



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE MAGISTER

SPECIALITE : GENIE MECANIQUE
OPTION : MECANIQUE APPLIQUEE

THEME

Conception et réalisation de capteurs pour l'instrumentation d'une machine de traction, automatisation de l'acquisitions des données.

PRESENTÉ PAR

Hammal Lynda

Devant le jury d'examen composé de :

Mr. AZEM Said	Professeur	U.M.M.T.O	Président
Mr. BILEK Ali	Professeur	U.M.M.T.O	Rapporteur
Mr. DJEBBAR Arezki	Professeur	U.M.M.T.O	Examineur
Mr. ASMA Farid	Maitre de conférences A	U.M.M.T.O	Examineur
Mr. HAMOUCHE Kamel	Professeur	U.M.M.T.O	Invité

Année 2014

REMERCIEMENTS

Je tiens à commencer ce mémoire par quelques remerciements. Tout d'abord, je remercie les membres du jury, monsieur Azem Said professeur à l'université de mouloud Mammeri, monsieur Asma Farid, monsieur Djebbar, ainsi que monsieur Hamouche, qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir acceptés de juger ce travail.

Je remercie aussi mon encadreur, le professeur Bilek Ali, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail de magister, pour la liberté qu'il m'a octroyée sur ce sujet passionnant, pour m'avoir fait bénéficier de son expérience, pour le temps qu'il m'a consacré chaque fois que j'en ai exprimé le besoin, pour son soutien et ses encouragements, et enfin pour la passion qu'il transmet lors de discussions techniques.

Je souhaite également exprimer mes remerciements à monsieur Hamouche pour le temps qu'il m'a consacré, pour l'aide qu'il a apporté à ce travail, pour la proposition de la carte Arduino, et également pour ses explications sur le fonctionnement de cette carte. Sans ses précieux conseils ce travail n'aurait pas été à bien. Un grand merci pour l'aspect pédagogique de ses explications et sa curiosité scientifique.

Je souhaite remercier aussi l'Ingénieur du laboratoire de mécanique monsieur Ahmed Zaid Amar pour le temps qu'il a su me consacrer, ses conseils et son sens aigu de la synthèse. Je remercie aussi les techniciens du hall technologique de Oued Aissi, pour leurs nombreux conseils et leurs gentilleses.

Je remercie mes nombreux collègues, que ce soit le personnel administratif, le personnel informatique, le service de documentation et le personnel scientifique pour l'aide qu'ils ont pu m'apporter à un moment ou à un autre ainsi que la très bonne ambiance que j'ai toujours trouvée au laboratoire de LMSE.

Pour finir, je souhaite témoigner mon amitié à tout mes collègues avec qui j'ai passé de très agréables moments sans que je cite leurs noms, qu'ils se reconnaissent à travers ces mots.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

CHAPITRE I: Recherche bibliographie

I.1 Introduction.....	4
I.2 Historique des essais mécaniques	4
I.3 les essais mécaniques	7
I.4 Éprouvettes de traction	9
I.5 Description générale d'une machine de traction.....	11
I.6 Mesure du déplacement	12
I.6.1 Déplacement de la traverse.....	12
I.6.2 Extensomètres	13
I.6.3 Les travaux réalisés avec les extensomètres.....	13
I.6.3.1 Conception du capteur	14
I.6.3.2 Étalonnage du capteur	15
I.6.3.3 Résultats des essais d'étalonnage	16
I.7 Nouvelles méthodes de mesure de la déformation	17
I.7.1 Méthode de corrélation d'images	18
I.7.2 Méthode de la grille	20
I.8 Quelques travaux de recherches réalisés avec les nouvelles méthodes de calcul de la déformation.....	22
I.8.1 Mesure de la déformation avec la méthode de la grille.....	22
I.8.1.1 Essai de translation	22
I.8.1.2 Essai de traction.....	24
I.8.1.3 Le calcul direct de la déformation sans calculer le champ de déplacement	24

I.8.2 Mesure de la déformation avec la méthode de corrélation d'image	26
I.8.3 Mesure de la déformation Avec la méthode de moiré	28
I.9 Conclusion	31

CHAPITRE II : les capteurs et la chaine d'acquisition

II.1 Introduction	33
II.2 Chaine d'acquisition	35
II .2.1 Rôle et construction	35
II.2.2 Les principaux composants de la chaîne d'acquisition	36
II. 3 Les capteurs	37
II. 3. 1. Types de capteurs suivant l'information délivrée	38
II. 3. 1. 1 Capteurs analogiques	38
II. 3. 1. 2 Capteurs logiques	39
II. 3. 1. 3 Capteurs numériques	39
II. 3. 1. 4 Capteurs digitaux	39
II.3.2 Types de capteurs suivant la grandeur physique mesurée délivrée.....	39
II.3.2.1 Capteur actif	39
II.3.2.1 Capteur passif	42
II.3.2.1 Capteur inductif	43
II.3.3 Définitions des caractéristiques générales d'un capteur	46
II.3.4 Les caractéristiques métrologiques d'un capteur	47
II.4 Quelques exemples de capteurs	51
II.4.1 capteur LVDT	51
II.4.2 Capteur de force et de pression	52
II.5 Conclusion	53

CHAPITRE III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges de contraintes

III.1 Introduction	54
III.2 Contraintes	54
III.3 Déformation	56
III.3.1 Définition	56
III.3.2 Types de déformation	56
III.3.2.1 Déformation élastique.....	56
III.3.2.2 Déformation plastique	56
III.4 La limite d'élasticité	57
III.5 Loi de Hooke	57
III.5.1 Module de Young	58
III.6 Notions d'extensométrie des jauges à résistance électrique.....	58
III.6.1 Jauge de contrainte	59
III.6.2 Constituant de la jauge	60
III.6.3 Différents types de jauges.....	62
III.6.3.1 Les jauges simples	63
III.6.3.2 Les minis et micro jauges	63
III.6.3.3 Rosettes	63
III.6.3.4 Les jauges des contraintes résiduelles	64
III.6.3.5 Les jauges longues.....	65
III.6.3.6 Les jauges de contrainte optiques.....	65
III.6.4 Effets parasites	66
III.6.4.1 Effet de la température.....	66
III.6.4.2 Effet d'Hystérésis	69
III.6.4.3 Erreur de linéarité	69
III.7 Principe de fonctionnement d'une jauge d'extensométrie	69
III.8 Mesure de Champ de déformation quelconque avec jauge de contrainte.....	73
III.9 Changement de résistance des jauges provoqué par la déformation.....	74
III.9.1 Pont de Wheatstone	74
III.9.2 Différents montage du pont.....	76
III.10 Conclusion	79

