

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZ-I OUZOU



FACULTE DE GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Electronique
Filière : Télécommunications et Réseaux

Thème

Conception et réalisation d'un système de mesure électronique pour un banc didactique d'études des jauges de contraintes

Présenté par
Mlle BOUDJEMAI Lynda

Mémoire dirigé par :

- Mr ACHOUR Hakim

Promotion 2013//2014

Remerciements

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 réaliser ce modeste travail.

Je remercie mes parents et amis tant pour leurs soutien et conseils que pour le temps qu'ils m'ont consacré chaque fois que sollicités.

Je tiens à exprimer mes remerciements et mes profondes considérations a :

- ❖ Mon promoteur : Mr. ACHOUR pour le temps précieux qu'il a consacré à m'orienter, me conseiller et pour sa sollicitude particulière a mon égard.
- ❖ 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.

Merci

SOMMAIRE

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

CHAPITRE 1 : DESCRIPTION DU BANC DIDACTIQUE d'ETUDES DES JAUGES DE DEFORMATIONS-SM1009

1.1-Introduction.....	03
1.2-Description du banc d'études de jauges de déformations.....	03
1.2.1-Description.....	04
1.2.2- Le système de traction.....	05
1.2.3- Le système de torsion.....	06
1.2.4- Le système de flexion.....	07
1.2.5-L'afficheur de tension.....	08
1.3-Méthodes de mesure pour les jauges résistive.....	08
1.4-Position des jauges dans un pont complet.....	10
1.4.1-En Traction/compression uni axiale.....	10
1.4.2- En Flexion.....	10
1.5- La précision des jauges.....	11
1.6- Techniques de préparation des surfaces, collage et protection.....	11
1.7- Le support.....	11
1.8-Les adhésifs.....	12
1.9- Conclusion.....	13

CHAPITRE 2: GENERALITES SUR LES JAUGES DE CONTRAINTES

2.1-Introduction.....	14
2.2-Définitions.....	14
2.2.1- la contrainte.....	14
2.2.2- la jauge.....	14
2.3-Principe de fonctionnement des jauges de contraintes.....	15
2.3.1-Facteur de jauge.....	16
2.3.2-Conditionnement des jauges : pont de Wheatstone.....	17
2.4- Principe de mesure.....	18
2.5-Présentation de la relation contrainte-déformation.....	22
2.5.1-Jauge de déformation.....	22
2.6- Les différents types de jauges de contraintes.....	23

2.6.1- les jauges PIEZO-résistives ou à semi conducteurs.....	24
2.6.2- les jauges métalliques	24
2.7-Effets parasites	26
2.7.1-Température	26
2.7.2-Hystérésis	26
2.7.3-Erreur de linéarité	27
2.7.4- Effet thermique	27
2.8- Capteurs a jauges de contraintes	27
2.8.1-Les capteurs de force	27
2.8.2- Capteur de couple	28
2.8.3- Les capteurs de position.....	29
2.8.4- CAPTEUR DE PRESSION.....	29
2.9- Caractéristiques de la jauge de contrainte.....	30
2.9.1- Sensibilité du montage.....	30
2.9.2-Calibration par résistance de shunt	31
2.9.3- Désensibilisation due à la longueur des câbles	32
2.9.4- Puissance maximale recommandé	33
2.9.5-Elongation maximale	33
2.9.6-Réponse dynamique	33
2.9.7- Equilibrage du pont.....	34
2.9.8-Câblage des jauges	34
2.10-Conclusion	35

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET REALISATION DE LA CARTE

3.1-Introduction.....	36
3.2-Structure générale du système électronique a réalisé	36
3.2.1- Amplification de la tension de sortie du pont	38
3.2.2-Description de la carte ARDUINO-UNO	40
3.2.3-Description de l’afficheur LCD	50
3.2.4-Schéma d’implantation des composants de la carte électronique.....	55
3.2.5-Circuit imprimé de la carte électronique.....	55
3.2.6-Schéma de la carte électronique.....	56
3.2.7-Structure des boutons poussoirs.....	56
3.3-Fonctionnement du système.....	56

3.4-Exemple d’affichage du premier menu.....	61
3.5-Conclusion	62
CONCLUSION GENERALE	63
ANNEXE	65
BIBLIOGRAPHIE	74
LISTE DES FIGURES.....	75

1. Introduction générale :

L'origine des jauges à résistances électrique trouve sa source dans une série d'expériences conduites par « William Thomson » (lord kelvin) au sujet des propriétés électromécaniques des métaux. Une de ces découvertes en 1856 était que la résistance électrique de certains fils varie lorsqu'ils sont étirés. Depuis ce phénomène a été quantifié comme étant le facteur de jauge qui est le rapport entre la variation de résistance unitaire ($\Delta R/R$) et l'allongement unitaire ($\Delta L/L$) du conducteur.

Le développement des premières jauges en Amérique du nord remonte aux années 1930. Elles furent fabriquées par Simmons et Ruge dans leur laboratoire du MIT. Ces premières jauges consistaient en un fil enroulé autour d'un support en papier. En 1952 les anglais « Sandres and Roe » introduisirent les jauges à trame pelliculaire qui sont fabriquées par un procédé de photogravure. Depuis lors, c'est devenu la technique expérimentale d'analyse des contraintes la plus populaire.

La connaissance des déformations et des contraintes maximales qui apparaissent dans les organes de machines ou les constructions statiques en service est indispensable pour garantir la sécurité lors de leur fonctionnement. En général, la détermination directe des forces ou des contraintes agissant dans un organe de machine nécessite l'insertion d'un capteur de force une (modification de la construction). Ceci n'est praticable que dans un prototype ou une maquette. En revanche, la détermination indirecte des contraintes par l'intermédiaire des déformations est beaucoup plus facile, car elle peut s'effectuer à la surface de la pièce. Les lois constitutives entre les contraintes et les déformations pour la pièce observée doivent évidemment être connues dans ce cas. La mesure des déformations à des endroits choisis permet donc de calculer les contraintes qui sont à leur origine. La métrologie moderne nous met à disposition un grand choix de capteurs de déformation et de déplacement.

Ce travail porte sur la réalisation d'une carte électronique qui va nous donner la possibilité de régler les problèmes de maintenance, qui se posent dans l'électronique du banc didactique d'étude des jauges ainsi notre choix s'est porté sur une carte ARDUINO UNO pour mettre en place un programme pour un système d'affichage qui nous permette d'afficher la tension et la déformation du pont. Nous verrons d'abord plus en détail la description du banc didactique d'étude des jauges de contrainte et la mesure de différentes déformations par jauges de

contraintes. Puis nous étudierons les caractéristiques de la jauge. Aussi notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre porte sur la description du Banc didactique d'étude des jauges de déformation permettant de montrer comment les jauges de déformations à base de résistances électriques fonctionnent, d'effectuer des comparaisons entre différents modes de sollicitations mécaniques et d'étudier comment elles mesurent des déformations au sein de différentes structures.

Le second chapitre introduit les jauges de contraintes en définissant la contrainte, la jauge et sa constituants ainsi que le principe de fonctionnement des jauges puis en citant les différents types de jauges et en donnant aussi leurs différentes caractéristiques.

Le dernier chapitre est destiné à la réalisation de la carte électronique se composant du pont de jauge, carte ARDUINO et afficheurs LCD avec présentation de la carte ARDUINO UNO et de son microcontrôleur ATMEL ATmega328. Les étapes d'installation et de mise en fonctionnement de la carte seront données en fin de ce chapitre.

1.1 Introduction :

Les contraintes sont les données et exigences à prendre en compte lors d'une construction. Pour répondre à chaque contrainte, plusieurs solutions techniques peuvent convenir.

Le banc didactique d'étude des jauges de contraintes montre aux utilisateurs comment les jauges de contrainte fonctionnent et comment les utiliser correctement. Il leur montre comment mesurer la déformation de différentes manières et comparer la contrainte affichée avec la contrainte théorique de différents matériaux et structures. C'est une pièce complète d'équipement avec un ensemble de dispositifs communs de jauge de contrainte et les mécanismes structurels. Le dispositif d'affichage numérique de la déformation montre la tension de sortie provenant des circuits de pont de contrainte, calcule automatiquement et affiche la contrainte.

Dans ce chapitre, nous aborderons une étude sur ce banc didactique et les différents modes de sollicitations mécaniques et étudierons comment elles mesurent des déformations au sein de différentes structures.

1.2 Description du banc didactique :

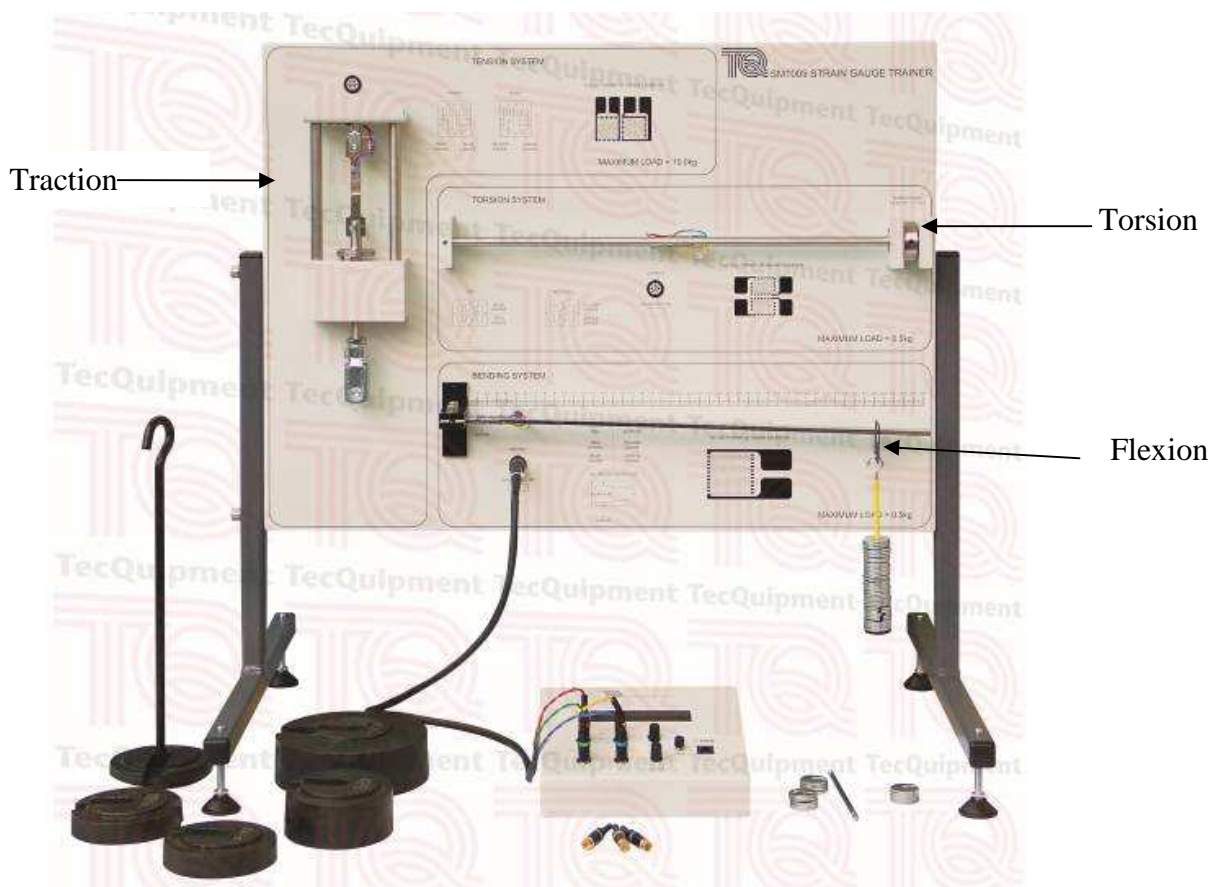


Figure1: Banc didactique d'étude des jauges de déformation - SM1009

1.2.1 Description :

Le banc didactique d'étude des jauges de déformation permet de montrer comment les jauges de déformations à base de résistances électriques fonctionnent, d'effectuer des comparaisons entre différents modes de sollicitations mécaniques et d'étudier comment elles mesurent des déformations au sein de différentes structures.

➤ Exploitations pédagogiques :

Le banc permet de réaliser les travaux pratiques (TP) suivants:

- Introduction à l'extensomètre et aux différents fonctionnements (quart, demi et pont complet)
- Déformation et contraintes dans une éprouvette en flexion
- Déformation et contraintes dans une éprouvette en torsion
- Déformation et contraintes dans une éprouvette en traction et détermination du coefficient de poisson et du module de Young
- Comparaison des différents systèmes de mesure de déformations et mesure de forces

➤ Spécifications techniques du banc :

Il est constitué de :

- Trois éprouvettes équipées de jauges protégées pour la manipulation et placées sur un châssis équipé de pieds permettant des essais en flexion, en traction et en torsion.
- Une éprouvette de flexion en acier de section 5 x 20 mm équipée de quatre jauges.
- Une éprouvette de torsion en acier de 10 mm de diamètre équipée de deux jeux de jauges à 45°.
- Une éprouvette de traction en acier de section 2 x 10 mm équipée de deux jeux de jauges en T à 90°.
- Pont d'extensomètre permettant le fonctionnement en quart, demi et pont complet.
- Sortie du pont en μV , lecture en microdéformation, réglage du facteur de jauge.
- Jeu de poids couvrant une gamme de 10g à 500g par incrément de 10g pour l'application des charges en flexion, en torsion.
- Jeu de poids couvrant une gamme de 0.5 Kg à 10Kg pour l'application des charges en traction.
- Chaque éprouvette est équipée de jauges protégées pour une manipulation par des utilisateurs et l'éprouvette en traction est équipée de deux jauges à angle droit (rosette).
- Alimentation électrique : 220 V - 50 Hz.

- Dimension et poids $L \times l \times h$: 760x520x720 mm 27.5 Kg.

La figure1 montre la partie principale du banc de jauge de contrainte. C'est le châssis robuste qui détient trois différents systèmes structuraux et communs. Il s'adapte facilement sur un bureau ou une table de travail et offre aux étudiants un outil clair et facile à utiliser pour des expériences avec des jauges de contrainte.

1.2.2 Le système de traction [1] :

Le système de traction a une éprouvette d'essai de traction. Cela montre la déformation dans différents matériaux quand ils sont stressés (ou étirés) le long de leur axe.

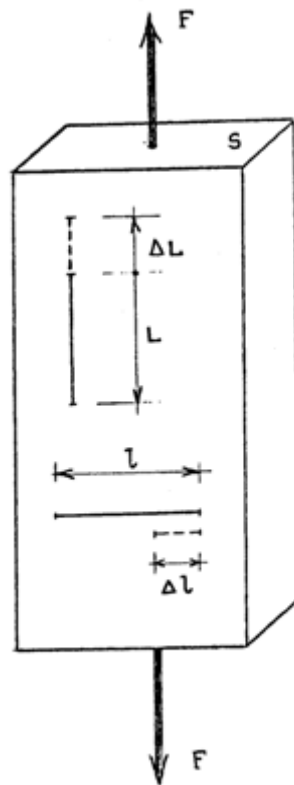


Figure 2 : éprouvette d'essai de traction

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

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta l}{l} \quad (1)$$

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

$$\varepsilon_{xx} = -\frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Expérimentalement il est possible de vérifier qu'entre l'allongement relatif ε_{zz} et la contraction ε_{xx} il existe une proportionnalité :

$$\varepsilon_{xx} = -\mu \varepsilon_{zz} \quad (3)$$

Le coefficient de proportionnalité μ est le coefficient de poisson :

- C'est un nombre sans dimension.
- $\mu=0.3$ pour les métaux

Les allongements relatifs ε_{zz} et ε_{xx} sont proportionnels à la contrainte appliquée c'est-à-dire au rapport de la force à la section, soit :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{en kg/cm}^2) \quad (4)$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (5)$$

Le facteur de proportionnalité (E) qui lie la contrainte à la déformation, est le module d'élasticité ou module de YOUNG. Un dispositif de serrage maintient la partie supérieure de l'éprouvette et les utilisateurs peuvent ajouter des poids connus relié au fond de l'éprouvette.

1.2.3 Le système de torsion :

Une poutre est sollicitée en torsion simple lorsqu'elle est soumise à ses deux extrémités à des actions mécaniques dont les torseurs associés se réduisent à deux torseurs couples opposés dont les moments sont parallèles à la ligne moyenne.

La ligne moyenne de la poutre est le lieu des centres de surfaces des sections droites successives. Ces dernières sont les sections planes et perpendiculaires à la ligne moyenne de la poutre. Quatre jauges de contrainte standards mesurent la torsion dans l'axe de la poutre.

