LED. Son nom est Blink et il se trouve dans la catégorie Basics.



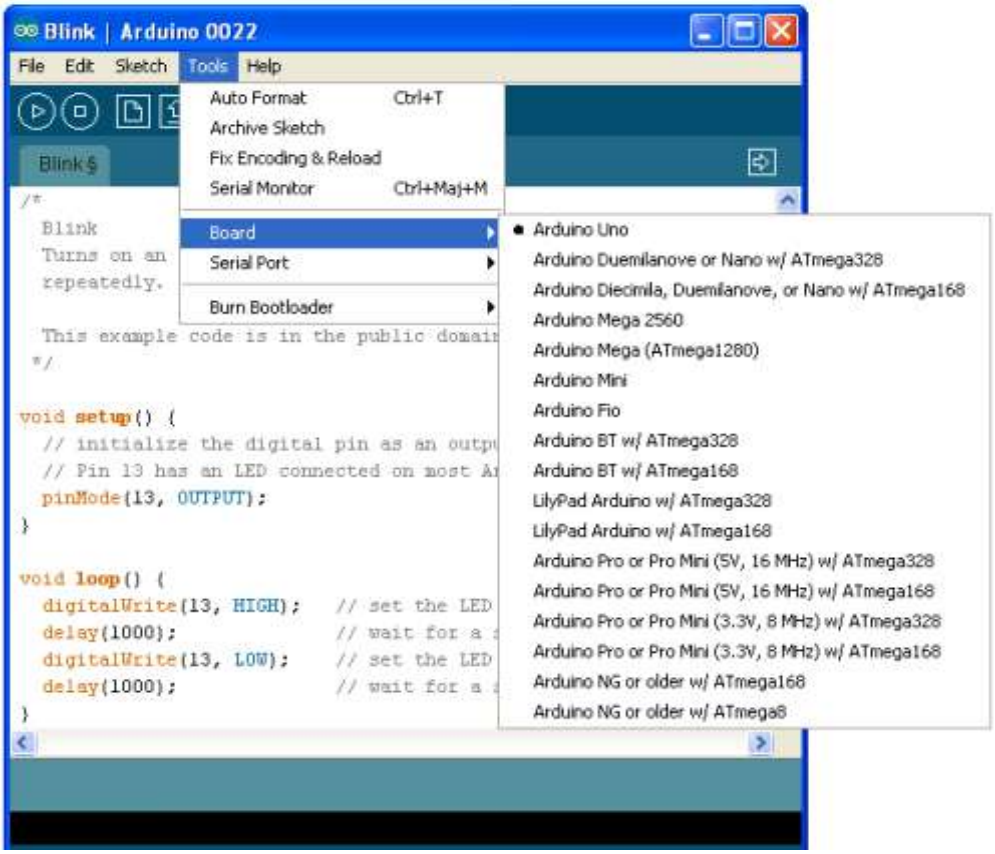
Ouvrir le programme Blink .

Une nouvelle fenêtre apparaît avec le programme Blink.

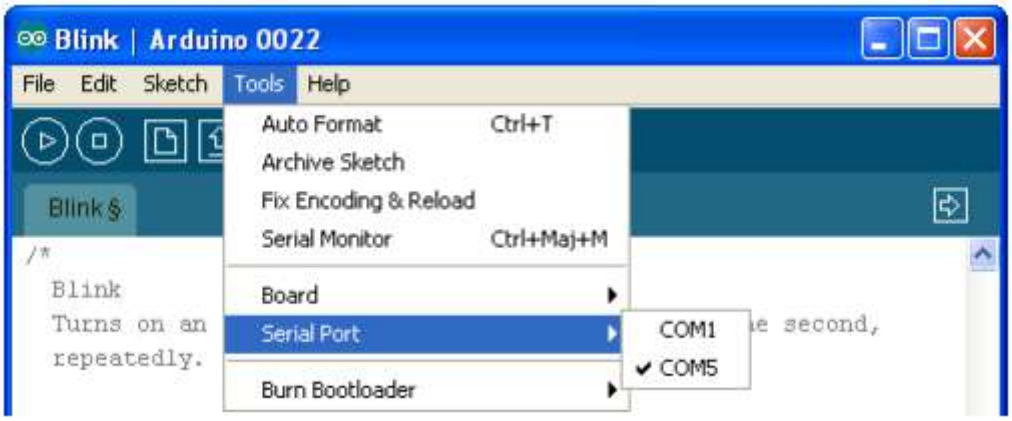


Avant d'envoyer le programme Blink vers la carte, il faut dire au logiciel quel est le nom de la carte et sur quel port elle est branchée. Pour cela, allez dans le menu "Tools" ("outils" en