CHAPITRE IV : Essai de traction

IV.1 Introduction.....	80
IV.2 Les éprouvettes.....	80
IV.3. Machines d'essais de traction.....	82
IV.4. Diagramme de traction.....	84
IV.4.1 Courbe rationnelle de traction	85
IV.4.2 Caractéristiques mécaniques.....	87
IV.4.2.1 Module d'élasticité	87
IV.4.2.2 Limite élastique conventionnelle $R_{p0.2}$	87
IV.4.2.3 La limite apparente d'élasticité supérieure/inférieure R_{es} / R_{el}	88
IV.4.2.4 La résistance à la traction R_m	88
IV.4.2.5 L'allongement à la rupture A	88
IV.4.3 Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction	88
IV.4.4 Influence de la température	89
IV.5. Exploitations de l'essai	91
IV.5.1 Interprétation qualitative.....	91
IV.6 Constante d'élasticité.....	93
IV.7. Limite d'élasticité.....	95
IV.8 Limites conventionnelles	97
IV.9 Conclusion	98

CHAPITRE V : Partie pratique

V.1 Introduction.....	99
V.2 Description du capteur de déformation.....	99
V.3 Le collage des jauges	101
V.4 Description du capteur de force	104
V.5 La chaine d'acquisition.....	106
V.6 Carte Arduino.....	106
V.6.1 Description de la carte arduino.....	107
V.7 Étalonnage du capteur de force et déformation	108
V.7.1 Étalonnage du capteur de déformation	108

V.7.2	Étalonnage du capteur de force	109
V.8	Description des éprouvettes plates.....	110
V.9	Description de la machine de traction «OEHLGLASS	112
V.9.1	Les caractéristiques techniques de la machine	114
V.10	Description de l'essai de traction	115
V.11	Les résultats des essais de traction	117
V.12	Analyses des résultats	119
V.13	Conclusion.....	120
	Conclusion générale	121

NOMENCLATURE ET SYMBOLES

E: Module de Young.

G : module de cisaillement

v: Coefficient de Poisson du modèle en époxy.

ϵ : l'allongement relatif

ϵ_1 : déformations axiales

ϵ_2 : déformations radiales

K : la raideur

F : la force

V : Le déplacement

σ : contrainte normale

Δl : variation de déformation

L_0 : Longueur initiale

L : Longueur totale de l'éprouvette

L_c : longueur calibré de l'éprouvette

r : rayon de raccordement

L_u : Longueur entre repère de l'éprouvette

ρ : Résistivité du conducteur ;

l : La longueur du fil conducteur ;

s : L'aire de sa section ;

R : La résistance ;

k : Facteur de la jauge ;

D : Diamètre de la section ;

S : l'intensité réfléchi par la grille

\vec{n} : Vecteur unitaire normal ;

p : Le pas de la grille (la période) ;

\vec{F} : Vecteur fréquence spatiale ;

A : L'amplitude de l'intensité du signal

γ : La contraste de l'intensité ;

f : La fréquence de la porteuse ;

Φ : La phase modulée

$\vec{u}(M)$: Champs de déplacements

Liste des figures

Fig. (I.1) : Dessins de Galilée pour illustrer l'essai de traction et l'essai de flexion	5
Fig. (I.2) : Schémas du à Hooke décrivant ces expériences	6
Fig. (I.3) : Essai de traction réponse typique	8
Fig. (I.4) : Éprouvette de traction plate	10
Fig. (I.5) : Image des éprouvettes cylindriques et éprouvettes plates.....	10
Fig. (I.6) : Machine de traction	11
Fig. (I.7) : jauge de contrainte	13
Fig. (I.8) : capteur et jauges.....	14
Fig. (I.9) : Schémas des parties du capteur et zone de déformation.....	15
Fig. (I.10) : Résultats de l'étalonnage	16
Fig. (I.11) : Résultats de l'essai chargement/déchargement	17
Fig. (I.12) : Codage aléatoire d'une surface.....	19
Fig. (I.13) : La méthode de corrélation d'image	19
Fig. (I.14) : Grille croisée.....	21
Fig. (I.15) : Exemple de dérivées de phase pour plusieurs valeurs du déplacement.....	23
Fig. (I.16) : Déformation fictives dues à la variation du pas de la grille	23
Fig. (I.17) : Champ de déformation, essai de traction sur une éprouvette en aluminium ..	24
Fig. (I.18) : Courbe de traction de iWPCF et iaWPCF	27
Fig. (I.19) : Relief complet de la partie distale du tibia	29
Fig. (I.20) : Schémas du principe de déformation d'un parallélogramme élémentaire	29
Fig. (I.21) : Éprouvette avec un champ de marqueurs	30
Fig. (I.22) : Résultats obtenus par corrélation sur la peau d'origine animale	31
Fig. (II.1) : Schémas d'une chaîne d'acquisition	34
Fig. (II.2) : Rôle et construction d'une chaîne d'acquisition	35
Fig. (II.3) : Les Éléments d'une chaîne d'acquisition	36
Fig. (II.4) : Effet et grandeurs de sortie d'un capteur	40
Fig. (II.5) : Exemple d'application d'effets physiques capteurs actifs (a), thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall	42
Fig. (II.6) : Capteur inductif.....	44
Fig. (II.7) : Courbe d'étalonnage d'un capteur	46
Fig. (II.8) : Courbe d'étendue de mesure d'un capteur.....	49
Fig. (II.9) : Domaine de linéarité	49
Fig. (II.10) : Temps de réponse.....	50
Fig. (II.11) : Extensomètre diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction	51
Fig. (II.12) : Les principales composantes d'un LVDT	52
Fig. (II.12) : Mesure de pression.....	53