Mesure sur un barreau de torsion

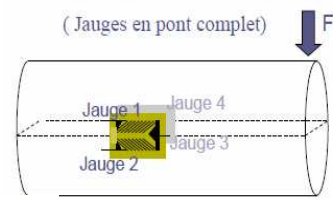


Figure 3 : éprouvette d'essai de torsion

1.2.4 Le système de flexion :

Il s'agit d'une poutre maintenu fixement à une extrémité. Il simule plusieurs systèmes mécaniques et de construction tels que :

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

La poutre peut se plier ou «dévier» vers le haut ou vers le bas, mais dans notre cas, les expériences plient la poutre vers le bas. Quatre jauges de contrainte standards mesurent la flexion et des contraintes de compression dans l'axe de la poutre. Deux jauges mesurent la déformation de flexion sur le dessus de la poutre. Les deux autres jauges mesurent la contrainte de compression au-dessous de la poutre. Voir la figure ci-dessous :

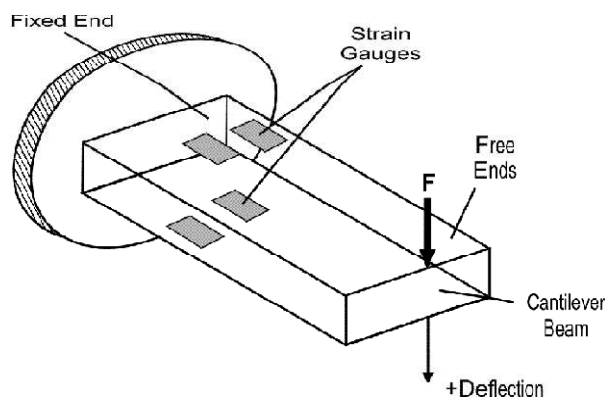


Figure 4:Poutre de flexion.

1.2.5 L'électronique du banc didactique d'étude des jauges :

La figure ci-dessous nous présente l'électronique du banc didactique des jauges de contraintes. Ce module de mesure est constitué d'un pont de Wheatstone qui nous permet de relier des jauges de contraintes standards et d'afficher directement les valeurs de déformations et tension sur un écran numérique. Il est également équipé de trois boutons réglables permettant de choisir le facteur de jauge (de 1.9 à 2.3) qui correspond au système qu'on a choisis pour réaliser la mesure et le second bouton pour configurer notre pont en $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$ ou pont complet en fin le 3ème bouton sert à équilibrer notre pont c.-à-d. le mettre à zéro avant de commencer les mesures.



Figure 5 :L'électronique du banc didactique d'étude des jauges

1.3 Méthodes de mesure pour les jauges résistives [2]:

Le pont de Wheatstone est un circuit qui permet de mettre en évidence une variation de résistance ΔR . Ce circuit comprend 4 résistances électriques dont une ou plusieurs peuvent être remplacées par des jauges actives. Le pont est alimenté par une tension UE (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 UA s'annule. Selon le type de pont utilisé, des potentiomètres de faible résistance doivent être branchés dans le circuit. Le pont est équilibré ($UA = 0$) lorsque :

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \Rightarrow UA = 0 \quad (6)$$

Après remplacement de $R1$ par une jauge et en laissant $R2$, $R3$ et $R4$ comme résistances fixes et équilibrées avant déformation de la jauge, la variation $\Delta R1$ de $R1$ provoque un déséquilibre et la tension de sortie UA devient :

$$\frac{UA}{UE} = \frac{R1 + \Delta R1}{(R1 + \Delta R1) + R2} - \frac{R4}{R3 + R4} \quad (7)$$

Dans la pratique, on utilise trois résistances ($R2$, $R3$ et $R4$) d'une valeur identique à la valeur nominale $R1$ de la jauge, qui pour les jauges métalliques, vaut typiquement 300Ω . Puis, en tenant compte que $\Delta R1 \ll R1$, la formule se présente sous une forme plus simple et la tension de sortie du pont déséquilibré devient directement proportionnelle à $\Delta R1$:

$$\frac{UA}{UE} = \frac{\Delta R1}{4R1} = \frac{1}{4} K \epsilon \quad (8)$$

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 3 résistances fixes sur l'éprouvette. Ceci peut être fait à un endroit mécaniquement non sollicité. Une solution encore plus avantageuse est l'utilisation du pont complet. Il comporte directement 4 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 6). Un pont en équilibre avec les résistances Ri et déséquilibré par les ΔRi Donne une tension de sortie UA de :

$$\frac{UA}{UE} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R1}{R1} - \frac{\Delta R2}{R2} + \frac{\Delta R3}{R3} - \frac{\Delta R4}{R4} \right) \quad (9)$$

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

$$\frac{UA}{UE} = \frac{K}{4} (\epsilon1 - \epsilon2 + \epsilon3 - \epsilon4) \quad (10)$$

1.4 Position des jauges dans un pont complet :

1.4.1 Position des jauges et mesure de déformations en traction/compression uni axiale [2]:

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

$$\frac{UA}{UE} = \frac{K}{2} (\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx}) = \frac{K}{2} (1 + \mu) \epsilon_{zz} \quad (11)$$

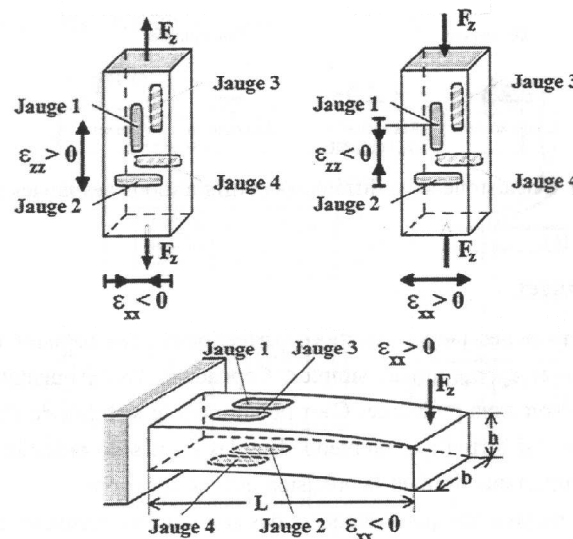


Figure 6: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction, compression et en flexion

1.4.2 Position des jauges et mesure de déformations en flexion [2] :

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

$$\frac{UA}{UE} = K \epsilon_{zz} \quad (12)$$

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.

1.5 La précision des jauges [2] :

Grâce à des voltmètres et des jauges résistives perfectionnés, les mesures de déformations sont devenues rapides et apparemment simples. Cependant, l'expérimentateur ne doit pas croire que la méthode soit sans problème. C'est notamment la stabilité de l'installation après équilibrage du pont qui est difficile à maintenir dans les limites de précision requises (10^{-6}). Les facteurs les plus importants limitant la précision des mesures sont :

- Les variations de la température qui provoquent des contraintes thermiques dans l'ensemble jauge, colle et pièce, ainsi qu'une variation des propriétés dépendant de la température (résistance électrique, module d'élasticité)
- Le fluage et la déformation irréversible de la colle et de la jauge
- Les influences chimiques (corrosion du fil, vieillissement des polymères, humidité)
- La dégradation de l'isolation électrique
- Les champs électromagnétiques perturbateurs (blindage) et le bruit thermique.

1.6 Techniques de préparation des surfaces, collage et protection [3] :

Elles concernent :

- 1- la préparation des surfaces, sablage, dégraissage, neutralisation (PH).
- 2- le choix des colles.
- 3- les opérations de collage et de traitement des colles (voir annexe).
- 4- le câblage des jauges.
- 5- installation particulières : jauges soudables et jauges haute température.
- 6- protection de l'installation.

1.7 Le support [3] :

Une jauge de contrainte est composée d'un circuit électrique en forme de grille solidaire d'une feuille isolante qui constitue le support. C'est ce support qui est collé sur la pièce dont on veut mesurer les allongements et qui transmet les déformations à la grille métallique.

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 :

- Fluage minimum (variation de la déformation avec le temps).
- Bonne flexibilité (pour collage sur les surfaces courbes).
- Limite d'allongement 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.

Le choix des matériaux du support se fait en général parmi les matières plastiques :

- Résines d'époxydes : épaisseur de 0.01 a 0.03mm, 100° C max.
- Résides d'époxydes+fibres de verre : $-200^\circ < T < 350^\circ$ C, mais l'élongation est réduite a 2% maximum.
- Les polyamides : supports très flexibles et robustes, 20% d'élongation.

1.8 Les adhésifs [3]:

Les caractéristiques principales sont :

- Compatibilité avec le support de la jauge et le métal de la structure.
- Bonne transmission de la déformation.
- Pas de fluage dans le temps.

Le choix dépend de la :

- Nature des travaux et de la pièce.
- Température et de la durée de vie.
- Précision requise.

1.9 Conclusion :

Ce chapitre a comme objectif de décrire le banc didactique d'étude des jauges de contraintes existant pour la mesure de déformations. Dans la première partie, nous avons introduit la description du banc didactique ainsi les différents systèmes structuraux et modes de sollicitations mécaniques ensuite nous nous sommes intéressés aux positionnements des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction et en flexion. Enfin nous avons passé en revue les techniques de préparation des surfaces, collage et protection.

Dans ce chapitre nous nous sommes intéressé aussi à décrire l'électronique du banc qui pose des problèmes de maintenance. Il serait intéressant de remplacer l'électronique existante du banc didactique d'étude des jauges par une carte électronique maison pour faciliter la manipulation en remplaçant les boutons réglables par des boutons poussoirs qui nous permettent de faire des mesures en différents systèmes.

2.1 Introduction :

Les contraintes produisent des déformations sur le milieu où elles sont appliquées. Les capteurs de déformation nous permettent de calculer ces contraintes à partir des déformations mesurées en des zones judicieusement choisies. L'étude des contraintes mécaniques agissant sur une structure est importante pour pouvoir apprécier la sécurité de son fonctionnement et être capable ainsi d'établir les meilleures conditions d'emploi. Les jauges de déformation est un type de capteur de déformation très important.

2.2 Définitions :

2.2.1 La contrainte :

La contrainte correspond au degré de déformation d'un corps suite à l'application d'une force. De façon plus précise, la contrainte (ϵ) se définit comme la variation relative de longueur, comme présentée dans la Figure ci-dessous.

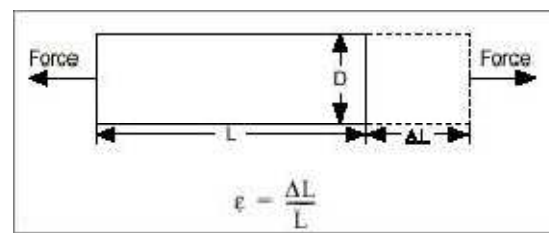


Figure7: Définition de la mesure de déformation par jauge de contrainte

Même s'il existe plusieurs méthodes différentes pour mesurer la déformation, la plus courante est le recours à la jauge de contrainte, matériel dont la résistance électrique varie en fonction de la charge exercée sur le matériau

2.2.2 la jauge :

Une jauge de contrainte est un capteur dont la résistance varie avec la force appliquée. Elle convertit la force, pression, tension, poids, etc., en changement de résistance électrique qui peut ensuite être mesuré.

➤ Constitution :

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

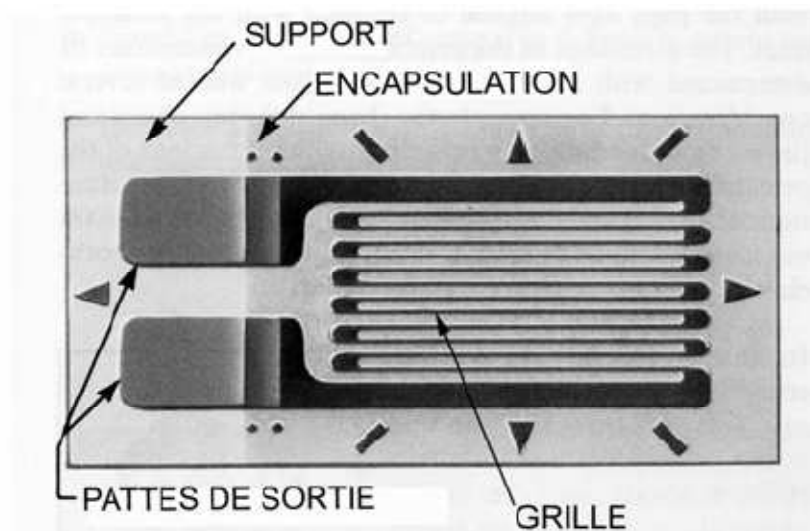


Figure 8: Diagramme d'une jauge

2.3 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES JAUGES DE CONTRAINTES [4]:

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 figure 9. 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.

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

$$R = \frac{\rho L}{S} \quad 13$$



Figure 9 : jauge de contrainte

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

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad 14$$

qui peut se réécrire :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad 15$$

Où K est le facteur de jauge

2.3.1 Facteur de jauge [4]:

Le fonctionnement des capteurs à jauges de contraintes est fondé sur la variation de résistance électrique de la jauge proportionnellement à sa déformation. C'est le coefficient ou facteur de

jauge K qui traduit cette proportionnalité, suivant la relation : $\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L}$

K est une constante qui dépend des matériaux considérés et de la température. Elle caractérise la sensibilité de la jauge. Pour les jauges métalliques, K est proche de 2. Pour les jauges semi-conductrices, la valeur absolue de K est comprise entre 100 et 200. Ces dernières ont donc une sensibilité bien supérieure aux jauges métalliques. Cependant, elles ont une linéarité inférieure et sont plus sensibles aux effets de la température

2.3.2 CONDITIONNEMENT DES JAUGES : PONT DE Wheatstone [4] :

C'est le montage le plus utilisé pour mesurer avec les jauges de contrainte. Car il met en évidence les différences entre les éléments constituant le pont.

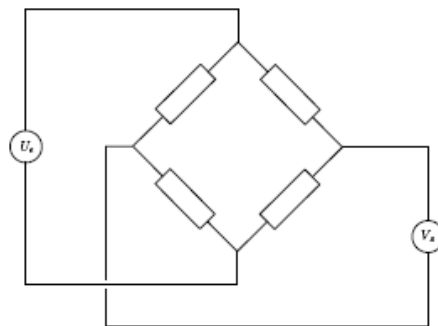
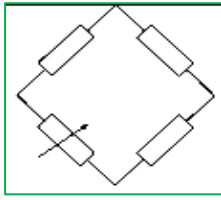


Figure10 : montage du pont de Wheatstone

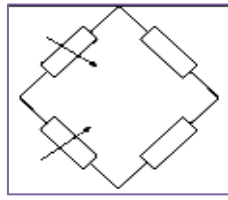
➤ **Propriété :**

- Les éléments adjacents sont de signe contraire les éléments opposés sont de même signe.
- Les principales configurations de montage sont résumées dans le tableau suivant.
- Pour des montages très précis on peut être amené 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.

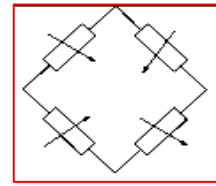
2.4 Principe de mesure :



Montage en 1/4 de pont :
 -une seule R varie
 -montage non linéaire
 -montage sensible à T



Montage en 1/2 de pont :
 -2R varient : soit des adjacentes. Soit des opposés => comportement dépend du choix.
 Mais généralement si 2 branches adjacentes
 -Montage linéaire
 -compensation de ΔT



Montage en pont complet :
 -Les 4R varient selon les configurations de montage
 -Est linéaire.
 -A une meilleure sensibilité
 -Compense les efforts parasites (si on mesure de la flexion et qu'un effort parasite de traction apparait. Il est compensé)

Tableau1 : les principales configurations du pont de Wheatstone

La méthode la plus précise pour mesurer une variation de résistance consiste à placer la jauge dans un pont de Wheatstone (figure 10). Lorsqu'un pont est constitué de 4 résistances de valeur égale et alimenté par une source de tension (E) constante aux points C et D, on obtient par symétrie, une différence de potentiel nulle entre les points A et B. Si la résistance R_1 varie légèrement, ce déséquilibre est mesuré par le galvanomètre (e_0).

On vérifiera facilement que R_1 et R_3 agissent dans le sens positif (augmentation de la résistance) tandis que R_2 et R_4 agissent dans le sens contraire

$$\left(\frac{e_0}{E}\right)_1 = \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_4+R_3} \quad 16$$

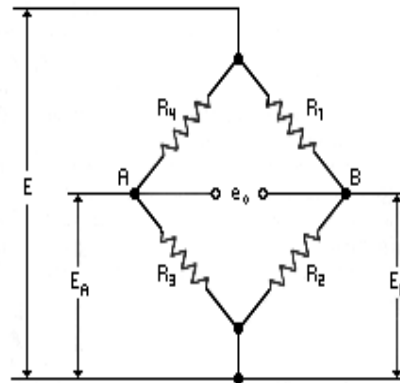


Figure 11: Pont de Wheatstone. Quand la différence de potentiel e_0 est nulle, le produit des résistances opposées est égal ($R_1R_3 = R_2R_4$).