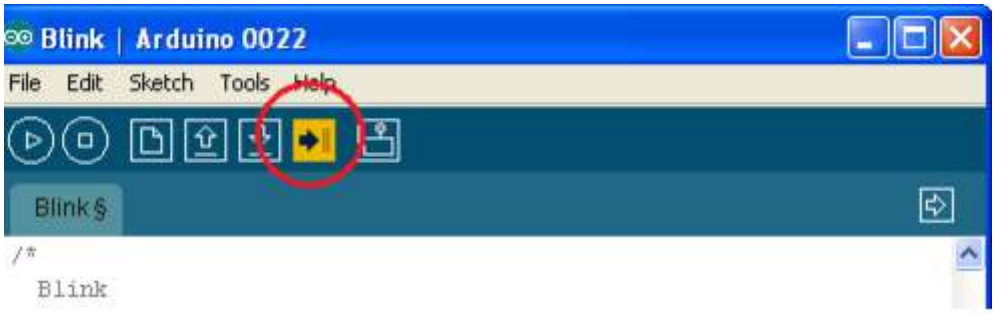
français) puis dans "Board" ("carte" en français). Vérifiez que c'est bien le nom "Arduin Uno" qui est coché. Si ce n'est pas le cas, cochez-le.



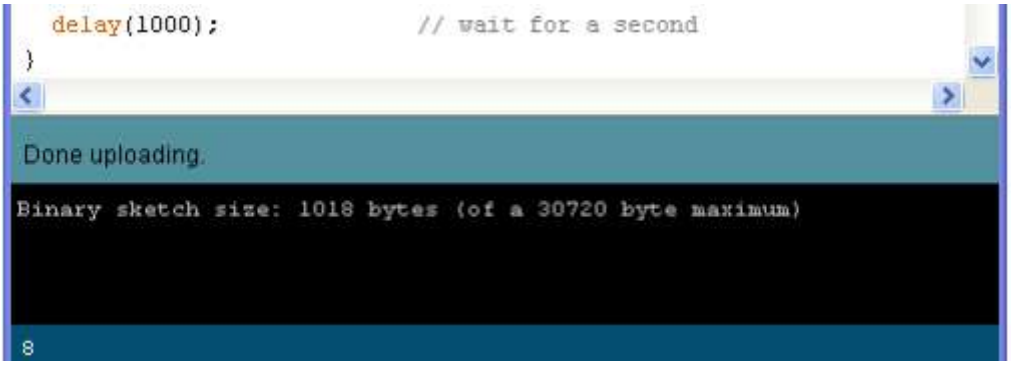
Allez ensuite dans le menu Tools, puis Serial port. Choisissez le port COMX, X étant le numéro du port qui est affiché. Ne choisissez pas COM1 car il n'est quasiment jamais connecté à la carte. Dans l'exemple, il s'agit de COM5 :



Maintenant, il va falloir envoyer le programme dans la carte. Pour ce faire, il suffit de cliquer sur le bouton Upload (ou "Télécharger" en Français), en jaune-orangé sur la photo :



En bas dans l'image, vous voyez le texte : "Uploading to I/O Board...", cela signifie que le logiciel est en train d'envoyer le programme dans la carte. Une fois qu'il a fini, il affiche un autre message :



Le message afficher : "Done uploading" signale que le programme à bien été chargé dans la carte. Si votre matériel fonctionne, vous devriez avoir une LED sur la carte qui clignote :