Fig. (III.1) : La courbe contrainte-déformation	57
Fig. (III.2) : Diagramme d'une jauge	60
Fig. (III.3) : Jauge de contrainte	60
Fig. (III.4) : Jauge juste avant son collage sur la structure	60
Fig. (III.5) : Jauge a fil et jauge a trame pelliculaire	62
Fig. (III.6) : Jauge simple	63
Fig. (III.7) : Rosette de jauges	64
Fig. (III.8) : Jauge de contraintes résiduelles.....	64
Fig. (III.9) : Perçage de la jauge de contraintes résiduelles.....	65
Fig. (III.10) : Jauge longue	65
Fig. (III.11) : Jauge de contrainte optique	66
Fig. (III.12) : État de contrainte	74
Fig. (III.13) : Pont de Wheatstone	75
Fig. (III.14) : Circuit de conditionnement associe à un capteur de pression à pont de jauge	76
Fig. (III.15) : Montage en quart de pont	77
Fig. (III.16) : Montage en demi-point.....	77
Fig. (III.17) : Montage en pont complet	78
Fig. (IV.1) : Eprouvette de traction cylindrique.....	82
Fig. (IV.2) : Dessin d'une machine de traction.....	83
Fig. (IV.3) : Machine de traction avec acquisition de données.....	84
Fig. (IV.4) : Schéma représentant deux types différents de courbes de traction.....	85
Fig. (IV.5) : Courbe rationnelle de traction.....	86
Fig. (IV.6) : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction.....	89
Fig. (IV.7) : Influence de la température sur la courbe de traction	90
Fig. (IV.8) : Les différentes phases d'un diagramme de traction.....	91
Fig. (IV.9) : Les différentes sections de l'éprouvette avant et après rupture	93
Fig. (IV.10) : Module de Young	94
Fig. (IV.11) : Différents diagrammes de l'essai de traction.....	95
Fig. (IV.12) : Courbe de traction des aciers	96
Fig. (IV.13) : Limites conventionnelles.	97
Fig. (V.1) : La partie rigide (crochets et pieds)	100
Fig. (V.2) : La partie flexible.....	100
Fig. (V.3) : L'assemblage des deux parties (rigide et flexible).....	101
Fig. (V.4) : Image du capteur de déformation	101
Fig. (V.5) : Dessin de présentation de la jauge et crosses relais	102
Fig. (V.6) : Collage de la jauge	102
Fig. (V.7) : Jauge en pont complet au milieu de la partie flexible	103
Fig. (V.8) : La flèche due au déplacement imposé par l'éprouvette	103
Fig. (V.9) : Image de fixation du capteur sur l'éprouvette.....	104
Fig. (V.10) : Capteur de force	104

Fig. (V.11) : Montage du capteur de force sur la canalisation hydraulique de la machine de traction.....	105
Fig. (V.12) : Montage du capteur sur le répartiteur.....	105
Fig. (V.13) : Chaîne d'acquisition « Micromesure Vishays ».....	106
Fig. (V.14) : Carte d'acquisition arduino	107
Fig. (V.15) : Description de la carte d'acquisition arduino	108
Fig. (V.16) : Courbe d'étalonnage du capteur de déformation	109
Fig. (V.17) : Courbe d'étalonnage du capteur de force.....	110
Fig. (V.18) : Éprouvette plate.....	111
Fig. (V.19) : Tête d'amarrage.....	111
Fig. (V.20) : Éprouvette plate.....	112
Fig. (V.21) : Machine de traction « OEHGLASS »	113
Fig. (V.22) : Emplacement de l'éprouvette et de l'extensomètre sur la machine de traction	115
Fig. (V.23) : Acquisition des données sur ordinateur.....	116
Fig. (V.24) : Le montage du capteur sur la machine de traction.....	116
Fig. (V.25) : Courbe de traction de l'éprouvette 1	117
Fig. (V.26) : Module de Young de l'éprouvette 1	118
Fig. (V.27) : Courbe de traction de l'éprouvette 2	118
Fig. (V.28) : La pente de la droite de la courbe de traction de l'éprouvette 2.....	119
Fig. (V.29) : Image d'une éprouvette avant et après allongement	120

LISTE DES TABLEAUX

N° Tableau	Designation	N° de page
Tableau I.1	Module de Young évalué par la tangente à l'origine d'un modèle de Maxwell-Binham	27
Tableau II.1	Quelques principaux domaines d'application de capteurs	38
Tableau III.1	Nom commercial et facteur de jauge de quelques alliages	72
Tableau III.2	Caractéristique typique de jauges	73
Tableau IV.1	Valeurs typiques du modèle d'élasticité pour différents métaux	87
Tableau IV.2	Quelques valeurs du modèle de Young	95
Tableau V.1	Étalonnage du capteur de déformation	109
Tableau V.2	Valeur de l'étalonnage du capteur de force	109
Tableau V.3	Éléments de la machine de traction « EOHGLASS »	114

Introduction générale

Pour mesurer la déformation d'une pièce au cours d'un essai de traction, il existe deux méthodes très différentes. Le plus souvent, on utilise un capteur de déplacement qui est intégré dans toutes les machines d'essais, à la traverse mobile. Ce capteur permet de mesurer le déplacement de la traverse et, indirectement, l'allongement de la pièce (dans le cas d'un essai de traction).

La mesure indirecte de la déformation convient à de nombreux essais de traction, compression ou flexion, en particulier lorsque les pièces présentent un fort allongement. Mais elle souffre d'une limite. Du fait qu'il est placé sur la traverse, le capteur de déplacement mesure en réalité la déformation de toute la chaîne de mesure (pièce, accessoires de serrage, traverse, etc.). La méthode ne convient donc pas lorsqu'il s'agit de mesurer de très faibles déformations (c'est le cas notamment avec des matériaux métalliques). Pour pallier cette limite, on propose d'utiliser un extensomètre pour mesurer directement l'allongement de la pièce. La mesure directe, imposée dans certaines normes d'essais, est plus précise. « Dans certains domaines c'est le cas notamment de la métallurgie), elle est incontournable »

La mesure est une étape cruciale dans l'acquisition scientifique de la connaissance et le capteur est un composant incontournable de tout système moderne de mesure : il constitue l'interface entre monde réel et électronique du système de traitement. Dans son principe, le capteur est un organe de prélèvement d'informations qui élabore, à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (généralement électrique) représentative de la grandeur prélevée, et utilisable à des fins de mesure. Un circuit électrique le conditionneur est fréquemment associé au capteur afin de délivrer sous la forme la plus adéquate le signal électrique, support de l'information, qui sera traité par l'électronique du système.

La qualité d'une mesure est donc de façon primordiale déterminée, d'une part, par le choix judicieux du capteur et de son conditionneur et, d'autre part, par l'exploitation pertinente de leurs qualités métrologiques.

La connaissance des contraintes mécaniques auxquelles une structure est soumise est un élément essentiel pour l'appréciation de la sécurité de son fonctionnement. Les contraintes produisent des déformations du milieu auquel elles sont appliquées et les relations entre les deux grandeurs, contrainte et déformation, peuvent être explicitées par la théorie de la résistance des matériaux. La mesure des déformations en des zones judicieusement choisies permet donc de calculer les contraintes qui sont à leur origine.