Dans la pratique, ces résistances sont souvent d'autres jauges (une, deux ou quatre) l'alternance des signe + et - caractérise la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens opposé et deux résistances opposées agissent dans le même sens. On peut donc réduire les variations parasites (comme la température) et avoir une meilleure précision. Un capteur à quatre jauges permet d'avoir encore une meilleure précision qu'un capteur à une jauge. Dans la pratique, le nombre de jauges est souvent dicté par la géométrie de la pièce. On distingue trois montages différents selon le nombre de jauges mis en place

Cette équation indique que lorsque $R_1/R_2 = R_4/R_3$, la sortie de tension, V_0 est égale à zéro. Dans ces conditions, on dit que le pont est "équilibré". Tout changement de résistance dans une des branches du pont conduit à une tension de sortie non nulle. Par conséquent, si on remplace la résistance R_4 par une jauge de contrainte active, tout Changement dans la résistance de la jauge de contrainte déséquilibre le pont et produit une tension de sortie non égale à zéro.

Dans l'idéal, on veut que la résistance de la jauge de contrainte change uniquement en réponse à la contrainte appliquée. Cependant, le matériau de la jauge de contrainte, ainsi que le matériau du spécimen auquel la jauge est appliquée, réagit aussi aux variations de température. Les fabricants de jauges de contrainte essaient de minimiser la sensibilité à la température en traitant le matériau. Même si les jauges compensées réduisent la sensibilité thermique, elles ne la font pas disparaître complètement.

➤ Différents types des montages [5] :

➤ Montage en quart de pont :

Dans le montage en quart de pont, on ne dispose que d'une jauge et trois résistances viennent en complément avec l'électronique associée. Ce montage est le plus simple et le moins cher mais présente de nombreux inconvénients :

- La jauge étant éloignée des autres résistances, il faut prendre en compte la résistance induite par la longueur de câble.
- La tension alimentant la jauge diminue de la somme des variations de tension rencontrées sur les câbles de liaison. À l'entrée de la jauge, elle est largement inférieure à celle qui sort de l'amplificateur. La sensibilité du capteur (qui varie proportionnellement à la tension d'alimentation) s'en trouve alors amoindrie...
- La résistance du câblage ajoute également une atténuation du signal et donc une perte d'information. Par exemple, un câble de 100 m conduit à une variation de 10 %

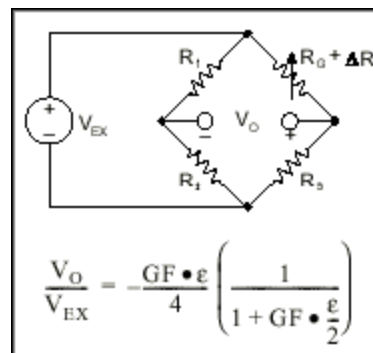


Figure 12 : Montage en quart de pont

En utilisant deux jauges de contrainte dans le pont, on peut minimiser davantage l'effet de température. Par exemple, la Figure ci-dessous illustre la configuration d'une jauge de contrainte où une jauge est active ($R_G + \Delta R$) et une seconde jauge est placée transversalement à la contrainte appliquée. Par conséquent, la contrainte a peu d'effet sur la seconde jauge, qualifiée de "factice".

Cependant, toute variation de température affecte les deux jauges de la même manière. Vu que les variations de température sont identiques dans les deux jauges, le rapport de leur résistance ne change pas, la tension V_0 non plus, et les effets de la variation de température sont réduits au strict minimum.

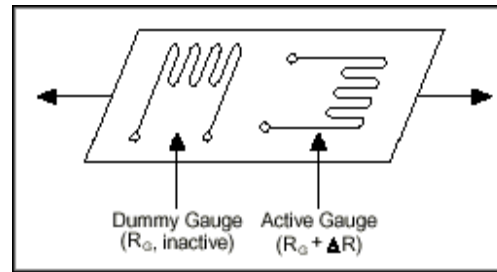


Figure 13 : Utilisation d’une jauge “factice” pour éliminer les effets de température

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

➤ **Montage en demi-pont :**

Le montage en demi-pont est couramment utilisé lorsque l’on souhaite 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.

La Figure 14 illustre une application d’une poutre en flexion avec une jauge montée en tension ($R_G + \Delta R$) et l’autre montée en compression ($R_G - \Delta R$). Cette configuration en demi-pont, dont le diagramme est aussi illustré en Figure n°6, produit une tension de sortie linéaire approximativement double de la tension de sortie du circuit en quart de pont.

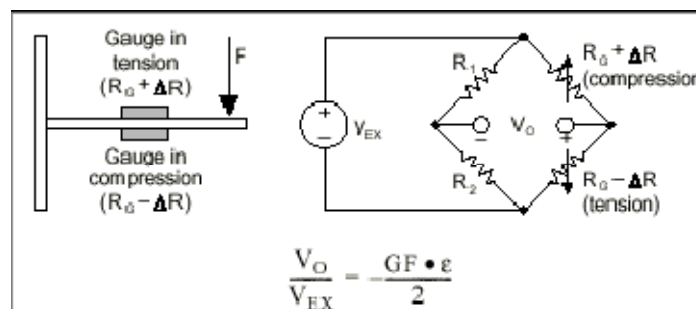


Figure 14: Montage en demi-pont

➤ Montage en pont complet :

Le montage en pont complet à quatre fils est le plus couramment utilisé (les quatre jauges occupent chacune une branche du pont). Mais de manière générale, le choix du montage est guidé par la géométrie du capteur.

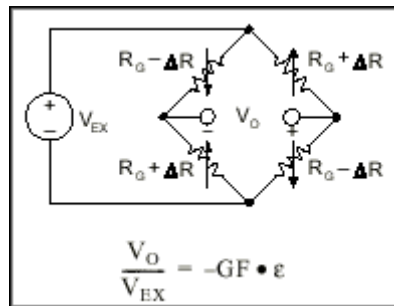


Figure 15 : Montage en pont complet

2.5 Présentation de la relation contrainte-déformation :

Une contrainte est l'état de pression dans lequel se trouve un matériau lorsqu'on lui applique une ou plusieurs forces. Il s'agit d'une réaction distribuée de la matière, les atomes se réorganisent pour compenser les forces extérieures. Une contrainte est une force divisée par une surface, elle est donc homogène à une pression et exprimée en pascals.

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.

2.5.1 Jauge de déformation :

Le but des extensomètres à fils résistants ou jauges de déformation « strain gauge » est de traduire la déformation d'une pièce en variation de résistance électrique (plus les extensomètres s'étirent, plus leurs résistances augmentent). Elles consistent en des spires rapprochées et sont généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique (quelques

μm d'épaisseur) et d'un isolant électrique, que l'on traite comme un circuit imprimé (par lithographie ou par attaque à l'acide).

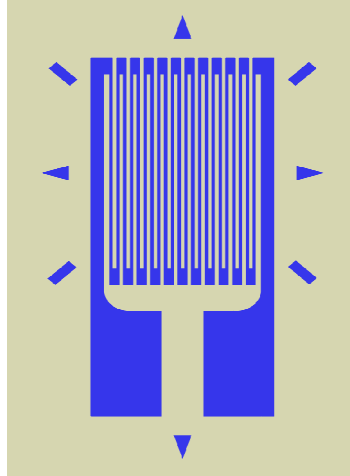


Figure 16 : Jauge de déformation

2.6 Les différents types de jauges de contraintes[3] :

Il existe quatre principaux types de jauges de contraintes :

- les jauges piézorésistives (ou à semi-conducteurs).
- jauges soudable pour application a haute température.
- jauges à trame pelliculaire.
- jauges à fil tramé

Ces dernières étant actuellement les plus utilisées en extensométrie. A l'origine, elles étaient constituées d'un fil (généralement en constantan) collé en spires rapprochées sur un support mince. Aujourd'hui, on trouve plutôt des jauges à trame pelliculaire obtenues à partir d'une feuille métallique mince (quelques μm d'épaisseur) et d'un support isolant (une résine synthétique) que l'on traite, comme un circuit imprimé, par lithographie et attaque à l'acide. C'est à ce type de jauges que nous nous intéresserons plus particulièrement

2.6.1 Les jauges piézorésistives ou à semi-conducteurs [3] :

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 piézorésistances sont des résistances variables faites à partir d'un matériau piézorésistant et sont utilisées pour les jauges de contraintes, couplées avec un pont de Wheatstone. La variable K d'un semi-conducteur peut-être cent fois supérieure à celle des métaux. Les semi-conducteurs généralement utilisés sont le germanium et le silicium (amorphe ou cristallisé). Une contrainte appliquée sur du silicium va modifier sa conductibilité pour deux raisons : sa variation géométrique mais aussi sur la conductibilité intrinsèque du matériau. Il en résulte une amplitude bien plus importante que pour des capteurs métalliques.

❖ Caractéristiques :

- Matériau : silicium dopé avec des impuretés.
- construction :
 - formation contrôlée d'un cristal de Si dont l'orientation et la quantité d'impuretés sont choisies d'avance.
 - découpage en lamelle suivant la direction longitudinale du cristal (0.5 à 12mm).
 - collage sur support de plastique laminé avec conducteur à chaque bout.
- Très grande sensibilité ($60 < S_a < 200$).
- Sensibilité transversale très faible ($k \sim 0$)
- Variation facile des propriétés par le contrôle du dopage des impuretés
- Très fragile
- Utilisées pour la mesure de petites déformations avec grande précision.
- Requiert des circuits de conditionnement spéciaux car R est variable en fonction de la déformation.

2.6.2 Les jauges métalliques [3] :

a) Jauge à trame pelliculaire :

- Fabrication par photogravure (plusieurs géométries possibles).
- Grille très mince (0.004mm) et grande variété des dimensions (0.2mm à 50mm et plus)
- Support mince (0.013mm) et très flexible (époxy ou polyamide)

- Variété de résistance disponibles 120, 350, 1000,5000 Ω
- Bonne adhésion et dissipation de chaleur.
- Bonne auto compensation en température.
- Diminution de l'effet transversale par boucles de raccordement épaisses.
- Possibilité de combiner plusieurs jauges sur un seul support (rosettes).

b) Jauge a fil tramé :

- En général 10 à 12 cm de constantan de diamètre 0.025mm pour une résistance totale de 120 Ω
- 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.

c) Jauges soudables pour haute température :

- Pour les hautes températures (650°C) car elles ne contiennent pas de matière organique.
- Deux types : variation de résistance d'un fil Ni-Cr ou bien variation de capacitance d'un condensateur a plaques.
- Dimensions importantes (50mm et plus) pour surfaces planes seulement.

❖ Les matériaux utilisés pour les jauges :

Le matériau composant les jauges doit avoir une bonne résistance à la fatigue une aptitude au soudage et une bonne tenue en température. On utilise les matériaux suivants :

- Constantan (alliage 55% Cu, 45% Ni), couramment utilisé. Il supporte des températures de 200 °C.
- Karma (alliage 74 Ni, 20 Cr, 3% Cu, 3% Fe), meilleure sensibilité et peut être utilisé jusqu'à 350 °C.

- Platine – Tungstène (92% Pt, 8% W), plus cher mais présente une meilleure résistance à la fatigue. 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.

2.7 Effets parasites :

2.7.1 Température :

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

2.7.2 Hystérésis :

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

2.7.3 Erreur de linéarité :

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

2.7.4 Effet thermique [4] :

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.

➤ **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.

2.8 Capteurs a jauges de contraintes :

2.8.1 Les capteurs de force :

Les capteurs de force sont des capteurs de type jauges de contrainte. La jauge de contrainte est une pièce qui sous l'effet d'une force va s'étirer longitudinalement. Elle est utilisée principalement pour la pesée d'objet ou de personne, ou pour mesurer des efforts de traction et 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 ± 20000 daN. On les retrouve généralement dans des applications de mesures de tractions et de compressions.



Figure 17 : Capteurs de mesures de tractions & de compression

2.8.2 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 18 : Capteur de couple

2.8.3 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 de centimètres
- potentiomètre angulaire = déplacements de quelques degrés à une dizaine de tours
- jauges extenso métriques = micro-déplacements.



Figure19 : Capteur de position

2.8.4CAPTEUR 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. Ils mesurent 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 déformation d'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 de la 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 de pression. 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.

2.9 Caractéristiques de la jauge de contrainte :

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

- Sensibilité constante même pour de grandes déformations.
- Résistivité élevée, donc grande résistance pour de petite longueur, ce qui permet de réaliser de très petites jauges.
- Très stable et relativement peu affecté par les changements de température, ce qui est le plus grand problème rencontré dans la mesure de déformations avec des jauges.
- la jauge collée sur un support à étudier est un capteur passif et nécessite donc unCircuit 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 qu'en chantier, pour la mesure de contrainte (en statique ou dynamique) pour la fabrication de capteurs ou comme indicateur de fissure

2.9.1 Sensibilité du montage [4] :

La sensibilité du montage, c'est-à-dire la relation entre la différence de tension et la déformation D , est donnée par l'équation :

$$dU = KDU \frac{R_j R}{(R_j + R)^2} \quad 17$$

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

Où dU est la différence de tension mesurée aux bornes du pont en $\mu V/\mu Str$

K le facteur de jauge (2)

D la déformation (μStr)

R_j la résistance de la jauge (350 Ohm)

R la résistance du pont (1 kOhm)

2.9.2 Calibration par résistance de shunt [4] :

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

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

Où D est la déformation (μStr)

K le facteur de jauge donné par le fabricant

R_j la résistance de la jauge (350 Ohm)

R_{sh} la résistance de shunt (100 kOhm)

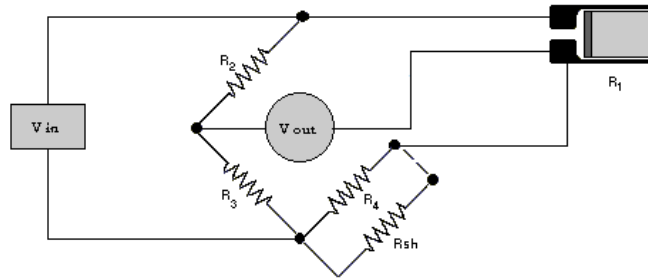


Figure 20 : Calibration par résistance de shunt.

2.9.3 Désensibilisation due à la longueur des câbles :

Paradoxalement, la mesure d’une jauge serait parfaite si les câbles de liaison étaient très courts, mais le collage d’une jauge sur une structure nécessite de grandes longueurs de câble. Ces câbles présentent une résistance complémentaire R_l non négligeable.

Ainsi, au lieu de voir la résistance de la jauge R_j , le pont voit une résistance totale R' égale à la somme de R_j et R_l . Cependant, la variation de résistance due à la déformation, soit dR n’affecte que R_j (R_l restant constante), ce qui a pour effet de désensibiliser la mesure.

$$F_e = \frac{KR_j}{R_j + R_c L} \quad 19$$

- Où F_e est le facteur de jauge effectif
- K le facteur de jauge donné par le fabricant (2)
- R_j la résistance de la jauge (350 Ohm)
- R_c la résistance linéique du câble (0,1 Ohm/m)
- L la longueur du câble (5 m)

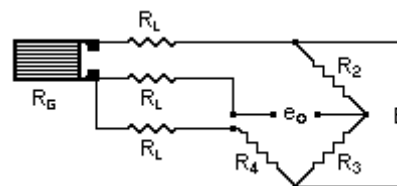


Figure21: Montage en quart de pont en montage 3 fils.

2.9.4 Puissance maximale recommandée :

Pour obtenir une mesure de précision élevée (pour une pièce d'acier soumise à une déformation statique) la puissance à dissiper ne doit pas excéder 0,30 W/cm²

$$U_j = \frac{UR_j}{R_j+R} \quad \mathbf{20}$$

$$P = \frac{U^2}{R_j} \quad \mathbf{21}$$

$$D_i = \frac{P}{S} \quad \mathbf{22}$$

Où : U_j = Tension appliquée aux bornes de la jauge

U = Tension d'excitation (10 V)

R_j = Résistance de la jauge (350 Ohm)

R = Résistance de compensation (1 kOhm)

P = Puissance dissipée par la jauge (W)

S = Surface de la jauge (cm²)

D_i = Dissipation de la jauge (W/cm²)

2.9.5 Elongation maximale [4] :

Toutes les jauges ont des limites d'allongement à ne pas dépasser sous peine de rompre la grille. Pour des jauges d'usage courant, les fabricants annoncent une élongation maximale de 3 à 5 %, selon la taille de la jauge. Il faut aussi tenir compte du type de colle utilisée.

2.9.6 Réponse dynamique [4]:

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 qui se 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.