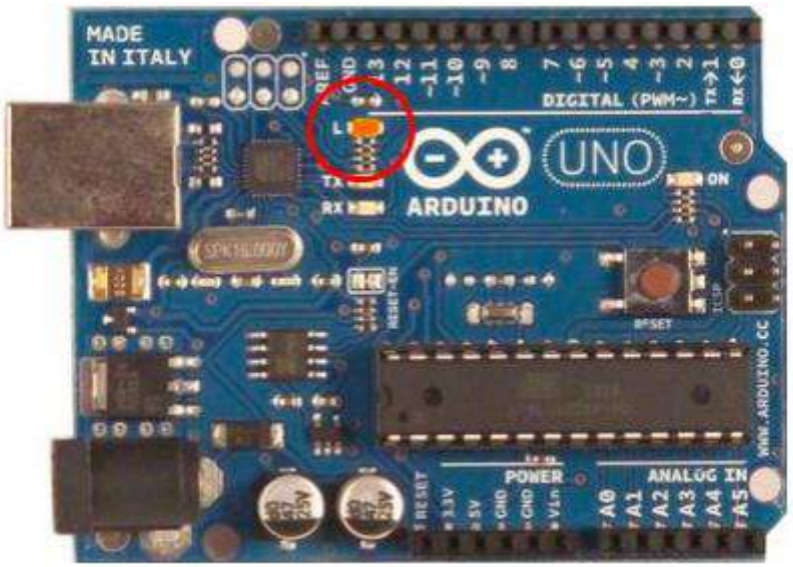


Figure III.9 Carte Aruino uno.

3.6 Connexion carte Arduino avec MATLAB et Simulink

Arduino est une marque de cartes programmables à base de micro-contrôleur à faible coût. Il existe plusieurs versions de cartes Arduino (Uno, Mega, Due…) avec des dimensions, capacité mémoire et interfaces entrée/sortie variables, permettant de s'interfacer facilement avec capteurs et actionneurs.

Des « shields », modules additionnels, permettent d'ajouter des fonctionnalités à la carte Arduino (ethernet, wifi, moteur…).

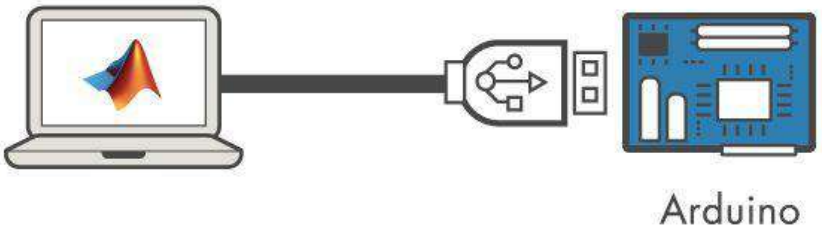
Ces caractéristiques font de la carte Arduino une plateforme modulable, adaptée au prototypage rapide dans une large variété d'applications :

- acquisition de signaux,
- pilotage d'un robot,
- domotique...

Avec la connectivité simplifiée entre MATLAB/Simulink et Arduino, vous disposez :

- d'un workflow complet pour modéliser, simuler et implémenter votre programme sur la carte Arduino,
- d'une librairie de blocs Simulink pour vous connecter aux entrées/sorties de la carte,

d'une communication directe entre MATLAB et Arduino.



Vous pouvez :

- adapter les paramètres du modèle et monitorer les signaux pendant l'exécution du programme sur la carte,

- déployer votre modèle pour une exécution autonome.

b. fonctionnement du système :

4 Le principe de fonctionnement de notre système de mesure de force et déformation repose sur le système a charge en déployons de pont de jauge de contraintes :

5 le premier pont qui sera un pont complet pour la force qui nécessite la conception d'un système mécanique qui n'est pas encore réalisé mais déjà étudié et calculé par Dr.Amoura (voir note de calcul dans l'annexe).

6 Le deuxième pont qui sera un demi pont deux jauges vont être collé dans une éprouvette et deux autres en dehors de l'éprouvette pour la déformation on peut utiliser une éprouvette de génie civile (système mécanique de l'éprouvette déjà existe.

7 Les deux ponts équilibrés ont leurs propre amplificateurs d'instrumentation et connectés à la carte arduino.

8 On va utiliser un programme similaire au système de charge mais avec quelques modifications pour avoir les valeurs de force et de déformation.

9 On peut aussi utiliser l'option de calibrage soft qui existe dans le programme arduino.

10 Finalement, une connexion arduino matlab est nécessaire avec un programme pour la visualisation des valeurs de la force et la déformation et le tracé de leurs courbes relatifs.