Les capteurs de déformation sont aussi désignés comme extensomètres ou jauges de déformation, le type le plus souvent utilisé étant la jauge résistive : elle est collée sur la structure dont elle subit la déformation et ses faibles dimensions, du mm au cm selon les modèles, permettent des mesures quasi ponctuelles.

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

Dans notre cas d'étude, l'objectif est de concevoir un capteur de déformation afin d'instrumenter une machine d'essai de traction, qui est déjà équipé d'un capteur de force et pouvoir ensuite réaliser des essais de traction. Le tracé de la courbe de contrainte-déformation en temps réel est aussi notre objectif, afin de pouvoir exploiter les données de ces essais qui nous fournissent plusieurs informations qui caractérisent un matériau.

Avant la conception de notre capteur, nous avons mené une recherche bibliographique sur différents capteurs qui sont disponibles sur le marché et dans des labos de recherches pour les essais de traction. Ce qu'on peut dire c'est qu'il existe une large gamme d'extensomètres (capteurs capacitifs, LVDT, jauges, capteurs laser, systèmes vidéo, etc.). Pour bien choisir, il faut prendre en compte de nombreux critères. Le type de matériau, en particulier, est déterminant. Si l'on cherche à mesurer l'allongement d'un film plastique, par exemple, il faudra forcément opter pour un extensomètre sans contact. Dans ce cas, on utilisera par exemple un extensomètre laser ou vidéo. Avec des matériaux métalliques ou des polymères durs, en revanche, le contact entre le capteur et la pièce n'est pas gênant. Dans ce cas, on pourra par exemple utiliser un extensomètre à jauges de contraintes. Le choix du capteur dépend aussi de l'allongement du matériau (il existe ainsi des extensomètres dotés d'une course allant jusqu'à un mètre, pour des essais sur caoutchoucs), de la température à laquelle

se fait l'essai, et de la résolution attendue. Dans notre cas d'étude on a penché sur le choix d'un capteur à jauges de contraintes avec contact.

Le deuxième chapitre est consacré aux capteurs et au conditionnement du signal qui est une étape très importante, pour éviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites : l'amplification, le filtrage et la conversion du signal sous forme numérique et bien d'autres tâches liées au conditionnement du signal sont détaillés dans ce chapitre.

Les notions sur les extensomètres et les mesures des contraintes et des déformations par les jauges de contraintes sont évoquées dans le chapitre trois.

Bien que l'essai de traction reste certainement l'essai le plus fondamental, il présente tout de même des exigences pour sa mise en œuvre, afin de garantir des résultats significatifs. La description d'un essai de traction est détaillée dans le chapitre quatre.

Le cinquième chapitre est réservé à la partie expérimentale, dont la conception de notre capteur de déformation et de nos éprouvettes de traction. Le conditionnement du signal et l'acquisition des données délivrées par les deux capteurs (force et déplacement), lors de l'essai de traction est donné sous forme de tracé de la courbe contrainte-déformation (courbe de traction) en temps réel. Les résultats de cet essai peuvent être enregistrés sous fichier Excel.

On termine notre étude par une conclusion générale.

ÉTUDE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction

L'ingénieur mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Les essais mécaniques sont l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, du module d'Young à la limite d'élasticité, en passant par la ténacité ou la résistance à la fatigue, et ce dans des conditions variables, par exemple de température ou de vitesse de sollicitation.

Ce sont les essais mécaniques qui peuvent lui fournir ces données nécessaires. Ils sont tout d'abord indispensables pour la mise au point des procédés de mise en forme. En effet, si, pendant longtemps, l'augmentation de la dimension des structures était la solution apportée à des problèmes mécaniques. Aujourd'hui les exigences accrues de qualité et de précision, les économies d'énergie à réaliser concourent à rendre nécessaires les calculs détaillés de ces diverses opérations. Il est évident qu'ils ne peuvent être menés à bien sans une connaissance précise des lois de comportement mécanique des matériaux faisant intervenir la vitesse de sollicitation et la température, ainsi que les interactions entre les propriétés mécaniques et les évolutions de la structure microscopique.

Les techniques expérimentales les plus couramment utilisées, aussi bien dans les laboratoires universitaires qu'industriels, pour caractériser le comportement mécanique des matériaux sont : les essais uniaxiaux (quasistatiques et dynamiques), les essais multiaxiaux, les mesures d'indentation, les essais de fatigue et les techniques gravitant autour du phénomène de rupture et d'autres méthodes de mesure de la déformation et de la contrainte.

I.2 Historique des Essais mécaniques

Les premiers travaux écrits peuvent être attribués à Léonard de Vinci (1452-1519) pour une machine décrite et dessinée et qui servait pour une 'Expérience de la force capable d'agir sur la longueur d'un file de fer', mais il semble que c'est en 1638, sur la fin de sa vie, que Galilée

(1564-1642) publia son “Dialoghi delle due nuove scienze”. Le premier ouvrage publié qui traitait sérieusement de résistance mécanique. Il étudia l’influence de la section sur la résistance statique des tiges, montrant que la charge de rupture était bien proportionnelle à l’aire de la section droite. Il s’intéressa aussi, avec plus ou moins de bonheur (il ne pouvait bénéficier des travaux de Isaac Newton (1642-1727) sur le principe de l’action et de la réaction), à la résistance en flexion de divers types de poutres. [1]

Alors qu’il partageait avec les Grecs leur mépris pour les Sciences appliquées, Isaac Newton y apporta deux outils d’importance primordiale : le calcul différentiel et sa troisième loi, plus connue sous le nom de “Principe de l’action et de la réaction”. Cette loi stipule que si un corps pesant exerce sur un corps support une force due à l’action de la pesanteur (contact statique) ou à celle de l’accélération (contact dynamique), ce support exerce en sens inverse une force de réaction égale et opposée sur le corps pesant. Si les lois de Newton nous donnent les forces auxquelles une structure peut être soumise, elle ne nous donne aucune information sur les forces de réaction au sein des matériaux qui la compose. [1]



Figure 1.1 : Dessins de Galilée pour illustrer l’essai de traction et l’essai de flexion [1]