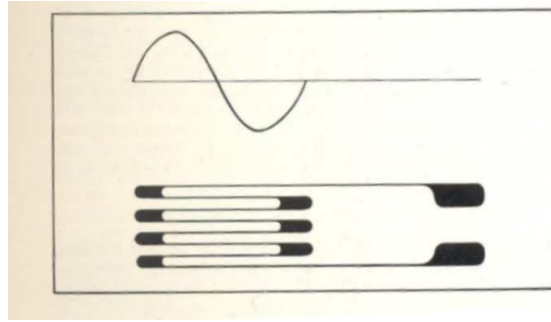


Figure 22: Longueur d'onde mécanique de l'ordre de grandeur de la jauge.

2.9.7 Equilibrage du pont [4]:

Après leur installation, les jauges peuvent présenter de légères variations par rapport à la valeur de leur résistance nominale. De plus, les câblages ne sont absolument pas symétriques. Pour rattraper ce léger déséquilibre du pont, on branche un potentiomètre suivant le schéma de la figure 23.

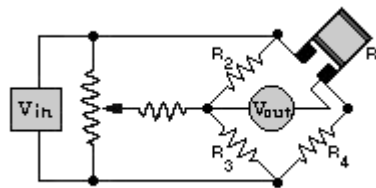


Figure23 : équilibrage par potentiomètre

2.9.8 Câblage des jauges :

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 ligne et l'influence de la température

2.10 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions sur les jauges de contraintes. La première partie de ce chapitre est consacrée à la définition de la contrainte, la jauge et ses constituants au conditionnement des jauges et leur principe de fonctionnement.

Enfin de chapitre, les différents types des jauges de contraintes et leurs caractéristiques ont été présentés. Ces notions seront exploitées dans les chapitres qui vont suivre où nous allons aborder une étude sur la mesure des différentes déformations.

3.1 Introduction :

Dans les milieux industriels, il est nécessaire d'améliorer et optimiser les processus de production. Ainsi pour atteindre cet objectif on doit surveiller continuellement les différents paramètres du système étudié et analyser les données recueillies. Un banc didactique d'étude des jauges dans un milieu industriel doit pouvoir proposer la possibilité d'établir des mesures en différents systèmes.

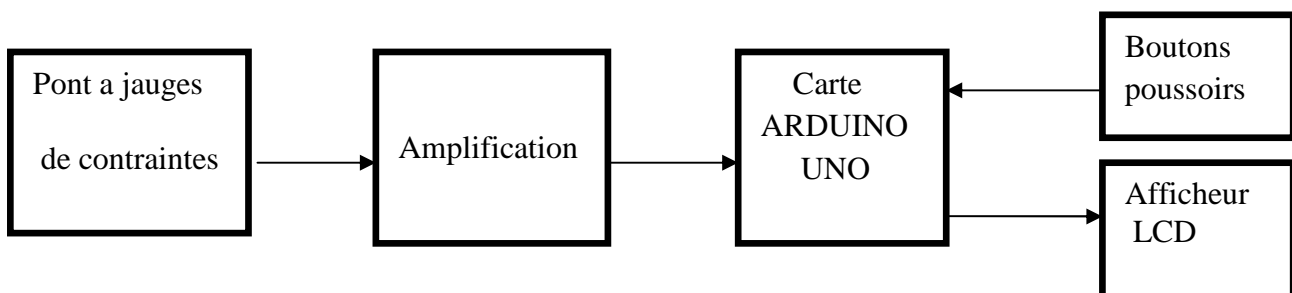
Dans ce cadre se place notre travail qui consiste à concevoir et réaliser une carte électronique qui va nous donner la possibilité de régler les différents problèmes de maintenance, entre autres, qui se posent dans l'électronique du banc ; les boutons rotatifs se trouvant dans le banc sont facilement abimés et difficilement remplacés, sans compter le prix exorbitant du banc qui est incomparable à celui de notre circuit, etc.

Pour être opérationnel, le capteur de force doit être relié à un dispositif permettant de conditionner son alimentation électrique et la mesure du signal de sortie. Des instruments spécifiques sont réalisés pour remplir ces fonctions, appelés communément conditionneur, pont de mesure ou compensateur numérique.

De très nombreux capteurs sont basés sur le pont résistif de Wheatstone. Ils fournissent une tension en général très faible qui doit être amplifiée avec un amplificateur électronique Spécifique. De plus, les différentes mesures de déformations effectuées par le pont de Wheatstone ont besoin d'être affichées, pour ce faire un afficheur LCD sera utilisé. Nous allons donc dans ce chapitre :

-Réaliser une électronique d'acquisition pour un capteur à pont de Wheatstone qui va remplacer l'électronique du banc didactique. Ainsi notre choix s'est porté sur une carte ARDUINO UNO pour mettre en place un programme pour un système d'affichage qui nous permette d'acquies la tension et la déformation du pont.

3.2 Structure générale du système électronique a réaliser:



Notre système sera constitué d'un étage amplificateur différentiel, suivi d'une carte ARDUINO-UNO qui va se charger de la numérisation, du calcul de la contrainte et de l'affichage sur afficheur LCD. Un ensemble de boutons poussoirs en entrées de la carte ARDUINO nous servirons aux différents réglages tels : le choix du facteur de jauge, le type de pont, remise a zéro,...

Nous proposons alors le schéma électrique suivant :

➤ Schéma électrique de la carte électronique :

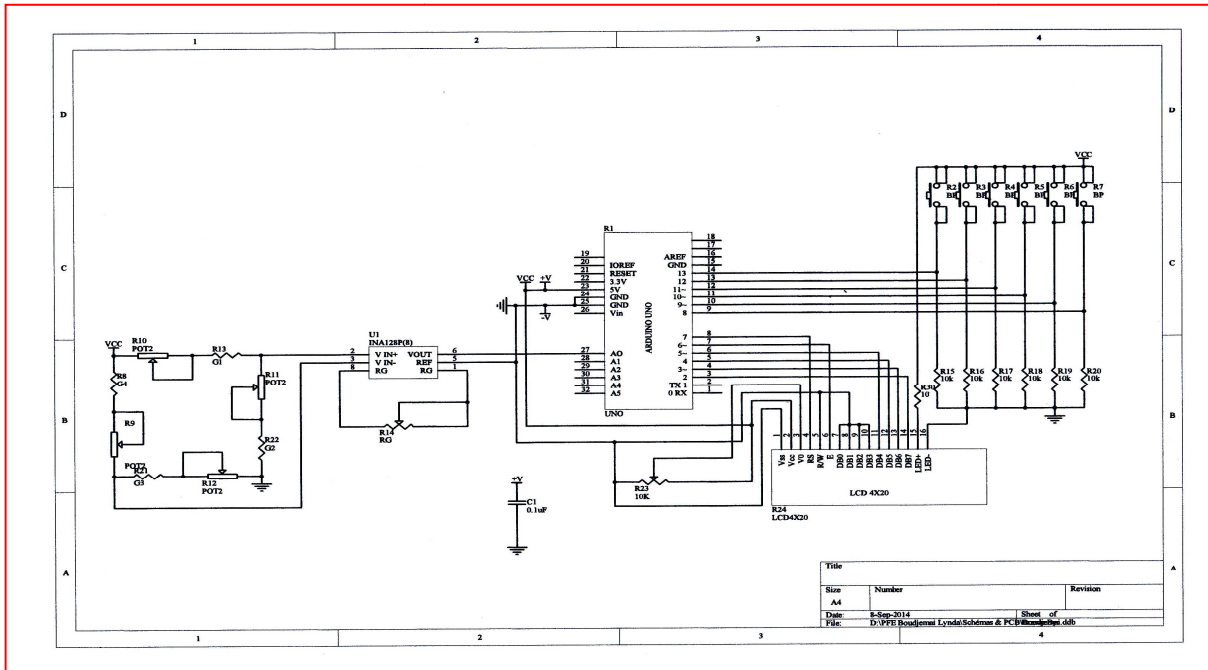


Figure 24: Schéma électrique de la carte électronique

3.2.1 Amplification de la tension de sortie du pont [8] :

Les signaux électriques issus de capteurs (thermocouple, ponts de mesure) sont généralement de faible niveau. Si l'on souhaite travailler avec une bonne précision, il est nécessaire de les amplifier.

Les amplificateurs d'instrumentation sont très proches des AOP (deux entrées différentielles et une sortie), mais contrairement à ces derniers, leur gain est parfaitement déterminé et réglable à une valeur précise. Comme ce gain est limité, la tension de sortie amplifiée doit être définie par rapport à une référence précise, ce qui nécessite une broche de référence. Ainsi la sortie est définie par deux broches (V_{out} et Ref en général) et la différence de potentiel entre ces deux broches définit le signal amplifié. La figure ci-après montre l'utilisation d'un amplificateur d'instrumentation avec un pont de Wheatstone.

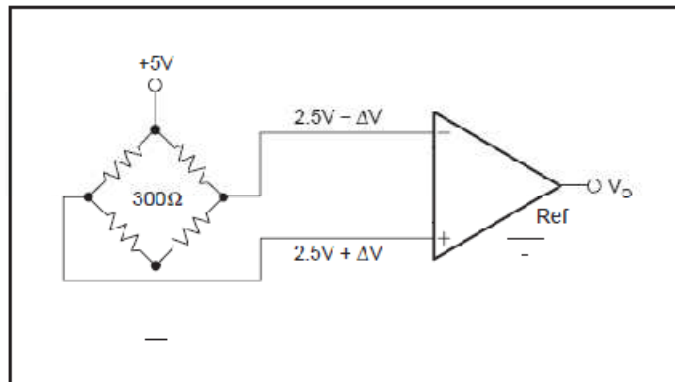


Figure 25 : Amplificateur d'instrumentation avec un pont de Wheatstone.

Pour cela on a choisit l'amplificateur d'instrumentation INA126 pour amplifier la tension de notre pont de mesure.

Les INA126 sont des amplificateurs d'instrumentation de précision pour l'acquisition précise et à faible bruit de signal différentiel.

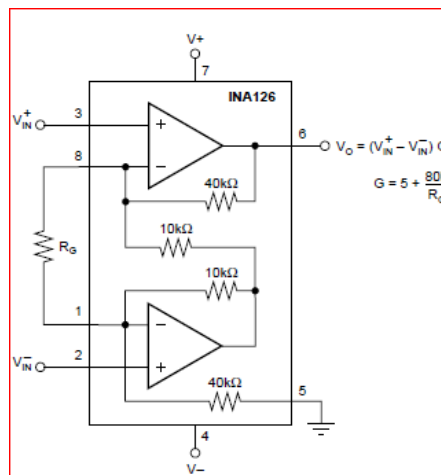


Figure 26: Amplificateur d'instrumentation INA126

Les ponts de mesure permettent généralement d'effectuer deux réglages : la mise à zéro de l'indication lorsque le capteur est à la charge nulle et 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. Pour notre système on a traité cette tension d'offset initial de cette façon :

On a utilisé des résistances variables, ou potentiomètres dans chaque branche du pont, pour régler la sortie du pont à 0 V. En modifiant la position des potentiomètres, on a contrôlé le niveau du pont en sortie en configurant initialement cette dernière sur 0V.

- 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. Ce réglage est normalement utilisé lors de l'étalonnage. Si ce réglage reste accessible par la suite à l'opérateur, cela peut présenter un inconvénient majeur car, en l'absence d'un dispositif de calibrage, toute action ultérieure sur le gain invalide les résultats de l'étalonnage.
- Le dispositif de 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.

- ❖ Après avoir établi les étapes précédentes on va entamer la programmation avec la carte « ARDUINO UNO » pour faire fonctionner notre système avec les boutons poussoir qui vont nous aider à choisir les applications nécessaires.

3.2.2 Description de la carte ARDUINO UNO :

ARDUINO est une plateforme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique à microcontrôleurs et d'un environnement de programmation. Cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne. Pont tendu entre le monde réel et le mode numérique, ARDUINO permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine.

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328. Le microcontrôleur ATmega328 est un microcontrôleur 8bits de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. L'intérêt principal des cartes ARDUINO (d'autres modèles existent) est leur facilité de mise en œuvre. ARDUINO fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source. Le changement du programme dans la mémoire des microcontrôleurs se fait de façon très simple par port USB. En outre, des bibliothèques de fonctions "clé en main" sont également fournies pour l'exploitation d'entrées-sorties courantes : gestion des E/S TOR, gestion des convertisseurs ADC, génération de signaux PWM, exploitation de bus TWI/I²C, exploitation de servomoteurs...

➤ Présentation de la carte ARDUINO UNO :

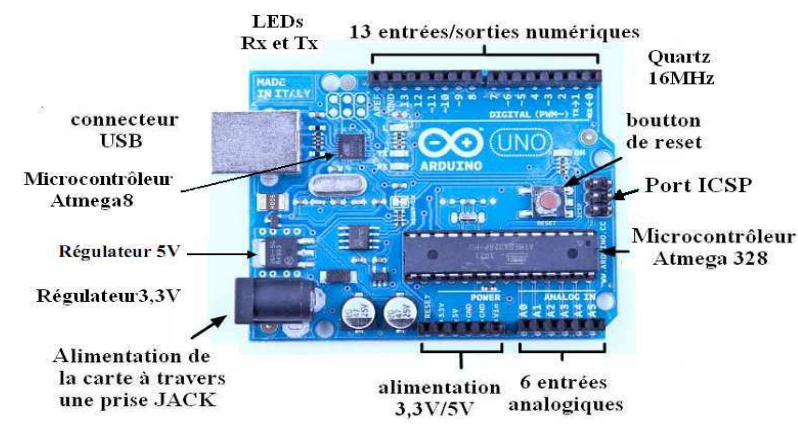


Figure 27: Carte ARDUINO-UNO

➤ **Schéma simplifié de la carte ARDUINO-UNO :**

Les signaux d'entrées-sorties du microcontrôleur sont reliés a des connecteurs selon le schéma ci-dessous:

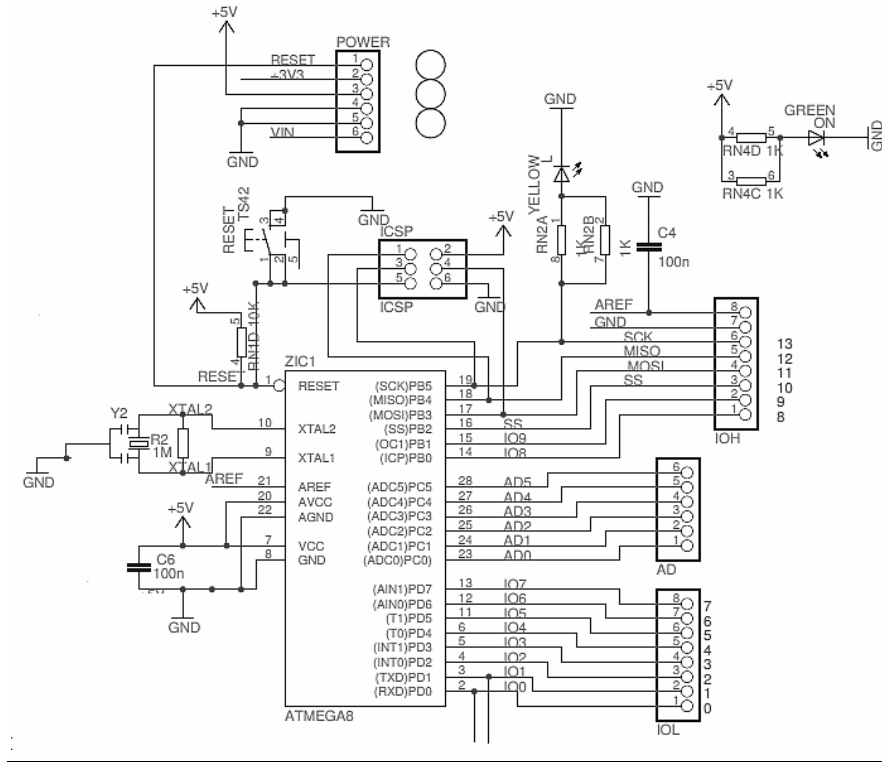


Figure 28: Schéma simplifié de la carte ARDUINO-UNO

➤ **Microcontrôleur ATMEL ATMega328 :**

Le microcontrôleur utilisé sur la carte ARDUINO UNO est un microcontrôleur **ATMega328**. C'est un microcontrôleur ATMEL de la famille AVR 8bits.

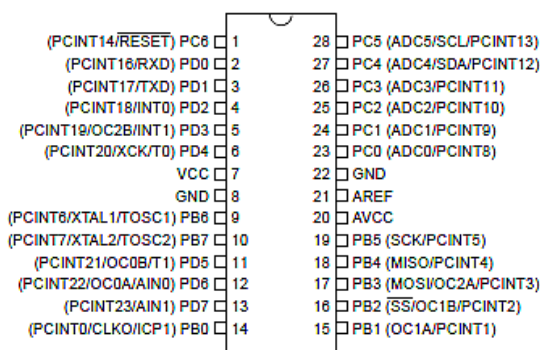


Figure 29: Microcontrôleur ATMEL ATMega328.