Conclusion

Notre système composant de deux pont de jauge, carte ARDUINO UNO et amplificateurs d'instrumentation, peut-être une alternative des anciens systèmes analogique de mesure pour les systèmes de tractions, compression, ou autres. Notre système peut trouver une utilisation dans d'autres applications après un développement.

conclusion générale

Les capteurs sont extrêmement importants dans le monde industriel moderne. Ils sont couramment utilisés pour mesurer de nombreuses grandeurs bien différentes dans des domaines aussi divers que les essais en laboratoire, les acquisitions de données sur site, les mesures en automation et les contrôles en assurance qualité. Le marché augmente sans cesse et rapidement et différents principes de collecte d'informations sont de plus en plus utilisés.

Cette tendance momentanée vers un choix plus large de technologies peut mener à un plus grand enthousiasme pour des méthodes de mesure plus récentes ou bien naissantes. Mais il est tout aussi important de considérer la possibilité que les technologies reconnues peuvent avoir des avantages considérables grâce à leur grande expérience avérée sur de nombreuses années.
Par exemple, les jauges de contrainte sont basées sur des principes scientifiques bien établis qui ont été perfectionnés par des progrès technologiques pour améliorer leur fonctionnement. En outre les jauges de contrainte avec une très bonne précision sont très simples à installer et à utiliser tout en étant d'un coût faible pour des solutions individuelles et uniques. Les avantages de ce type de jauges sont de loin supérieurs à leurs éventuels inconvénients.

Dans notre travail une étude théorique sur la contrainte, la déformation et le fonctionnement des jauges de contrainte est très importante, pour pouvoir comprendre le conditionnement des jauges et leur principe de fonctionnement et en donnant les caractéristiques et les différents types des jauges de contraintes. Dans le but, de réaliser notre système composé de deux capteurs. Un capteur de force et un capteur de déformation par l'utilisation de deux ponts à jauges de contrainte, les amplificateurs suivi d'une carte ARDUINO-UNO à base d'un microcontrôleur ATMEL ATMega328 afin de traduire les tensions induites par des valeurs de déformation et de force acquises et visualisé en courbes.

Ce modeste travail est à la fois bénéfique et intéressant pour nous car il est dans le cœur de notre spécialité et nous permettre d'évaluer notre savoir et avoir des nouvelles connaissances.

références bibliographiques

[1] Karl Hoffmann « An Introduction to Stress Analysis using Strain Gauges», HBM Test and Measurement.www.hbm.com.

[2] Patrick Robert « Mesures mécaniques des jauges, des ponts et solution de câblage pour chaquecas », Ingénieur commercial HBM France, Mesures 767, Septembre 2004.

[3] E. Alibi et S.Jawadi « Conception et réalisation d'un enregistreur de données », Rapport deprojet de fin d'études, Université Virtuelle de Tunis, 2011.

[4] Patrick Rommelure « Les jauges de déformations », Note technique ANSTJ, Mars 2002.

[5] G. Asch et al. Dunod « A1 Déformation élastique », pages 377-408, 1983.

[6] Luc Marchand, « Notion d'extensomètre par jauges a Resistances électriques », MEC6405 –Analyse expérimentale des contraintes Chapitre2, Janvier 2006.

[7] Alex Bertholet « Mesure hydraulique, jauges de contraintes », fabricant en laboratoire géniecivil place du levant N°1 1348Louvain-la-Neuve, Décembre 2007.

[8] Datasheet I.

[9] Datasheet ATMEGA328.

Ressources internet:

Contrainte.pdf

http://www.planete-sciences.org/espace/publications/techniques/jauges_deformation.pdf

http://www.arduino.cc/ftp://ftp.ni.com/pub/branches/france/mesures_courantes_2.pdf

http://www.tecquipment.com/Datasheets/SM1009_0713.pdf

http://www.groupes.polymtl.ca/mec6405/Receuil/M6405_Chap2_H06.pdf

http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=72842559

http://www.academia.edu/6795519/Mesure_hydraulique

http://lmm.epfl.ch/files/content/sites/lmm/files/shared/xA1%20D%C3%A9f-Elastiques%20Jauges-

1- COLLAGE DES JAUGES À LA COLLE M200 ET SOUDURE DESFILS DE CONNEXION :

➢ Vérification du matériel et nettoyage des Outils (étape1):

- Matériel :

Alcool, conditionneur, produit neutralisant, colle, catalyseur, jauges, papiers d'essuyage, cotons-tiges, soudure, flux, fer à souder, couteau, trombone, papier téflon, ruban adhésif,pince, pince à dénuder, plaque de transfert, poutrelle.