En Angleterre et en France, à la fin du 17^{ème} siècle, Hooke et Mariotte découvraient presque simultanément la relation entre déformations et contraintes en élasticité. Vers 1660, Hooke découvrit la loi entre l’allongement d’un ressort et la force qui lui est appliquée (Fig: I.2). En fait, Hooke n’appliqua pas ses idées au problème de la flexion des poutres entrevu par Galilée. C’est Mariotte qui, en 1680, publia la même loi et expliqua la différence entre fibres tendues et

fibres comprimées dans une poutre en flexion. Ce n'est qu'en 1807 que Young (1773-1829) introduisit la notion de module d'élasticité. [1]

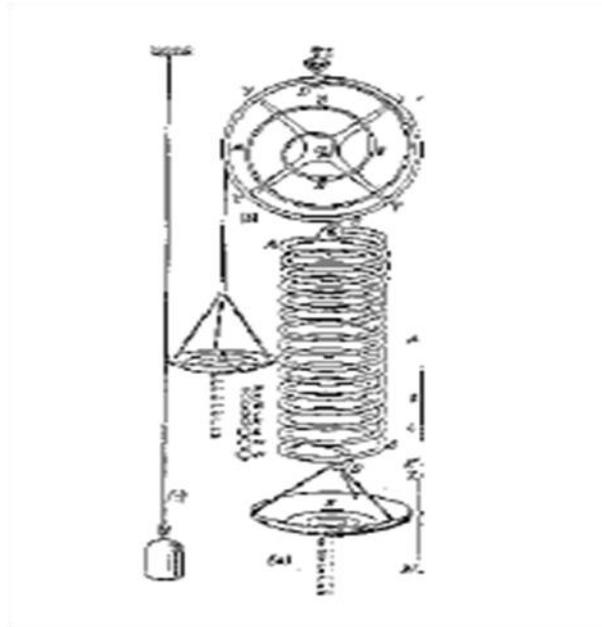


Figure 1.2 : Schémas dû à Hooke décrivant ces expériences [1]

Comment et pourquoi la structure résiste-t-elle ? La réponse fut donnée par Robert Hooke (1635-1703). Étudiant l'allongement produit par l'action de charges croissantes appliquées sur divers matériaux, il établit une relation de proportionnalité, dans la limite de précision des mesures de l'époque, et il formula la loi de l'élasticité qui porte son nom en 1679 dans son traité " De potentia restitua" sous la forme "Ut tensio, sic vis". Telle tension, telle force, car en latin tensio signifie généralement étirement et non tension - au sens de force - bien que les romains aient souvent confondu les deux acceptations (notions). [1]

Nous savons aujourd'hui que cette loi s'applique bien à presque tous les solides usuels (cristallins ou amorphes) aux faibles contraintes mais que les matériaux constitutifs des structures biologiques la suivent rarement. Cependant, pour les structures et les matériaux usuels, elle joue un rôle essentiel.

Malgré leur richesse, les idées de Hooke ne débouchèrent que cent ans plus tard sous la forme des concepts de Contrainte et de Déformation introduits par Augustin Cauchy (1789-1857). Bien que recouvrant des notions très simples ces deux termes restent souvent mystérieux et rebutants. Jusqu'alors les études avaient porté sur des structures plus ou moins élaborées pour lesquelles les analyses en termes d'allongement et de force ne distinguaient pas ce qui était la

contribution de la géométrie de la structure de celle intrinsèque au matériau. La définition de l'état mécanique local en termes de contrainte et de déformation a véritablement sorti la Science des Matériaux de l'impasse. L'idée qu'un matériau puisse être caractérisé par une rigidité intrinsèque est due à Thomas Young (1773-1829) qui démontrait ainsi que la déformation globale d'une structure résulte en fait de la combinaison de la raideur du matériau et de la taille et de la forme de cette structure. Cependant on doit à Henri Navier (1785-1836) d'avoir formulé mathématiquement le concept développé par Thomas Young, en s'appuyant sur les notions de déformation et de contrainte formulées par Augustin Cauchy. [1]

Les bases étaient posées pour entreprendre la résolution analytique des problèmes de calcul des structures. Fort de ces progrès, le début du XIXe siècle fut la période privilégiée des tentatives de prédiction des résistances pratiques des matériaux à partir des connaissances acquises sur les forces des liaisons interatomiques et des catastrophes, les résultats obtenus s'écartant de plusieurs ordres de grandeur des valeurs expérimentales. Il fallut attendre plus d'un siècle pour voir se dessiner une approche satisfaisante des mécanismes comportementaux au delà de la zone élastique ductilité et plasticité, fragilité et rupture. En effet, ce n'est qu'en 1920 que A. Griffith publia son article révolutionnaire sur la résistance à la rupture des solides et ce n'est qu'en 1934 que Geoffrey Taylor suggéra l'existence de dislocations dans les cristaux pour interpréter les propriétés de ductilité des métaux purs. [1]

La Science des Matériaux disposait enfin des outils conceptuels nécessaires à son développement. Les travaux de Griffith et de Taylor sont à la base des méthodes d'élaboration de nos matériaux modernes. Le développement conjoint des nouveaux matériaux et des moyens de calcul par éléments finis permet aujourd'hui aux ingénieurs de concevoir des structures mécaniquement fiables de plus en plus complexes.

I.3 Les essais mécaniques

Dimensionner des structures pour qu'elles puissent supporter le chargement, nécessite la résolution complète du problème mécanique associé aux équations de conservation (masse, impulsion, énergie) il faut adjoindre les lois de comportement des matériaux constitutifs, équations d'état reliant contrainte et déformation.

L'établissement de la loi de comportement d'un matériau est généralement phénoménologique, basée sur l'expérimentation macroscopique. Cependant l'identification expérimentale du comportement mécanique d'un matériau est par nature une opération délicate car elle ne peut s'effectuer qu'à partir d'essais mécaniques sur des éprouvettes qui, par leur taille, doivent être

considérées comme des structures. Or, on ne peut déduire le champ de contraintes à partir des efforts globaux dans une structure, condition nécessaire à l'identification du comportement, que si l'on connaît déjà le comportement. Pour vaincre cette difficulté, force nous est de recourir à des géométries et des sollicitations spécifiques permettant de déduire les variables mécaniques locales à partir des grandeurs globales quel que soit le comportement. [1]

Les essais mécaniques classiques s'effectuent donc sur des éprouvettes normalisées et des sollicitations particulières telles que la traction uni-axiale d'un barreau long, la torsion ou la mise en pression interne d'un tube mince. . .