Les principales caractéristiques sont :

- *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 en tout 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 fonctions différentes choisies par programmation.
- *PWM* = 6 broches *OC0A(PD6)*, *OC0B(PD5)*, *OC1A(PB1)*, *OC1B(PB3)*, *OC2A(PB3)*, *OC2B(PD3)*
- *Analog to Digital Converter* (résolution 10bits) = 6 entrées multiplexées *ADC0(PC0)* à *ADC5(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)*
- *Compateur Analogique* = broches *AIN0(PD6)* et *AIN1 (PD7)* peut déclencher interruption
- *WatchdogTimer programmable.*
- *Gestion d'interruptions (24 sources possibles)* : en résumé
- ✓ 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)**

➤ **Les différentes cartes ARDUINO :**

Le tableau ci-dessous donne la liste des cartes ARDUINO, ainsi que leurs différentes 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	5 V/7-9 V	16 Mhz	8/0	14/6	0.512	1	16	Mini-B	1
	1					2	32			
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	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	1
		5 V/5-12 V	16Mhz							
LilyPad	ATmega168V	2.7-5.5 V/2.7-5.5 V	8 Mhz	6/0	14/6	0.512	1	16	-	-
	ATmega328V		8 Mhz							
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	-	-

Tableau 2 : Cartes ARDUINO et caractéristiques

➤ Programmation de la carte ARDUINO :

La carte ARDUINO peut être programmée de différentes manières, nous en avons choisi deux

❖ Logiciel IDE (Integrated development environment) ARDUINO :

1. Pour télécharger le logiciel, il faut se rendre sur la page de téléchargement du site : <http://arduino.cc/en/Main/Software>. Décompresser le fichier avec un utilitaire de décompression (7-zip, WinRar,...).A l'intérieur du dossier se trouvent quelques fichiers et l'exécutable du logiciel.
2. Installer le logiciel
3. Dé-zipper le pilote FTDI USB Drivers.zip
4. Brancher l'Arduino et pointer l'installateur Windows vers le pilote
5. La carte est prête à accueillir un programme Utilisateur



Figure 30: Branchement de la carte ARDUINO-UNO.

Lorsque l'on connecte la carte à l'ordinateur sur le port USB, un petit message en bas de l'écran apparaît. Théoriquement, la carte que l'on veut utiliser doit s'installer toute seule. Cependant, si l'on est sous Windows 8.1, ce qui est notre cas, il se peut que ça ne marche pas automatiquement. Dans ce cas, il faut laisser la carte branchée puis ensuite aller dans le panneau de configuration. Une fois là, cliquez sur "système" puis dans le panneau de gauche sélectionnez "gestionnaire de périphériques". Une fois ce menu ouvert, on voit un composant avec un panneau "attention" jaune. Faire un clic droit sur le composant et cliquer sur "Mettre à jour les pilotes". Dans le nouveau menu, on sélectionne l'option "Rechercher le pilote moi-même". Enfin, il ne reste plus qu'à aller sélectionner le bon dossier contenant le driver. Il se trouve dans le dossier d'ARDUINO décompressé un peu plus tôt et se nomme « drivers ».

Après l'installation et une suite de clignotement sur les micro-LED de la carte, celle-ci devrait être fonctionnelle; une petite LED verte témoigne de la bonne alimentation de la carte :



Figure31 : Carte connectée et alimentée.

On lance le logiciel en double-cliquant sur l'icône avec le symbole "infinie" en vert. C'est l'exécutable du logiciel. Après quelques secondes, le logiciel s'ouvre. Une fenêtre s'affiche :

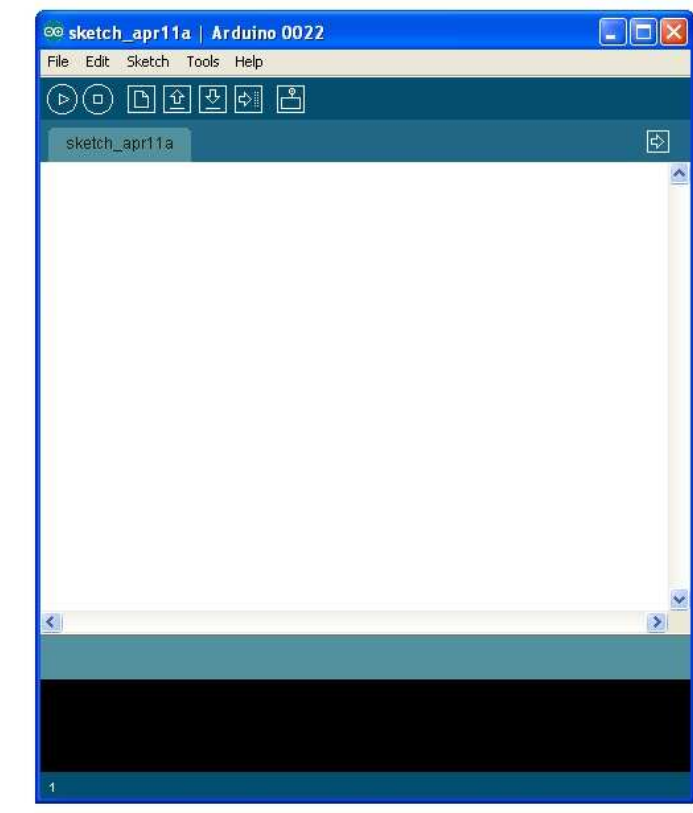


Figure32: Fenêtre du logiciel ARDUINO

Ensuite, il faut dire au logiciel quel est le type de carte utilisée et désigner le bon port série (USB série) sur lequel elle est branchée, port que l'on ré-indique s'il y a changement de carte ARDUINO :

Sur Windows :

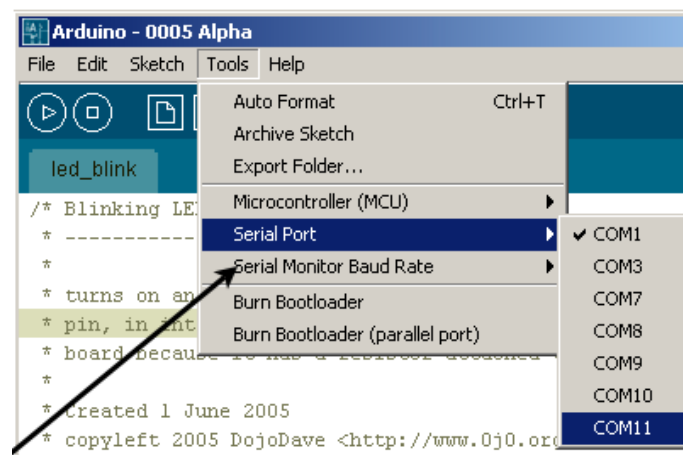


Figure33 : Choix du port de connexion de la carte.

Pour trouver le port de connexion de la carte, aller dans le *gestionnaire de périphérique* qui se trouve dans le *panneau de configuration*. A la ligne *Ports (COM et LPT)* devrait se trouver *ArduinoUno (COMX)*.

Il faut ensuite choisir le type de carte ARDUINO utilisée :

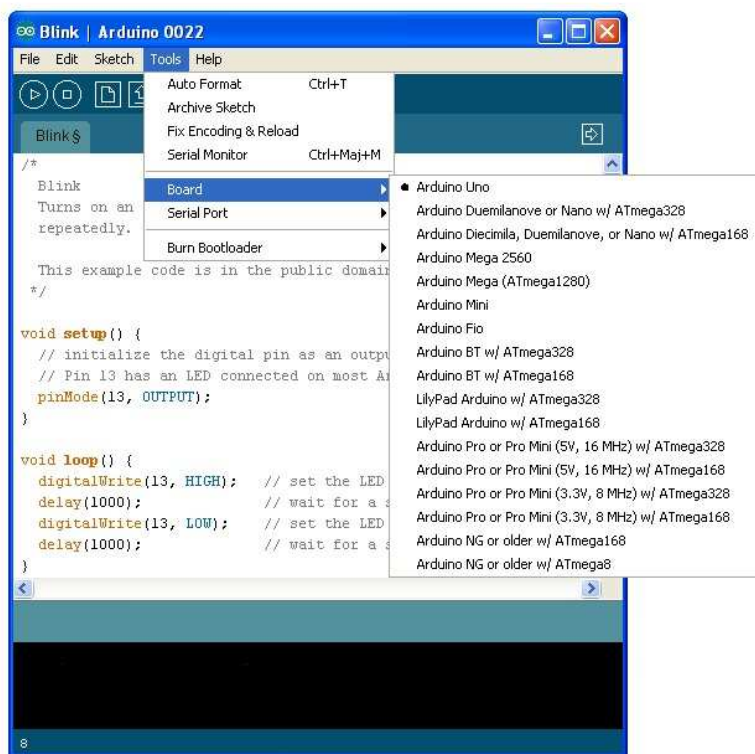


Figure34: Choix de la carte ARDUINO-UNO

La carte est maintenant prête à être utilisée, mais il faut quand-même s'assurer de son bon fonctionnement en faisant un test. Nous allons tester notre matériel en chargeant un programme qui fonctionne dans la carte. Le logiciel ARDUINO contient plusieurs exemple de programmes, que nous allons donc utiliser pour tester la carte.

L'exemple choisi est un simple programme qui consiste à faire clignoter une LED. Le nom de l'exemple est Blink, et se trouve dans la catégorie Basics des exemples de l'IDE ARDUINO.

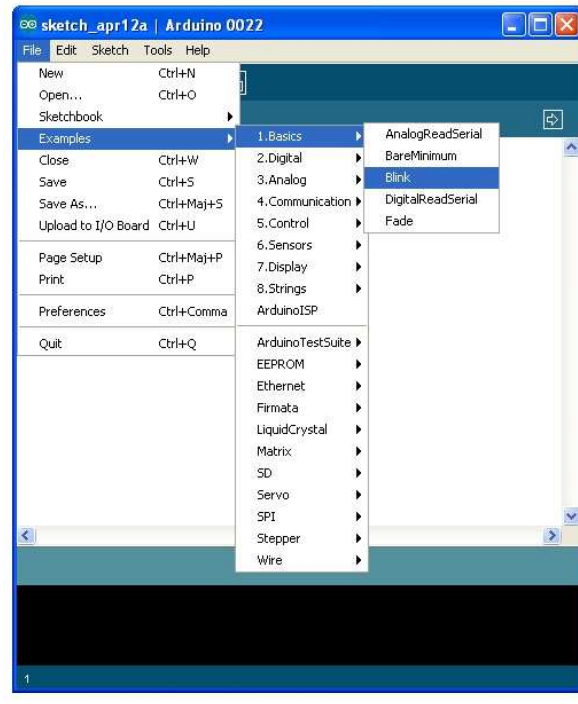


Figure35: Ouvrir le programme Blink.

Une fois que l'on a cliqué sur *Blink*, une nouvelle fenêtre va apparaître. Elle va contenir le programme *Blink*

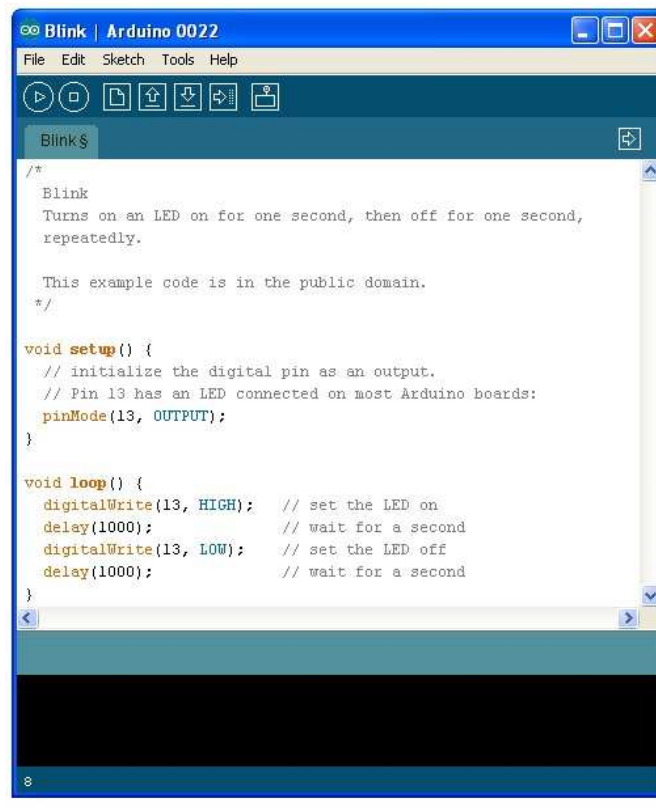


Figure36 : Contenu du programme Blink.

On peut maintenant envoyer le programme *Blink* vers la carte, puisque le nom de la carte, ainsi que le port sur lequel elle est branchée ont déjà été désignés.

La dernière étape consiste à envoyer le programme dans la carte. Pour ce faire, il suffit de cliquer sur le bouton *Upload* (ou « Déployer ») en jaune-orangé sur la photo :



Figure37 : Envoi du programme Blink dans la carte.

En bas dans l'image, on peut lire : « *Uploading to I/O Board...* ». Cela signifie que le logiciel est en train d'envoyer le programme dans la carte.

Une fois que le logiciel a fini d'envoyer le programme dans la carte, il affiche un autre message:

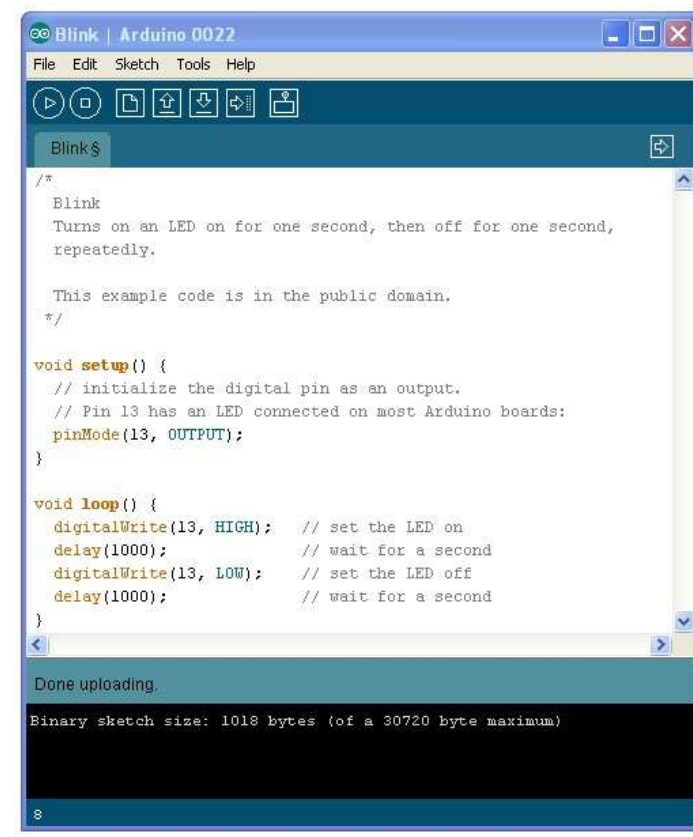


Figure38 : Fin de l'Upload

Le message affiché : " *Doneuploading*" signale que le programme à bien été chargé dans la carte. Si le matériel fonctionne, une LED sur la carte devrait clignoter.

Toutes ces étapes doivent être faites avant d'utiliser la carte pour vérifier son bon fonctionnement.

➤ **Structure d'un programme IDE ARDUINO :**

L'outil impose de structurer l'application de façon spécifique. Le compilateur utilisé est AVR GCC (compilateur C/C++ pour processeur AVR). Le langage ARDUINO est très proche du C et du C++.La particularité est qu'une structure de programme est imposée au programmeur. La structure d'un programme IDE ARDUINO a trois phases consécutives :

1. La définition des constantes et des variables.
2. **void setup ()** : La configuration des entrées et sorties (doit contenir les initialisations (times, interrupts...))
3. **void loop ()** : La programmation des interactions et comportements (fonction répétée indéfiniment)

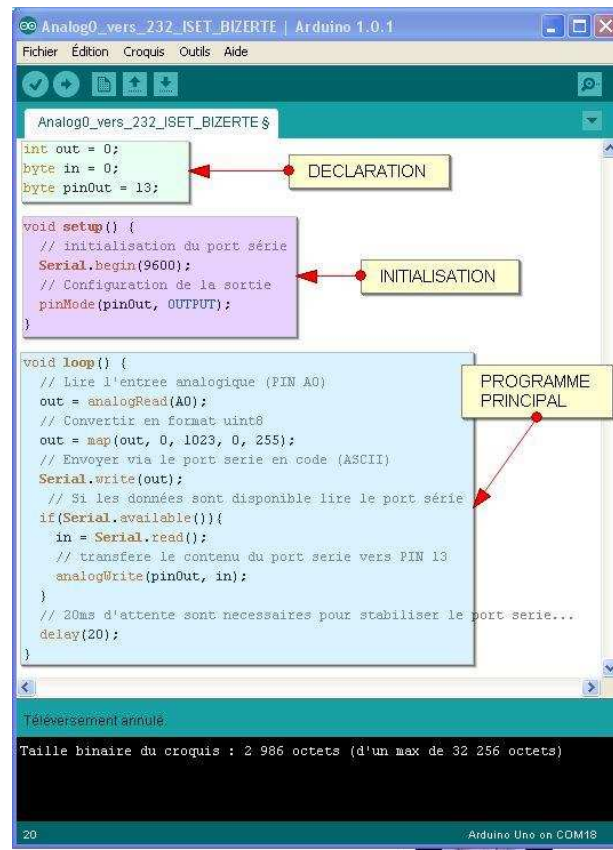


Figure39 : Structure d'un programme.