- Connecter le fer à souder.
- L'emplacement est poli à un angle de +45° et -45° avec du papier abrasif #220.
- Tracer les repères avec un stylo à bille
- Nettoyer avec de l'alcool isopropylique jusqu'à ce que le papier soit propre après essuyage.
- Nettoyer à l'alcool isopropylique tous les outils en Contact avec la jauge et la plaque detransfert

➢ Transfert de la jauge sur la plaque (étape2) :

- Couper 100 mm de ruban adhésif.
- Prendre la jauge avec une pince et la poser à l'endroit au centre de la plaque de transfert.
- Coller la jauge au ruban. Attention à la statique, procéder rapidement. Laisser le ruban sur laplaque de transfert.

➢ Préparation de la surface de la poutrelle (étape3) :

- Dégraisser si ça n'a pas encore été fait.
- Appliquer le conditionneur avec un papier (acide faible et très volatil). Essuyer immédiatement et fermement, ne pas laisser sécher. Ne pas frotter, appliquer et essuyer en uneseule passe. Bon si la teinte est uniforme et il y a évidence d'attaque.
- Appliquer le produit neutralisant pour ramener le pH aux environs de 7 (moins volatil). Frotter vigoureusement avec un coton-tige et essuyer immédiatement. Bon s'il n'y a pas de décoloration à la fin, sinon recommencer la séquence conditionnement-neutralisation.

-

➢ Collage (étape4):

- Décoller le ruban de la plaque de transfert (petit angle du ruban pour ne pas plier la jauge).
- Transférer la jauge sur la poutrelle en s'alignant sur les repères, les terminaux de la jaugesont dirigés vers le bout le plus éloigné de la poutre.
- Relever la jauge en repliant un côté du ruban (soulever avec un petit angle).
- Mettre du catalyseur sur le dessous de la jauge. En mettre très peu (essuyer 10 fois le pinceau) et arrêter le coup de pinceau une fois dépassé la jauge.
- Attendre 1 minute pour le séchage du catalyseur.

Les opérations suivantes doivent se dérouler en 10-15 secondes :

- Préparer à l'avance le trombone, le papier téflon et un dégagement facile du ruban collant.
- Essuyer le bec du pot de colle.
- Étendre une très petite goutte de colle sur la surface à l'aide du trombone.
- Pousser le ruban vers l'avant avec le pouce protégé par le papier téflon (collage de la jauge).
- Exercer une pression du pouce sur la jauge pendant 1 minute (accélère la polymérisation).
- Remettre le bouchon sur le pot de colle.

❖ **procéder au collage de la rosette en suivant les étapes 1 à 4.**

➢ Soudage des fils (étape5):

- Dénuder environ 6 mm de fils, joindre le noir et le blanc ensemble, mettre du flux et étamer les fils.
- Couper les bouts étamés à une longueur égale d'environ 2 à 3 mm (assez court pour éviter le contact du conducteur avec la poutre)
- Retirer le ruban collant de la jauge en rabattant complètement le ruban et en tirant de côté à 45°.
- Étamer les terminaux de la jauge. Mettre du flux sur Chaque terminal et fondre une petite goutte de soudure. Ne pas court-circuiter les terminaux.
- Souder les fils aux terminaux

- Dénuder et étamer individuellement sur 20mm, les trois fils à l'autre extrémité (le noir, le blanc et le rouge sont séparés). Après avoir mis du flux sur les fils, glisser le fil à travers une goutte de soudure posée sur le fer.
- Identifier les fils de chaque jauge
- Attacher les fils à la poutre avec du ruban collant pour les protéger d'un arrachement accidentel.

➢ Vérifications à faire (étape6):

- Résistance de la jauge
- Isolation à la masse
- Mise à zéro
- Retour à zéro après chargement et chauffage léger.