L'essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental et le plus utilisé pour la caractérisation mécanique des matériaux. Étant purement uni-axial, du moins tant qu'il n'y a pas de striction (diminution de la section de l'éprouvette au centre de celle-ci), il permet de déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces mécaniques.

L'essai de traction met habituellement en évidence trois stades principaux dans l'évolution du comportement du matériau [1]

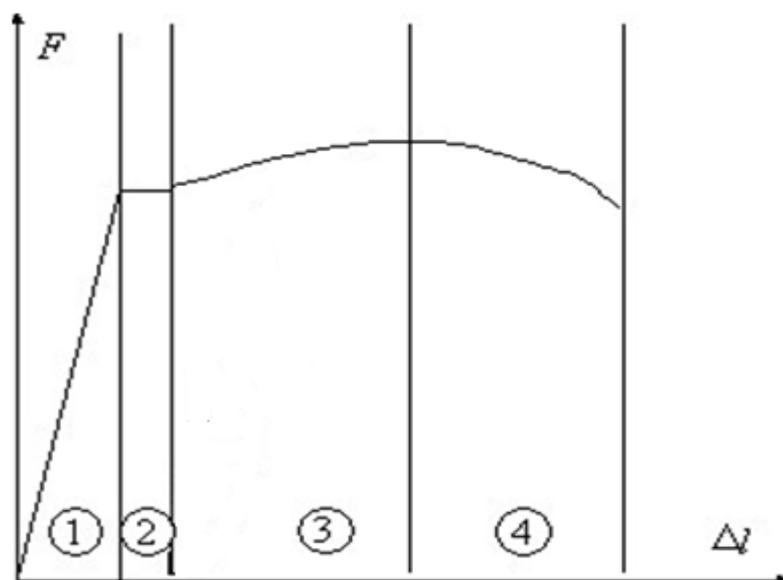


Figure I.3 : Essai de traction : réponse typique [1]

Un comportement élastique linéaire ou non (domaine 1) pour lequel aucune déformation résiduelle ne se maintient après décharge.

Un stade de déformation plastique parfait (domaine 2) et avec écrouissage (domaine 3) caractérisé par une déformation résiduelle irréversible après décharge, l'ensemble du comportement étant complètement indépendant du temps, notamment de la vitesse de chargement.

Une étape d'endommagement (domaine 4) conduisant à la rupture. L'endommagement se manifeste par l'altération progressive des propriétés mécaniques qui accompagne, habituellement pour d'assez grandes déformations ou sous sollicitations cycliques, la formation et la croissance de microfissures et microcavités, altération pouvant aller jusqu'à la rupture. Naturellement liées à la déformation elle-même les lois d'endommagement doivent être couplées aux lois de comportement et l'ensemble détermine le comportement réel du matériau. Selon les matériaux, la rupture peut se produire plus ou moins tôt, notamment en stade élastique ou plastique avant endommagement.

I.4 Éprouvettes de traction

L'éprouvette de traction est généralement obtenue par usinage d'un prélèvement d'un produit ou d'une ébauche moulée. Les produits de section constante (profilés, barres, fils...) ainsi que les éprouvettes brutes de fonderie (fonte, alliages non ferreux...) peuvent être soumis à l'essai sans être usinés. Elles comportent une partie calibrée de longueur L_c raccordée par un congé de raccordement aux têtes d'amarrage. Elles peuvent présenter une section droite circulaire, carrée, rectangulaire, hexagonale ou autre.

Les éprouvettes de traction adoptent en générale deux géométries : cylindrique ou plate. La section doit être constante sur une longueur suffisante pour obtenir un état de contrainte homogène pendant l'essai. Aux deux extrémités sont usinées des têtes d'amarrage avec des rayons de courbures suffisamment grands pour éviter des concentrations de contrainte excessives. Dans le cas des éprouvettes plates, le centrage de l'éprouvette peut devenir problématique si des trous calibrés ne sont pas percés dans les têtes.

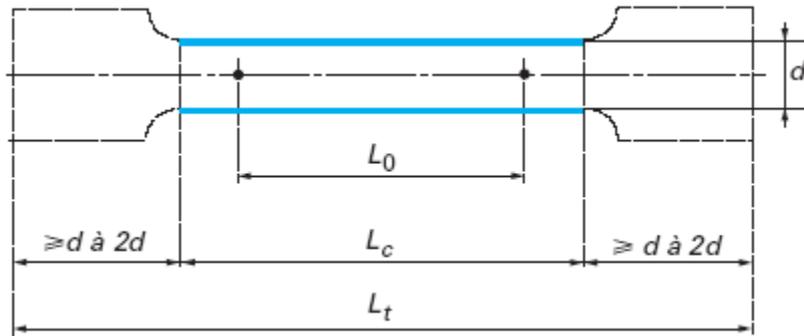


Figure I.4 : Éprouvette de traction plate

On définit la longueur initiale L_0 comme la distance entre deux repères initialement tracés sur l'éprouvette.

Pour pouvoir comparer des allongements à la rupture, il est important de respecter les règles de similitude, d'où l'intérêt des éprouvettes dites proportionnelles. Ces éprouvettes sont telles que :

$$L_0 = k \cdot S_0$$

Les normes internationales et nationales définissent le rapport : $k = 5,65$. La longueur L_c de la partie calibrée doit être suffisante par rapport à la distance entre repère L_0 . Il est recommandé de prendre :

$$L_0 + d/2 < L_c < L_0 + 2d$$

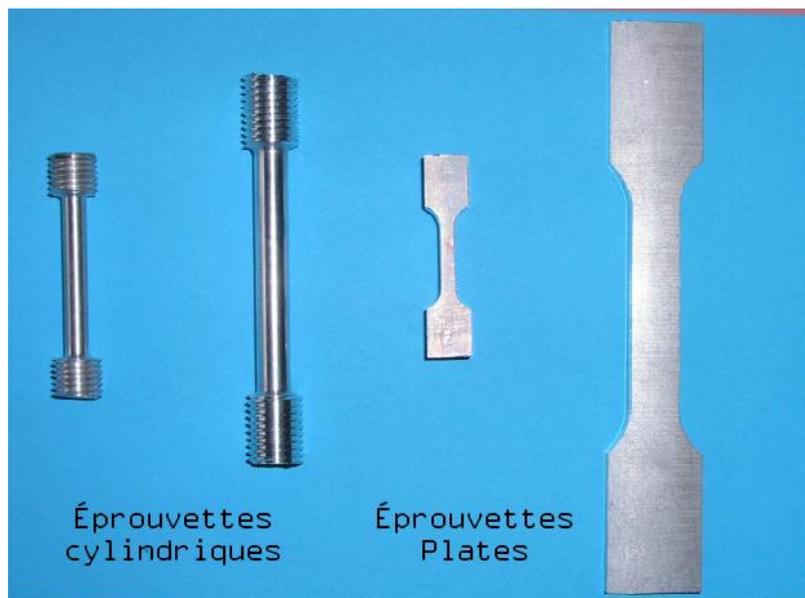


Figure I.5 : Image des éprouvettes cylindriques et éprouvette plates [1]