3.2.3 Description de l'afficheur LCD [6]:

Les afficheurs à cristaux liquides, autrement appelés afficheurs LCD (Liquid Crystal Display), sont des modules compacts intelligents et nécessitent peu de composants externes pour un bon fonctionnement. Ils consomment relativement peu (de 1 à 5 mA), sont relativement bons marchés et s'utilisent avec beaucoup de facilité.

Plusieurs afficheurs sont disponibles sur le marché et diffèrent les uns des autres, non seulement par leurs dimensions, (de 1 à 4 lignes de 6 à 80 caractères), mais aussi par leurs caractéristiques techniques et leur tension de service. Certains sont dotés d'un rétro éclairage de l'affichage. Cette fonction fait appel à des LED montées derrière l'écran du module, cependant, cet éclairage est gourmand en intensité (de 80 à 250 mA).

Ils sont très utilisés dans les montages à microcontrôleur, et permettent une grande convivialité. Ils peuvent aussi être utilisés lors de la phase de développement d'un programme, car on peut facilement y afficher les valeurs de différentes variables.

➤ Principe des cristaux liquides :

L'afficheur est constitué de deux lames de verre, distantes de 20 µm environ, sur lesquelles sont dessinées les mantisses formant les caractères. L'espace entre elles est rempli de cristal liquide normalement réfléchissant (pour les modèles réfléchissants). L'application entre les deux faces d'une tension alternative basse fréquence de quelques volts (3 à 5 V) le rend absorbant. Les caractères apparaissent sombres sur fond clair. N'émettant pas de lumière, un afficheur à cristaux liquides réfléchissant ne peut être utilisé qu'avec un bon éclairage ambiant. Sa lisibilité augmente avec l'éclairage. Les modèles transmissifs fonctionnent différemment : normalement opaque au repos, le cristal liquide devient transparent lorsqu'il est excité ; pour rendre un tel afficheur lisible, il est nécessaire de l'éclairer par l'arrière, comme c'est le cas pour les modèles rétroéclairés.

➤ Les afficheurs alphanumériques :

Les afficheurs alphanumériques permettent d'afficher (comme leur nom l'indique) des caractères alphanumériques. Ils permettent d'afficher l'ensemble des caractères ASCII.

Les caractères accentués français ne font pas partie du jeu de ces contrôleurs. On peut tout de même afficher tous les caractères désirés grâce à 8 caractères définissables par l'utilisateur. Ceux-ci correspondent aux caractères de 0 à 7.

Plusieurs modèles sont disponibles sur le marché. La principale différence est le nombre de lignes et de caractères affichés. Les plus courants :

- 1 ligne 16 caractères
- 2 lignes 16 caractères
- 2 lignes 20 caractères
- 4 lignes 20 caractères

Ce dernier (4lignes et 20caractères) est le modèle qu'on a choisi pour afficher les applications données dans le schéma de fonctionnement du système. Voir la figure

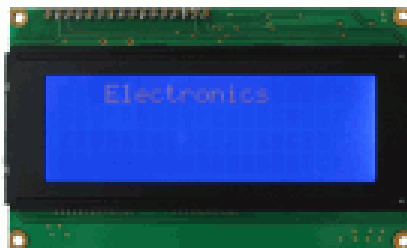


Figure40 : Afficheur LCD alphanumérique

➤ **Le contrôleur :**

Le contrôleur LCD généralement utilisé est le HD44780 où équivalent. Le contrôleur permet une utilisation simplifiée de l'afficheur. Il s'occupe d'afficher les caractères (grâce au générateur de caractères) et gère différentes actions sur l'afficheur tel que effacer l'écran, déplacer le curseur etc.

➤ **La liste des instructions :**

Instructions	Code										Description	Durée	
	R S	R/ W	D 7	D 6	D 5	D 4	D 3	D 2	D 1	D 0			
Effacer l'afficheur	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Efface l'ensemble de la mémoire de donnée sans toucher au générateur de caractères. Ramène le curseur en position « home », à l'adresse 00.	1,64 ms
Retour début	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	X	Ramène le curseur en position « home », à l'adresse 00. Si l'affichage était décalé, il est remis à sa position d'origine : l'adresse 00 se trouve à nouveau en haut à gauche.	1,64 ms
Décalage curseur	0	0	0	0	0	0	0	0	1	I/ D	S	Définit le sens de déplacement du curseur après l'apparition d'un caractère (vers la gauche si I/D=1, vers la droite si I/D=0) et si l'affichage accompagne le curseur dans son déplacement ou non (S).	40 μs
Affichage on/off	0	0	0	0	0	0	0	1	D	C	B	Met l'affichage en ou hors fonction l'affichage (D), le curseur (C), le clignotement du curseur (B).	40 μs
Décalage du curseur ou affichage	0	0	0	0	0	0	1	S/ C	R/ L	X	X	Déplace le curseur (S/C=1) ou l'affichage (S/C=0) d'une position vers la gauche (R/L=1) ou la droite (R/L=0) sans changer la DD RAM.	40 μs

Mode 4/8bits Taille police	0	0	0	0	1	D	N	F	X	X	Définit la taille de l'interface (DL=0 pour mode 4 bits, DL=1 pour mode 8 bits), le nombre de lignes (NL=0 pour 1 ligne, N=1 pour 2 ou 4 lignes), et la taille des polices (F=0 pour des caractères 5x7, F=1 pour des caractères 5x10).	40 μ s
Adresse CGRAM	0	0	0	1	A	A	A	A	A	A	Définit l'adresse de la CG RAM. Les données de la CG RAM sont envoyées après cette commande.	40 μ s
Adresse DDRAM	0	0	1	A	A	A	A	A	A	A	Définit l'adresse de la DD RAM. Les données de la DD RAM sont envoyées après cette commande.	40 μ s
Flag busy et position du curseur	0	1	B	A	A	A	A	A	A	A	Lit le flag busy (BF), et l'adresse de la position du curseur. BF vaut 0 si l'afficheur accepte une instruction, 1 s'il est occupé	1 μ s
Ecriture données	1	0	D	D	D	D	D	D	D	D	Ecrit des données dans la DD RAM ou la CG RAM.	40 μ s
Lecture données	1	1	D	D	D	D	D	D	D	D	Lit les données de la DD RAM ou de la CG RAM.	40 μ s

Tableau 3 : Liste des instructions de l'afficheur LCD

➤ **Commande d'un afficheur LCD :**

Deux modes de fonctionnement de l'afficheur sont disponibles, le mode 4 bits et le mode 8 bits, le mode qu'on a choisis pour l'initialisation de notre afficheur est le mode 4bits

➤ **Mode 4 bits :**

Il peut, dans certains cas, être nécessaire de diminuer le nombre de fils utilisés pour commander l'afficheur, comme, par exemple lorsqu'on dispose de très peu de broches d'entrées sorties disponibles sur un microcontrôleur. Dans ce cas, on peut utiliser le mode quatre bits de l'afficheur LCD. Dans ce mode, seuls les 4 bits de poids fort (**D4 à D7**) de l'afficheur sont utilisées pour transmettre les données et les lire. Les 4 bits de poids faible (**D0 à D3**) sont alors connectés à la masse. On a donc besoin, hors alimentation de sept fils pour commander l'afficheur. Les données sont alors écrites ou lues en envoyant séquentiellement les quatre bits de poids fort suivi des quatre

bits de poids faible. Une impulsion positive d'au moins 450 ns doit être envoyée sur la ligne E pour valider chaque demi-octet

Dans ce mode, on peut, après chaque action sur l'afficheur, vérifier que celui-ci est en mesure de traiter l'information suivante. Pour cela, il faut demander une lecture en mode commande, et tester le flag Busy **BF**. Lorsque $BF=0$, l'afficheur est prêt à recevoir une nouvelle commande ou donnée. Il se peut qu'on dispose encore de moins de broches disponibles dans l'application envisagée. Dans ce cas, on peut alors relier la ligne **R/W** à la masse de façon à forcer l'afficheur en écriture. On a alors besoin, hors alimentation de seulement six fils en mode 4 bits, et dix fils en mode 8 bits, pour commander l'afficheur, mais on ne peut alors plus relire l'afficheur. Ceci n'est pas gênant dans la mesure où on sait ce qu'on a écrit sur l'afficheur, mais on ne peut alors plus relire le flag Busy. Il faut alors utiliser des temporisations après chaque écriture sur l'afficheur. On perd alors un peu en temps d'affichage, mais on gagne une broche d'entrée sortie.

➤ Le branchement :

L'afficheur LCD utilise 6 à 10 broches de données ((D0 à D7) ou (D4 à D7) + RS + E) et une alimentation de +5V. La plupart des écrans possèdent aussi une entrée analogique pour régler le contraste des caractères. Nous brancherons dessus un potentiomètre de 10 kOhms. Les 10 broches de données peuvent être placées sur n'importe quelles entrées/sorties numériques de l'ARDUINO. En effet, nous indiquerons ensuite à la librairie LiquidCrystal qui est branché où.

➤ le circuit du montage de l'afficheur LCD avec l'ARDUINO :