2- Opérations de collage des jauges:

Des jauges métallique a support, nous verrons successivement plusieurs procédés de collage : d'une part, par la colle rapide, technique présentant certaines particularités, d'autre part par les colles époxy ainsi que les colles destinées aux moyennes températures, qui présentent toutes certaines analogies sauf en ce qui concerne les dosages et les températures de traitement pour décrire ces opérations, plutôt que d'utiliser un texte avec des renvois incessants a des figures, nous avons préférer décrire les opérations successives en légendes de dessins. Cette présentation dans le style des bandes dessinées peut paraitre peu académique, mais elle a par contre l'avantage de la clarté et de la concision.

➢ 1ére opération :

Dégraisser initialement la pièce a l'aide de solvants tels que le chlorothéne NU et le fréon TF. Le chlorothéne NU est préférable toutes les fois que c'est possible, puisque les dégraissants chlorés sont très actifs. Il existe des matériaux tels que le titane et les plastiques qui réagissent avec les dégraissants chlorés. Le fréon permet de remplacer ces produits (lorsque l'on travaille sur tels matériaux).chaque dégraissage doit être pratiqué avec des solvants propres. Aussi l'usage des bombes « aérosols » est fortement recommandé.



Figure 1 : 1ére opération de collage

- **2éme opération** :

La surface qui doit recevoir la jauge nécessite un polissage a sec avec un papier abrasif au carbure de silicium (siliconcarbide) N°220 ou 320 pour enlever les oxydations ou défauts a la surface du matériau. Appliquer le conditionneur A et procéder a un polissage avec le papier abrasif en gardant la surface mouillée durant le polissage. Nettoyer en passant lentement une compresse de gaze sur la surface traitée. Cette opération doit être répétée. Avec un crayon a mine 4H sur de l'aluminium ou la pointe d'un crayon a bille sur de l'acier, tracer les repèresde positionnement de la jauge sur la pièce. Humecter a nouveau avec le conditionneur A et frotter avec des coton tiges jusqu'à obtenir un coton propre. Nettoyer à nouveau avec le conditionneur A en faisant une seule passe avec chaque compresse de gaze jusqu'à obtenir unecompresse propre.

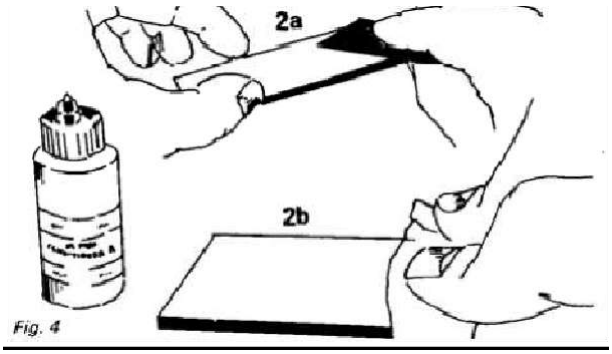


Figure 2 :2éme opération de collage

- **3éme opération :**

Déposer du neutraliseur 5 sur la surface qui doit recevoir la jauge. Éviter de laisser

sécher etnettoyer avec les coton-tiges.ne pas permettre une évaporation du produit de nettoyage car il pourrait laisser un dépôt entre la colle et le matériau, ce qui empêcherait un collage efficace. utiliser les compresses de gaze pour absorber le neutraliseur 5 en ne faisant qu'une passe jusqu'à obtenir une compresse propre