I.5 Description générale d'une machine de traction

Une machine de traction est constituée d'un bâti portant une traverse mobile. L'éprouvette de traction, vissée ou enserrée entre des mors, selon sa géométrie, est amarrée à sa partie inférieure à la base de la machine et à sa partie supérieure à la traverse mobile (dans le cas d'une machine mécanique) ou au vérin de traction (dans le cas d'une machine hydraulique). Le déplacement de la traverse vers le haut réalise la traction. Une machine de traction comporte une cellule de charge, qui permet de mesurer l'effort appliqué à l'éprouvette et le déplacement de l'éprouvette peut être suivi de diverses façons. Les dispositifs expérimentaux sont généralement asservis et peuvent être pilotés à vitesse de montée en charge, à charge constante, à vitesse de déformation constante, etc. selon ce qui peut être proposé par le système de pilotage. [2]



Figure I.6 : Machine de traction [2]

L'essai de traction permet de déterminer le module de Young E et le coefficient de Poisson ν . Il faut pour cela mesurer les déformations axiales ϵ_1 et radiale ϵ_2 . À cette fin, on peut utiliser soit des extensomètres, soit des jauges de déformation et capteurs à jauges extensométriques, dans le traité Mesures et Contrôle. Les premiers comportent deux couteaux formant la base de mesure. Ils sont appliqués sur le corps de l'éprouvette, pour déterminer soit ses variations de longueur soit ses variations de diamètre. La variation de distance entre couteaux est mesurée à l'aide de différents

dispositifs : dispositif à variation d'impédance, jauges de contraintes qui déterminent la flexion d'une lame reliée aux couteaux. Les jauges de déformation sont des résistances électriques collées sur l'éprouvette et dont la variation de résistance électrique est proportionnelle à l'allongement. Ces jauges sont montées sur un pont d'extensométrie. Si l'on en place dans la direction axiale et perpendiculairement à l'axe, le branchement en pont permet de compenser automatiquement les variations de résistance provenant des variations de température et de déterminer ε_1 et ε_2 . La difficulté rencontrée dans cette mesure est la présence, difficilement évitable, d'un moment de flexion parasite dû au mauvais alignement de l'éprouvette. De ce fait, toutes les fibres externes ne subissent pas le même allongement. Il convient alors de faire la moyenne des différents allongements mesurés sur le pourtour de l'éprouvette qu'on aura le soin d'équiper de plusieurs extensomètres ou de plusieurs jauges. [2]

I.6 Mesure du déplacement

La mesure du déplacement peut se faire de deux façons : soit en mesurant le déplacement de la traverse, soit en plaçant un dispositif de mesure sur la section utile de l'éprouvette. Les mesures peuvent atteindre une précision d'environ 1 à 0,1 μm avec les dispositifs les plus sensibles. [2]

I.6.1 Déplacement de la traverse

Cette méthode de mesure implique l'ensemble de l'éprouvette, et donc des zones où l'uniaxialité de la contrainte n'est pas vérifiée, ce qui introduit une erreur dans la mesure. En outre, lorsque le déplacement est évalué directement grâce à celui de la traverse, la raideur de la machine intervient dans les résultats de déformation obtenus : elle se comporte comme un ressort de raideur K (N/m) en série avec l'éprouvette. Si la force mesurée par la cellule de charge est F , V le déplacement de la traverse ou du vérin, L_0 la longueur initiale de l'éprouvette et ε la déformation. [2]

$$L/L_0 + F/(KL_0) = V/L_0 \quad (1.1)$$

Si K est grand, il est clair que la déformation mesurée est proche de celle du matériau testé : il faut donc disposer d'une machine aussi raide (ou "dure") que possible. Plus la machine sera molle, plus les résultats différeront du comportement vrai du matériau, au point de masquer des phénomènes comme des chutes de la charge. [2]

I.6.2 Extensomètres

Un extensomètre est un dispositif permettant de mesurer le déplacement directement sur la partie utile de l'éprouvette (i.e. où l'état de contrainte est homogène). Cela permet de s'affranchir de la raideur de la machine et des effets de triaxialité, et d'obtenir une mesure plus précise que par la mesure du déplacement de la traverse. Il existe deux types d'extensométrie : avec ou sans contact ; on choisira l'une ou l'autre selon les conditions expérimentales. Il est possible également de mesurer la variation de section d'une éprouvette pour évaluer l'effet Poisson [2].

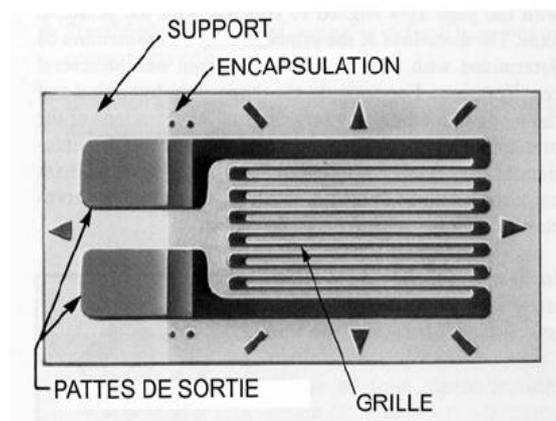


Figure I.7 : Jauge de contrainte

La jauge de contraintes est longtemps restée et reste une méthode de choix pour mesurer les déformations à la surface des matériaux. Mais l'émergence des techniques optiques a changé la donne. Ces dernières années, c'est le cas en particulier de la corrélation d'images numériques, la méthode de la grille. Ces méthodes offrent une vision globale et sans contact des déformations à la surface de tout type de matériau. Ces méthodes n'utilisent pas de laser ou de montage optique complexe : pour corréler des images, il suffit d'utiliser deux caméras numériques et un logiciel d'analyse.

Quelques travaux réalisés par différents auteurs seront détaillés dans les paragraphes qui suivent.