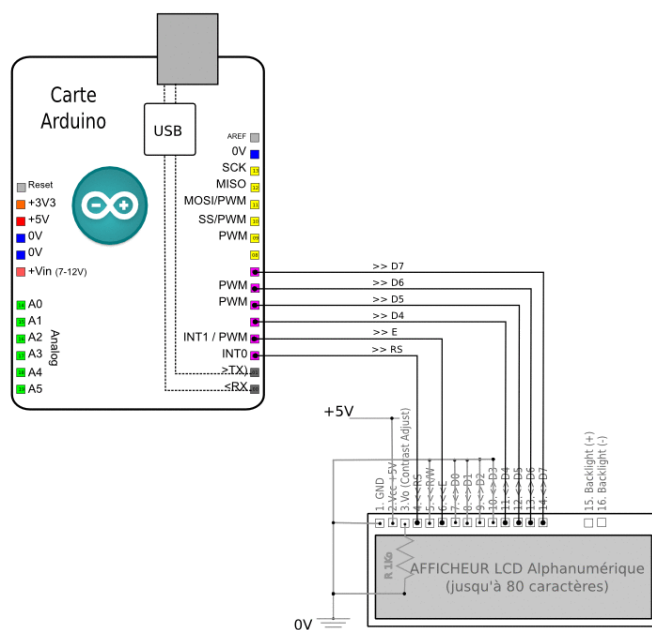


Figure41 : Circuit du montage LCD-ARDUINO

3.2.4 Schéma d'implantation des composants de la carte électronique :

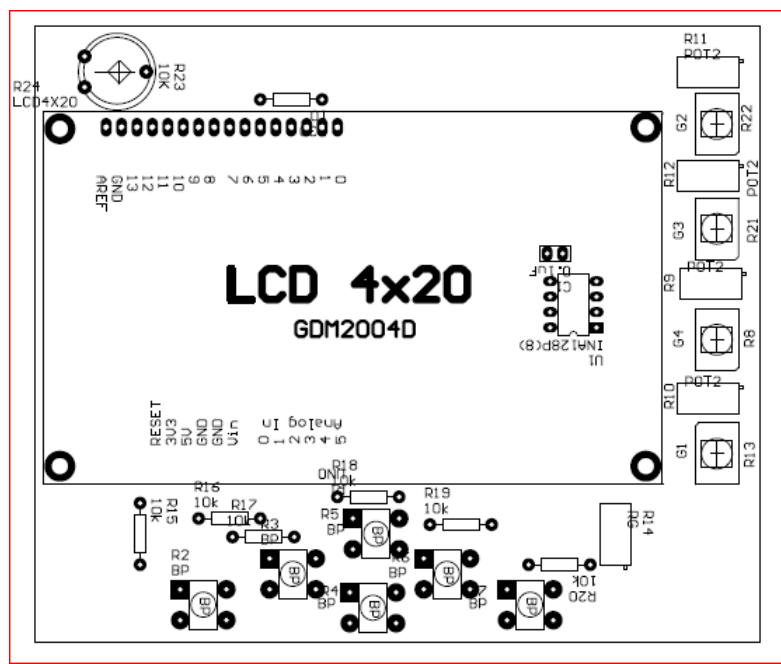


Figure 42 : Schéma d'implantation des composants de la carte électronique

3.2.5 Circuit imprimé de la carte électronique :

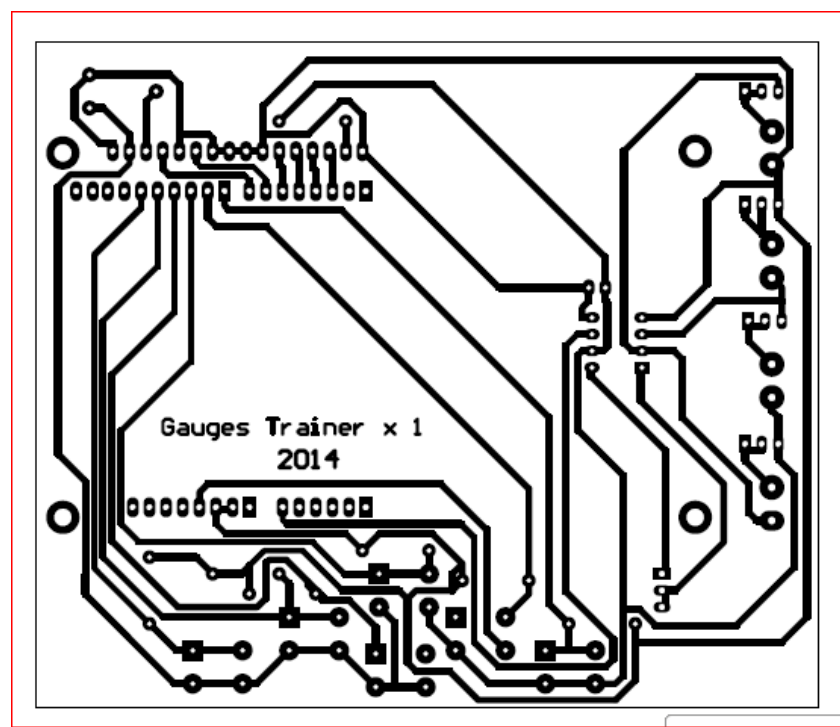


Figure43 : schéma du circuit imprimé de la carte électronique

3.26 Schéma de la carte électronique :

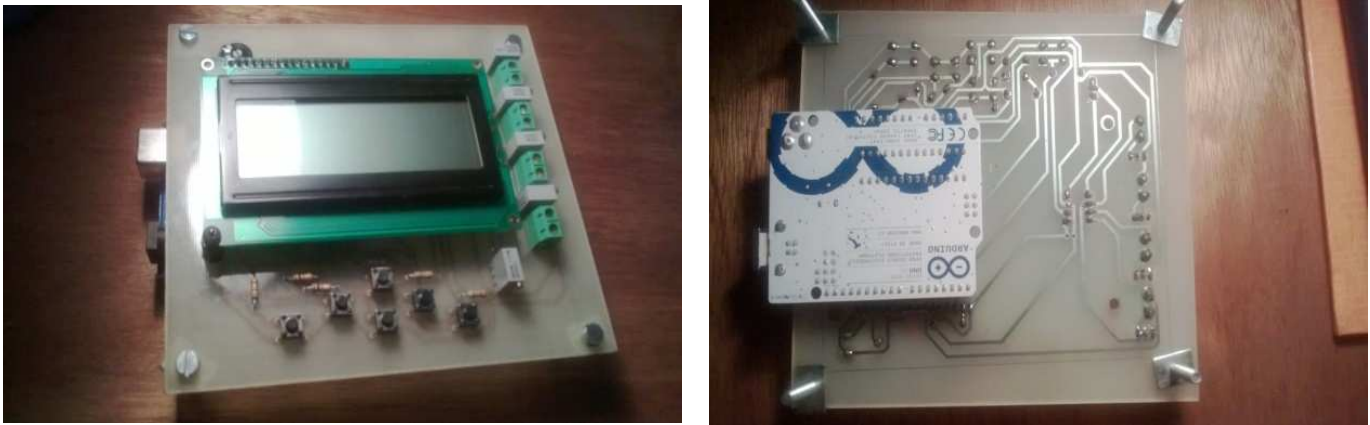


Figure 44 : La carte électronique

3.2.7 Structure des boutons poussoirs :

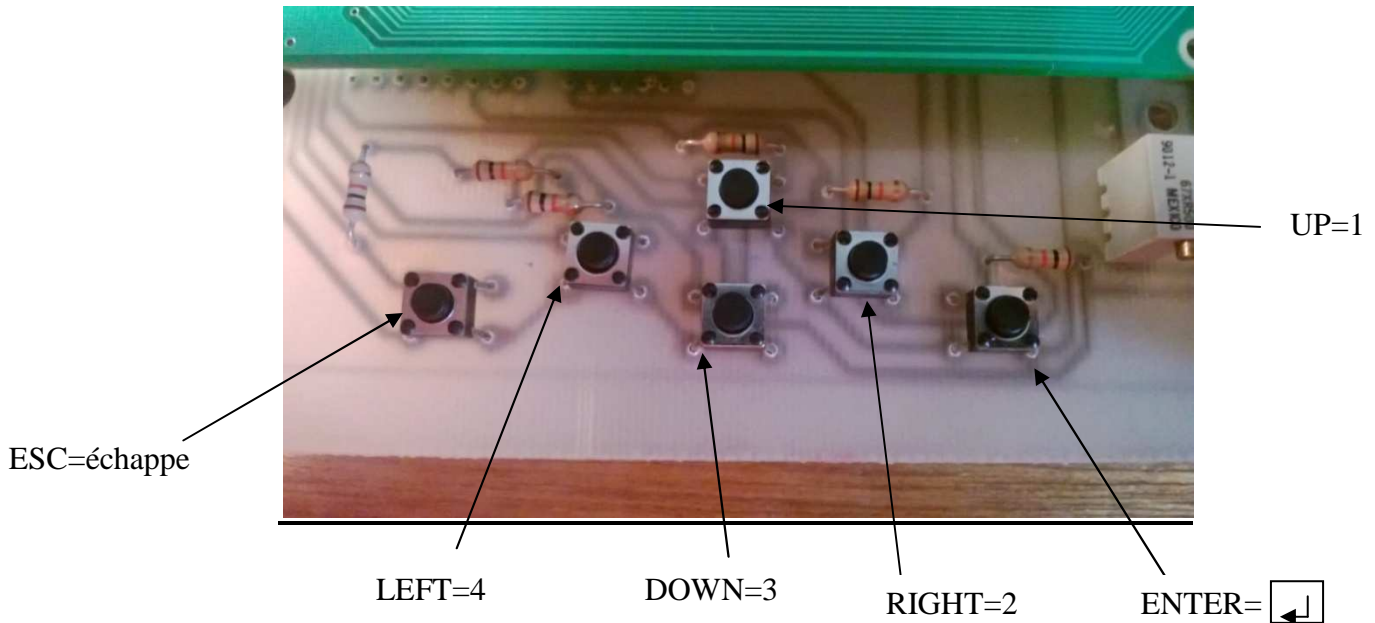


Figure 45: Fonction des boutons

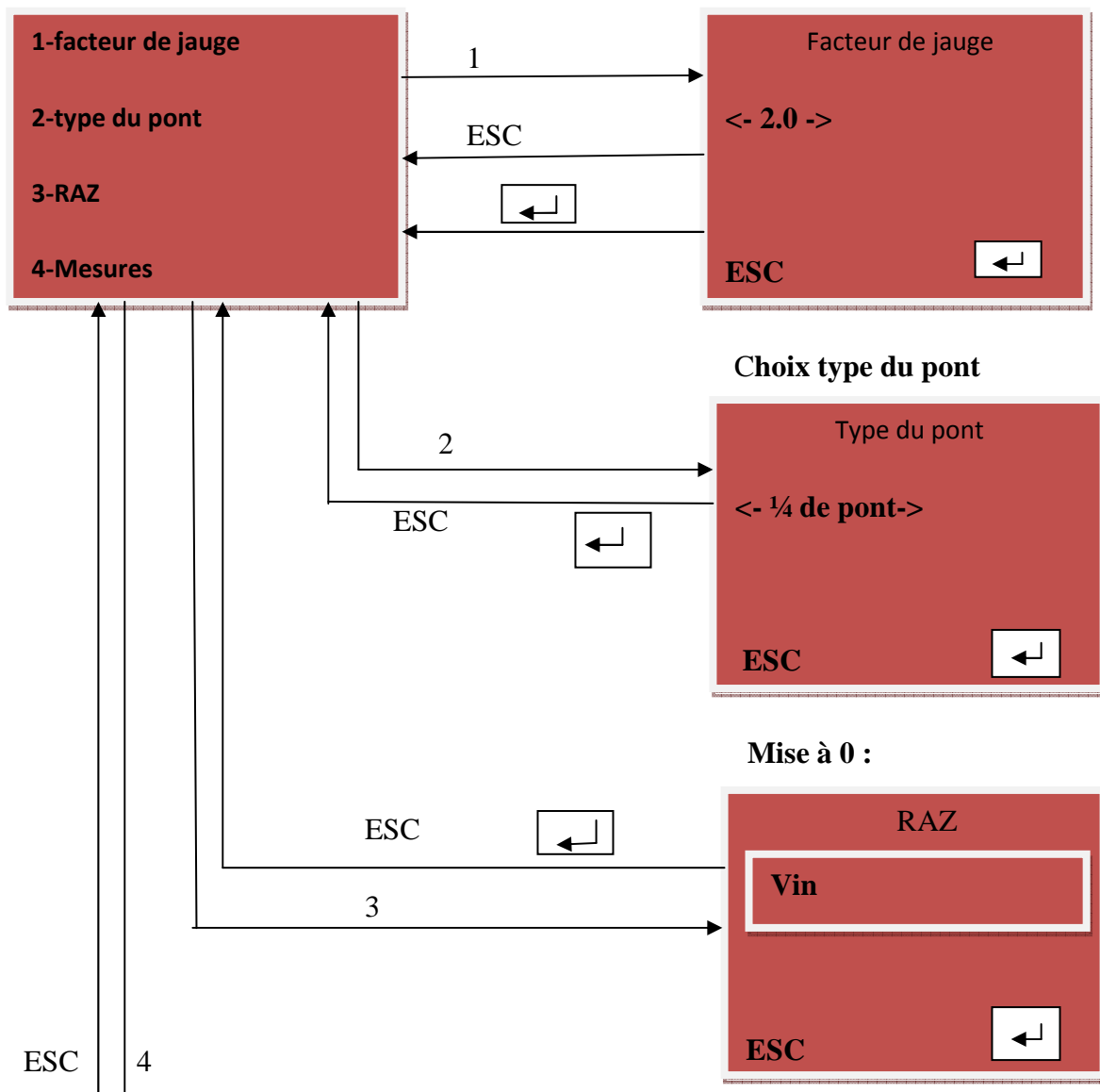
La figure ci-dessus illustre les six boutons poussoirs qui vont nous permettre de valider nos choix sur chaque menu. Ces boutons fonctionnent de la manière suivante :

Les deux boutons se trouvant latéralement (ESC, ENTER) vont permettre au retour au menu principal (ESC), et à la validation du choix (facteur de jauge, type de pont, etc.), puis retourne au menu principal (ENTER)

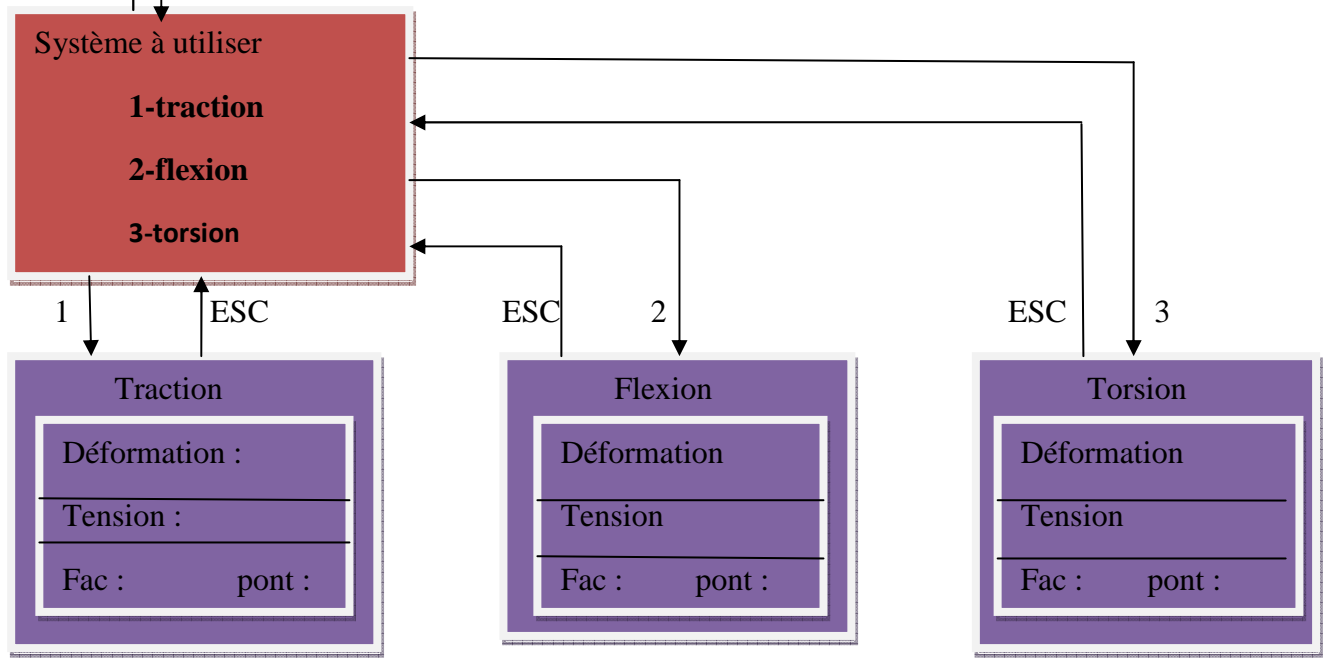
Pour ce qui est des quatre boutons restant, ils vont permettre de faire défiler les différents choix du menu, en allant de haut en bas (UP, DOWN), ou de gauche à droite (LEFT, RIGHT).

3.2 Fonctionnement du système :

Menu1 :Choix de facteur de jauge



Menu5 faire des mesures



En alimentant notre carte électronique, le menu principal s'affiche sur l'écran de l'afficheur LCD. A l'aide des boutons poussoirs, on peut choisir :

1-Facteur de jauge.

2-Type du pont.

3-RAZ.

4-Mesures.

Pour choisir une des quatre options nous avons placé six boutons poussoirs qui vont permettre de choisir puis de valider notre choix.

- Pour effectuer le choix du facteur de jauge en appuie sur le bouton enter, on aura l'affichage qui nous permette de choisir le facteur de jauge. Dans ce nouveau menu s'affiche un facteur de jauge par défaut qui vaut 2.0, les deux boutons « LEFT » et « RIGHT » servant à la sélection d'un facteur inférieur ou supérieur, ces facteurs varient de la manière suivante 1.9, 2.0, 2.1, 2.2, 2.3. Ces facteurs sont spécifiques aux jauges métalliques.

Deux autres boutons vont permettre :

- le retour au menu principal (ESC : échappe)
- la validation du facteur de jauge choisi, puis retourne au menu principal ←┘

A l'aide des boutons « UP » et « DOWN » qui nous permette en allant de haut en bas de sélectionner une des quatre options

- Pour effectuer le choix du type de pont en appuie sur « ENTER » pour valider notre choix Dans ce nouveau écran s'affiche le type du pont par défaut qui est le $\frac{1}{4}$ de pont. A l'aide de boutons « LEFT » et « RIGHT » à choisir le type de pont c.à.d. $\frac{1}{2}$ pont ou pont complet.

Deux autres boutons vont permettre :

- le retour au menu principal (ESC : échappe)
- la validation du type de pont choisi, puis retourne au menu principal ←┘

- Si on veut faire une remise à zéro (RAZ) on sélectionne le choix RAZ puis on appuie sur « ENTER » pour valider notre choix. Dans l'affichage de la RAZ, s'affiche la valeur de Vin si on veut équilibrer notre pont c.-à-d. le remettre à zéro. On clique sur le bouton « ENTER » pour effectuer la RAZ, puis retourne au menu principal sinon sur le bouton « ESC » pour revenir au menu principal sans faire la RAZ du pont.

On appuie sur le bouton « ENTER » pour entrer sur un nouveau menu celui-ci va permettre de choisir sur quel système on va effectuer les mesures. Donc le nouveau menu qu'on vient de définir est :

Systèmes à utiliser :

1-traction

2-flexion

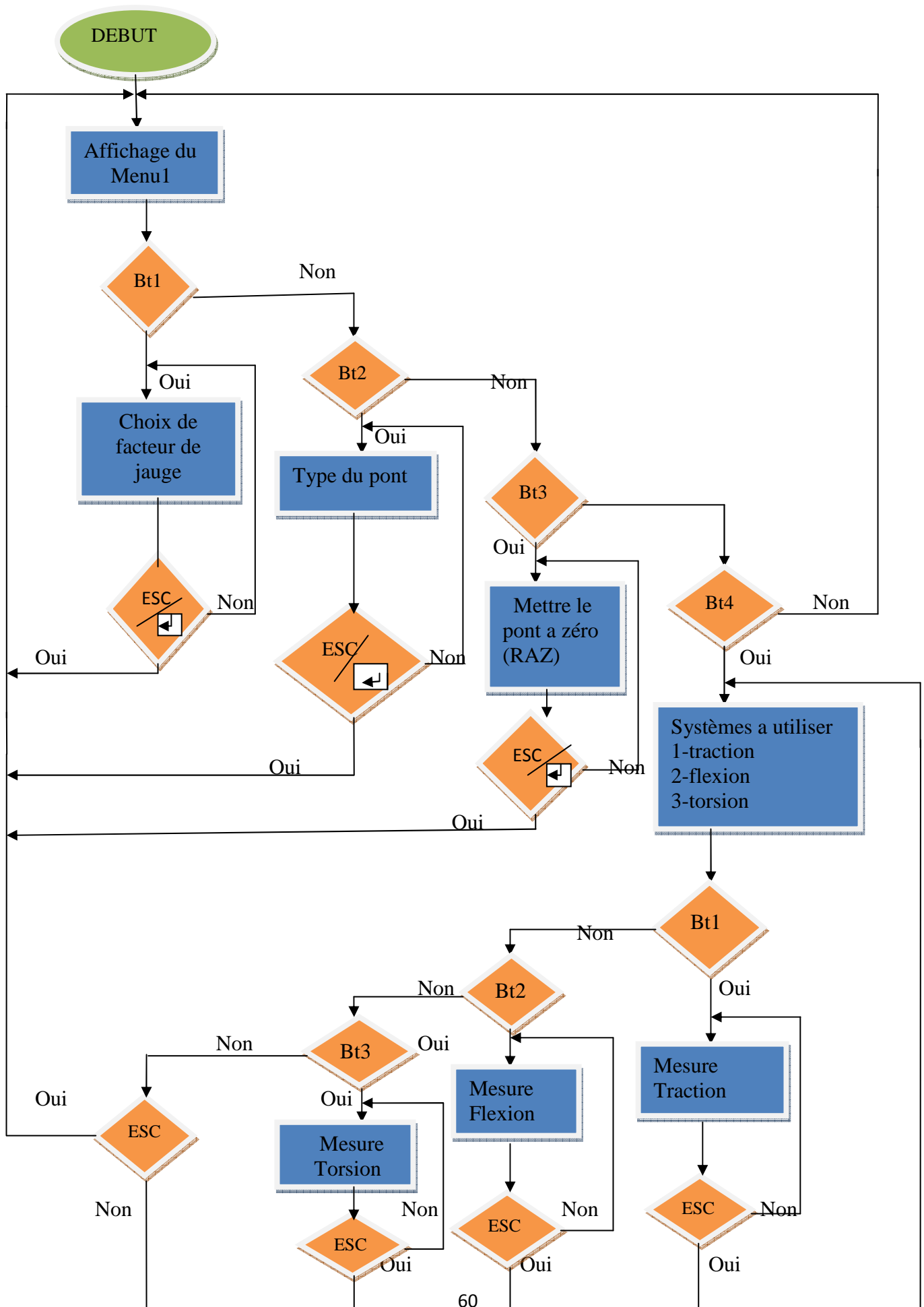
3-torsion

- A l'aide des boutons « UP » et « DOWN » on peut choisir l'un des trois systèmes.