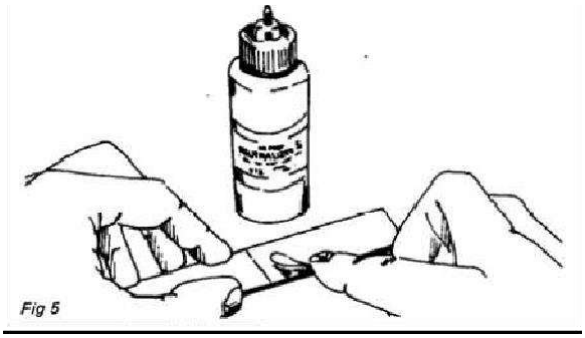


Figure 3 : 3éme opération de collage

- **4éme opération :**

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

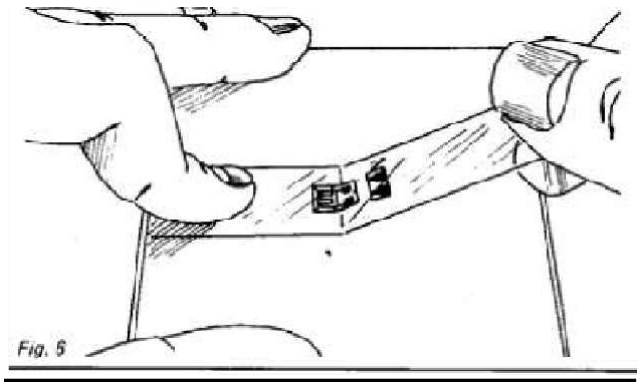


Figure 4 : 4éme opération de collage

- **5éme opération :**

Positionner la jauge a l'aide du ruban adhésif selon les repères du support et la trace visiblesur la structure. Si les repères ne sont pas parfaitement alignés, relever

le ruban sous un faible angle et remplacer la jauge de la même manière que précédemment jusqu'à obtenir la coïncidence des repères. Fixer soigneusement un bout de ruban sur la structure durant cette opération évité de souiller la surface réservée a la jauge.

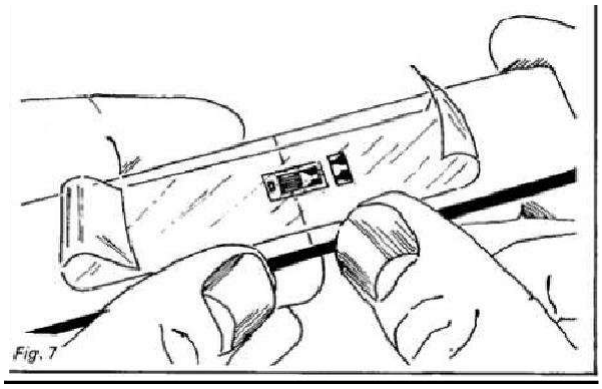


Figure 5:5éme opération de collage

- **6éme opération :**

Soulever le ruban d'un coté seulement sous un angle 45° environ avec la surface jusqu'à ce que la jauge et les cosses relais soient libérées de la structure (figure 8a) et fixer le ruban tel qu'il l'est indiqué sur la figure 8b. Dans certains cas cette opération est rendue difficile par le manque de place. Si cela se produit, maintenir avec un doigt, le ruban adhésif au niveau de la jauge pendant l'opération d'encollage.

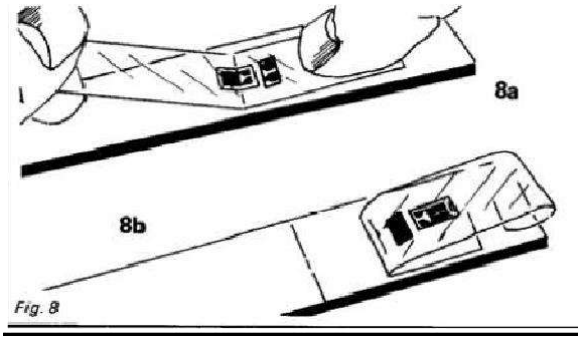


Figure 6 :6éme opération de collage

- **7éme opération :**

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

méticuleusement sur toute leur surface, de façon continue. Enlevé trop brusquement, le pinceau laisse trop de catalyseur là ou on l'a retiré. Laisser sécher le catalyseur ce qui dure environ une minute aux températures normales.