Après qu'on a choisis un système, un nouveau affichage qui va apparaître nous permettra de lire les valeurs de déformations et tension mesurées ainsi que le facteur de jauge et le type du pont qu'on a validé avant d'établir ces mesures.

- En effectuant le choix N°1 qui nous permet de faire les mesures en traction, un nouveau affichage apparaît indiquant les valeurs de déformation, tension, type de pont, facteur de jauge qui concerne le système de traction et pour revenir au menu des mesures pour sélectionner un autre choix on clique sur le bouton ESC .
 - C'est le même principe pour les deux autres systèmes flexion et torsion.
 - Et pour retourner au menu principal on clique sur ESC.

❖ L'organigramme correspondant à un tel fonctionnement est donné par la figure suivante :



3.4Affichage du premier menu :



Figure 46: Affichage du 1^{er} menu

Prenons l'exemple de l'affichage du menu1 dont le programme est le suivant :

```
// include the library code:
#include <LiquidCrystal.h>

// initialize the library with the numbers of the interface pins
Liquid Crystal lcd(7, 6, 5, 4, 3, 2);

Voidsetup () {
  // set up the LCD's number of columns and rows:
  lcd. Begin(16, 4);
  // Print a message to the LCD.
  lcd.print("1-facteur de jauge");
}

void loop() {

  lcd.setCursor(0,1); // Placer le curseur au début de la seconde ligne
  lcd.print("2-type du pont");
  lcd.setCursor(0,2); // Placer le curseur au début de la troisième ligne
  lcd.print("3-RAZ");
  lcd.setCursor(0,4); // Placer le curseur au début de la quatrième ligne
  lcd.print("4-Mesures en");
}
```

3.5 Conclusion :

Pour répondre aux nombreuses applications que nous rencontrons en analyse expérimentale des contraintes nous avons abordé dans ce chapitre une réalisation d'une carte électronique se composant du pont de jauge, carte ARDUINO UNO et un afficheur LCD, qui nous aide à effectuer les différentes mesures concernant les systèmes de tractions, compression, torsion et flexion. Le développement de notre carte électronique pourrait mener à une utilisation dans un champ d'application beaucoup plus large.

CONCLUSION GENERALE

L'objectif final de ce mémoire étant de concevoir et réaliser une carte électronique qui va nous donner la possibilité de régler des problèmes de maintenances qui se posent dans l'électronique du banc didactique d'étude des jauges de contraintes.

Notre travail présente une description du banc didactique des jauges de contraintes et son dispositif d'affichage numérique qu'on appelle aussi l'électronique du banc ainsi les différents systèmes structuraux et modes de sollicitations mécaniques, une brève explication du positionnement des jauges et mesure de déformations en traction, compression et flexion est donnée à la fin du premier chapitre. Nous avons aussi passé en revue les techniques de collage des jauges de contraintes.

Nous avons, ensuite, introduit quelques notions sur les jauges de contraintes ainsi que quelques définitions importantes, en expliquant le conditionnement des jauges et leur principe de fonctionnement et en donnant les caractéristiques et les différents types des jauges de contraintes. En plus, dans ce travail, nous avons mis en pratique notre système électronique qui est constitué d'un capteur basé sur le pont à jauges de contrainte, ce dernier fournit une tension très faible qu'on a amplifiée avec un amplificateur différentiel suivi d'une carte ARDUINO-UNO qui fonctionne avec le microcontrôleur ATMEL ATmega328 qui va se charger de la numérisation, du calcul de la contrainte et de l'affichage sur afficheur LCD. Ainsi un ensemble de boutons poussoirs en entrée de la carte ARDUINO nous serviront aux différents réglages. La programmation de notre système se fait sur logiciel IDE ARDUINO. Les étapes de la réalisation et de mise en fonctionnement de la carte ou bien du système électronique ont été données, et enfin, un exemple d'affichage est illustré.

Les capteurs de jauge de contrainte offrent une exactitude incroyable, une très grande stabilité à long terme et une excellente bande passante appropriée aux mesures rapides. Pendant la fabrication du capteur, de nombreuses erreurs connues peuvent être compensées par le jeu du principe même du pont de Wheatstone. Les capteurs construits avec des jauges de contrainte sont le meilleur choix qui soit pour les mesures en général mais particulièrement pour les applications industrielles et les mesures de très haute précision.

Ce projet a été à la fois très intéressant, nous avons pu concevoir et réaliser une carte électronique qui remplace le banc didactique d'étude des jauges de contraintes, mettant en application nos connaissances acquises durant les années d'études.

CONCLUSION GENERALE

Nous avons choisi notre matériel selon les fonctionnalités souhaitées tout en prenant en compte le temps de développement, le coût du matériel, la complexité de mise en place. La réalisation de cette carte électronique nous a également donné l'opportunité de travailler sur plusieurs domaines à la fois notamment la programmation, l'électronique, la gestion de la mécanique.

En perspective, nous comptons réaliser une carte électronique typique qui contient trois ponts à jauges et ainsi implanter le système à base de la carte ARDUINO-UNO et un afficheur LCD qui va nous aider à afficher les déformations des trois systèmes structuraux traction, torsion et flexion.

1-COLLAGE DES JAUGES À LA COLLE M200 ET SOUDURE DES FILS 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 de transfert

➤ 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 la plaque 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 une seule 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 jauge sont 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 préféré décrire les opérations successives en légendes de dessins. Cette présentation dans le style des bandes dessinées peut paraître peu académique, mais elle a par contre l'avantage de la clarté et de la concision.

➤ **1ère opération :**

Dégraissier 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 47 : 1ère opération de collage

➤ **2ème 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 repères de 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 une compresse propre.

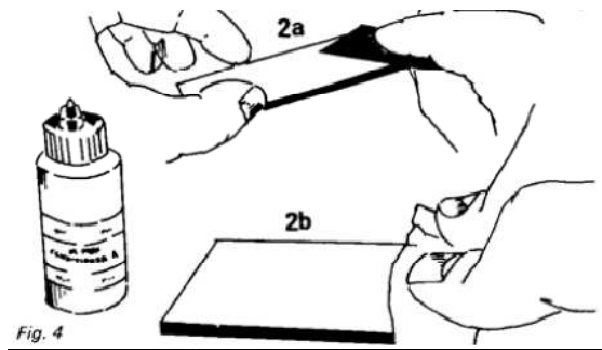


Figure 48 :2ème opération de collage

➤ **3ème opération :**

Déposer du neutraliseur 5 sur la surface qui doit recevoir la jauge. Éviter de laisser sécher et nettoyer 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 49 : 3ème opération de collage

➤ **4ème 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 boîte plastique des jauges, coté a coller en dessous. Pour les colles AE-10 et GA-2, utiliser 10 a 12 cm de ruban adhésif, centrer la jauge sur le ruban et relever le « scotch », sous un faible angle en entrainant la jauge au dos. Pour la colle AE 15, le ruban mylar est préférable en prévision du traitement thermique supérieur a appliquer.

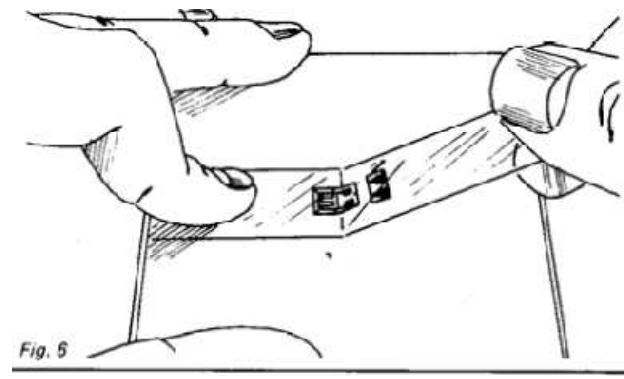


Figure 50 : 4ème opération de collage

➤ **5ème opération :**

Positionner la jauge a l'aide du ruban adhésif selon les repères du support et la trace visible sur 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.

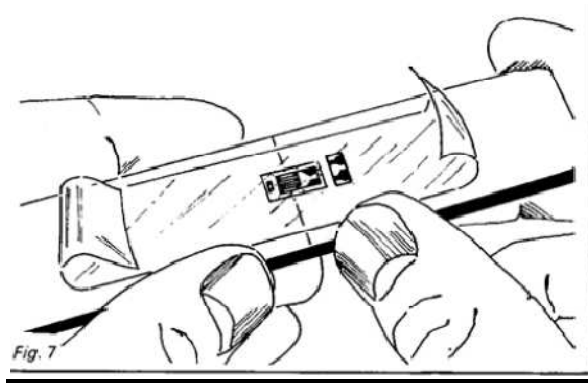


Figure 51:5^{ème} opération de collage

➤ **6^{ème} 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.

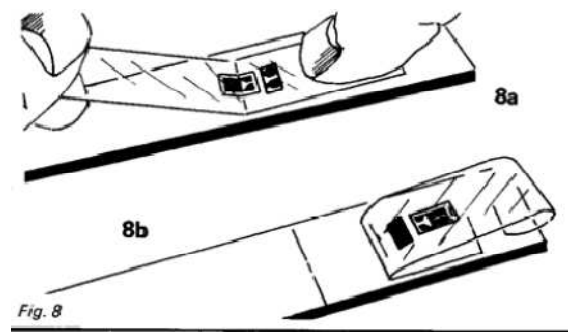


Figure 52 :6^{ème} opération de collage

➤ **7^{ème} 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.

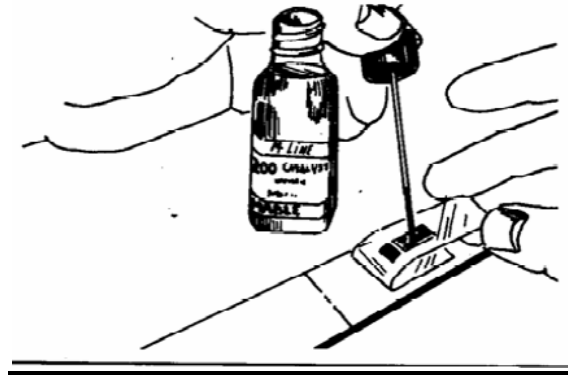


Figure 53 :7ème opération de collage

➤ **8ème opération :**

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

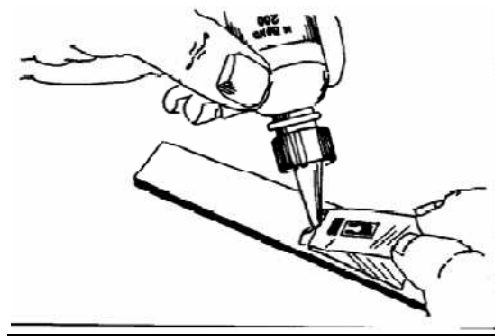


Figure 54 :8ème opération de collage

➤ **9ème 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 reoulant 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.

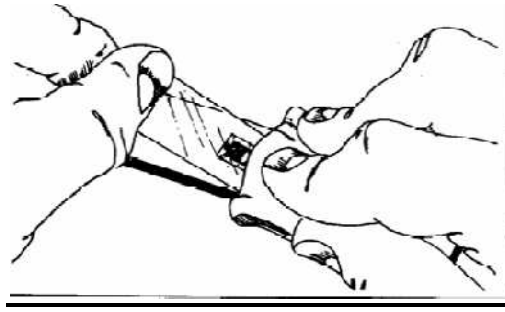


Figure 55 :9^{ème} opération de collage

➤ **10^{ème} opération :**

Presser la jauge durant une minute en appuyant fortement 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.

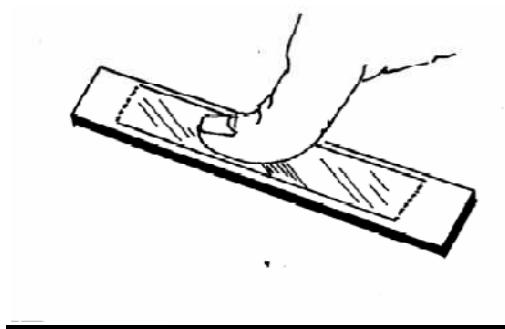


Figure 56 :10^{ème} opération de collage

➤ **11^{ème} 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 à souder, préparer les fils, etc., autant le laisser jusqu'au dernier instant. Une jauge n'a rien gagner et tout a perdre à rester nue exposée à l'humidité et aux poussières. La jauge est prête à être câblée, nettoyée, protégée et contrôlée.

- [1] Patrick Rommelure « Les jauges de déformations », Note technique ANSTJ, Mars 2002.
- [2] G. Asch et al. Dunod « A1 Déformation élastique », pages 377-408, 1983.
- [3] Luc Marchand, « Notion d'extensomètre par jauges a Resistances électriques », MEC6405 – Analyse expérimentale des contraintes Chapitre2, Janvier 2006.
- [4] Alex Bertholet « Mesure hydraulique, jauges de contraintes », fabricant en laboratoire génie civil place du levant N°1 1348Louvain-la-Neuve, Décembre 2007.
- [5] Patrick Robert « Mesures mécaniques des jauges, des ponts et solution de câblage pour chaque cas », Ingénieur commercial HBM France, Mesures 767, Septembre 2004.
- [6] E. Alibi et S.Jawadi « Conception et réalisation d'un enregistreur de données », Rapport de projet de fin d'études, Université Virtuelle de Tunis, 2011.
- [7] Datasheet ATMEGA328.
- [8] Datasheet INA126.

Ressources internet:

<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-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.groupe.polymtl.ca/mec6405/Receuil/M6405_Chap2_H06.pdf

Figure 1: Banc didactique d'étude des jauges de déformation - SM1009.

Figure 2: éprouvette d'essai de traction.

Figure 3: éprouvette d'essai de torsion.

Figure 4: Poutre de flexion.

Figure 5 : L'électronique du banc didactique d'étude des jauges.

Figure 6: Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction, compression et en flexion.

Figure7: Définition de la mesure de déformation par jauge de contrainte.

Figure 8: Diagramme d'une jauge.

Figure 9 : jauge de contrainte.

Figure10 : montage du pont de Wheatstone.

Figure 11: Pont de Wheatstone. Quand la différence de potentiel e_0 est nulle, le produit des résistances opposées est égal ($R_1R_3 = R_2R_4$).

Figure 12 : Montage en quart de pont.

Figure 13 : Utilisation d'une jauge "factice" pour éliminer les effets de température.

Figure 14: Montage en demi-pont.

Figure 15 : Montage en pont complet.

Figure 16 : Jauge de déformation.

Figure 17 : capteurs de mesures de tractions & de compression.

Figure 18 : Capteur de couple.

Figure19 : Capteur de position.

Figure 20 : Calibration par résistance de shunt.

Figure 21: Montage en quart de pont en montage 3 fils.

Figure 22: Longueur d'onde mécanique de l'ordre de grandeur de la jauge.

Figure23 : équilibrage par potentiomètre.

Figure 24: Schéma électrique de la carte électronique.

- Figure 25** : Amplificateur d'instrumentation avec un pont de Wheatstone.
- Figure 26**: Amplificateur d'instrumentation INA126.
- Figure 27**: Carte ARDUINO-UNO.
- Figure 28**: Schéma simplifié de la carte ARDUINO-UNO.
- Figure 29**: Microcontrôleur ATMEL ATmega328.
- Figure 30**: Branchement de la carte ARDUINO-UNO.
- Figure31** : Carte connectée et alimentée.
- Figure32**: Fenêtre du logiciel ARDUINO.
- Figure33** : Choix du port de connexion de la carte.
- Figure34**: Choix de la carte ARDUINO-UNO.
- Figure35**: Ouvrir le programme Blink.
- Figure36** : Contenu du programme Blink.
- Figure37** : Envoi du programme Blink dans la carte.
- Figure38** : Fin de l'Upload.
- Figure39**: Structure d'un programme.
- Figure40**: Afficheur LCD alphanumérique.
- Figure41** : Circuit du montage LCD-ARDUINO.
- Figure 42**: Schéma d'implantation des composants de la carte électronique.
- Figure43**:schéma du circuit imprimé de la carte électronique.
- Figure 44** : Schéma de la réalisation.
- Figure 45**: Indications des boutons.
- Figure46** : Affichage du 1^{er} menu
- Figure 47** :1ère opération de collage.
- Figure 48** :2ème opération de collage.
- Figure 49** :3ème opération de collage.

LISTE DES FIGURES

Figure 50 :4^{ème} opération de collage.

Figure 51 :5^{ème} opération de collage.

Figure 52 :6^{ème} opération de collage.

Figure 53 :7^{ème} opération de collage.

Figure 54 :8^{ème} opération de collage.

Figure 55 :9^{ème} opération de collage.

Figure 56 :10^{ème} opération de collage.

Figure 57 :11^{ème} opération de collage.

Liste des tableaux :

Tableau 1 : les principales configurations du pont de Wheatstone.

Tableau 2 : Cartes ARDUINO et caractéristiques.

Tableau 3: Liste des Instructions de l’afficheur LCD.