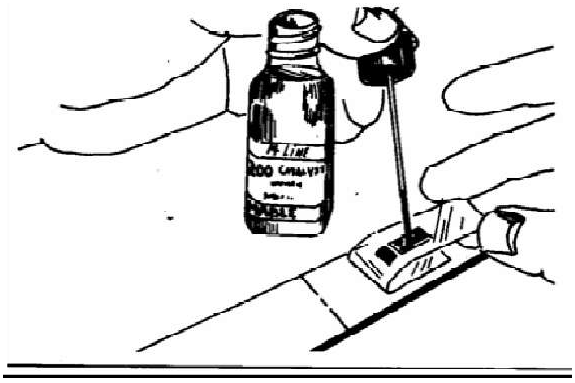


Figure 7 :7éme opération de collage

- **8éme opération :**

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

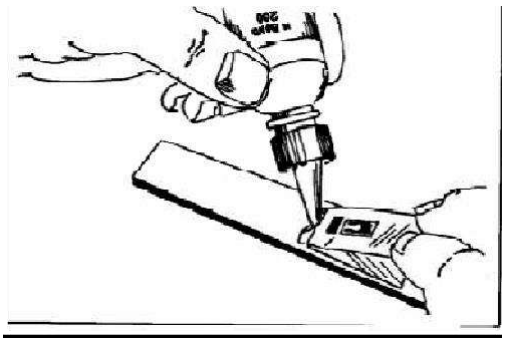


Figure 8 :8éme opération de collage

- **9éme opération :**

Présenter le ruban adhésif au-dessus de la structure, sous un angle faible. A l'aide d'un tampon de gaze, le coller progressivement en refoulant la goutte de colle, afin qu'elle se propage sur toutes les surfaces a coller. Déplacer cette gaze avec fermeté et d'une seule passe.

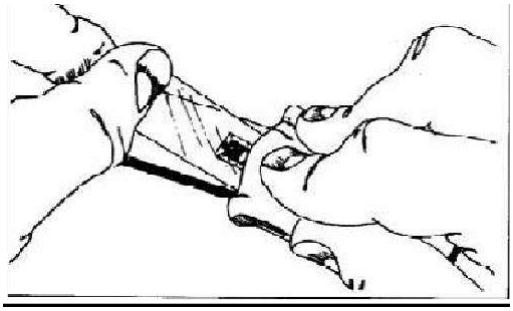


Figure 9 :9éme opération de collage

- **10éme opération :**

Presser la jauge durant une minute en appuyant forcement son pouce sur l'emplacement de la jauge. La pression et la chaleur du pouce provoquent une polymérisation rapide. Si le pouce reste collé, la première fois, on aura appris d'une part, que la colle est bonne, mais surtout que l'on n'a pas bien rotté l'ensemble, comme recommandé ci-dessous.

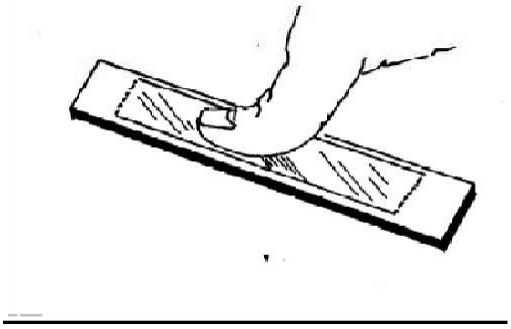


Figure 10 :10éme opération de collage

- **11éme opération :**

La jauge et la plaquette étant désormais bien collées. On attend deux minutes, après quoi, on peut retirer le ruban adhésif. Le retirer sous un angle très vif (180°), replié sur lui-même, ce qui facilite la séparation définitive de ce ruban provisoire de la jauge et de la plaquette de cosses-relais. Il n'est pas absolument obligatoire de retirer le ruban adhésif au bout de ces deux minutes. Si nous devons faire autre chose, par exemple, chauffer le fer a souder, préparer les fils, etc.., autant le laisser jusqu'au dernier instant. Une jauge n'à rien gagner et tout a perdre a rester nue exposée a l'humidité et aux poussières. La jauge est prête à être câblée, nettoyée, protégée et contrôlée.

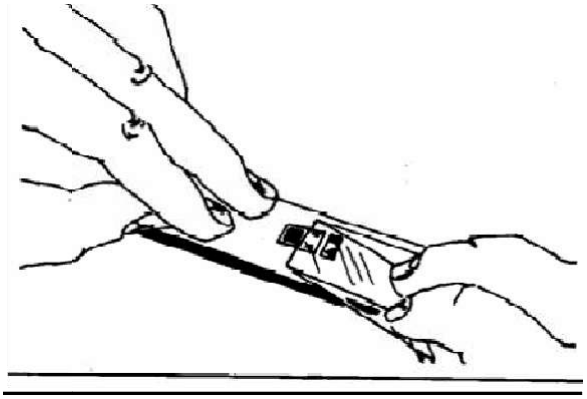


Figure 11 :11éme opération de collage

Note de calcule