I.6.3 Les travaux réalisés avec les extensomètres

Romain Vilain [8] s'est penché sur la conception et les essais d'un capteur de contraintes pour de la glace. Pour cela, un concept de capteur issu des techniques employées pour des forages a été adapté. Romain Vilain s'est inspiré des capteurs appelés « doorstopper », pour les raisons que

ce dernier pénètre très peu dans la glace et ne modifie que très peu le champ des contraintes sur une très faible profondeur. On pose donc l'hypothèse que le doorstopper ne perturbe pas le champ de contraintes de la glace et que son facteur d'inclusion est 1. (Un facteur d'inclusion pour chaque capteur est le rapport entre la pression de la glace non perturbée et celle ressentie par le capteur). Romain Vilain a construit une première version sur ce capteur, dont les essais et les connaissances acquises permettraient de réaliser une deuxième version éventuellement exploitable sur le terrain. [8]

I.6.3.1 Conception du capteur

Le capteur en lui-même se compose de deux parties fondamentales : une pièce métallique (le pendant du palet du doorstopper) qui subit les efforts de la glace dans laquelle elle sera insérée, et une partie électronique composée de fils électriques, de jauges résistives et de résistances (les jauges de contraintes du doorstopper). La partie électronique est collée sur la pièce métallique, et permet d'en mesurer ses déformations. La mesure des déformations se voit donc essentiellement limitée par la capacité de transmettre et d'amplifier les déformations de la partie métallique insérée dans la glace. [8]

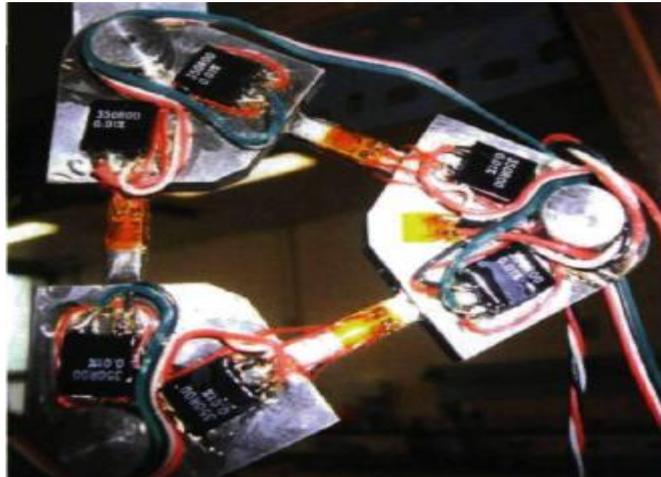


Figure I.8 : Capteur et jauges [8]

Tout le calcul de dimensionnement repose sur l'hypothèse que chaque « côté » du triangle travaille en traction/compression, et de façon quasi indépendante l'un de l'autre. Dans cette hypothèse, chaque jauge ne mesure donc que les efforts qui lui sont soumis dans sa direction et le cas de figure dimensionnant est celui où l'effort de la glace est unidirectionnel et dirigé dans l'axe d'une des jauges.

La pièce se compose d'un triangle qui sert de support des jauges et qui récupère les contraintes de la glace, et de trois pattes qui permettent l'insertion de la pièce dans la glace. La pièce métallique

doit pouvoir amplifier les contraintes recueillies, il a donc fallu amplifier la déformation au niveau des jauges. Pour cela les déformations ont été concentrées au niveau des jauges résistives, en intercalant une partie « fine » au milieu de deux parties « épaisses »

Les parties « épaisses » sont beaucoup plus massives que les parties « fines », par conséquent elles ne subiront pratiquement aucune déformation comparativement aux parties « fines ». Toute la déformation de la glace entre deux pattes va donc se retrouver sur la partie « fine » entre deux pattes.

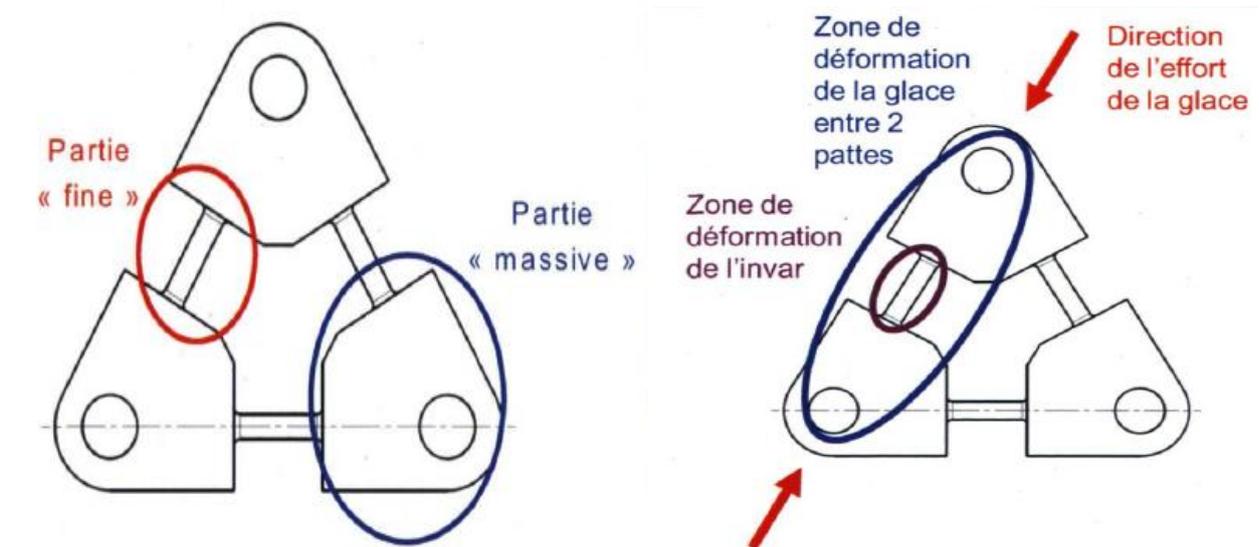


Figure I.9 : Schéma des parties du capteur et Zones de déformation [8]

I.6.3.2 L'étalonnage du capteur

Grâce à sa petite taille, le capteur a été chargé en y suspendant des poids sur une patte. Cette méthode est beaucoup plus simple qu'une mise sous presse et permet de faire les essais rapidement avec peu de matériel

Le capteur a été testé dans deux positions, et toutes les branches ont été testées pour vérifier ce comportement. Un montage simple a été réalisé, avec des plaquettes trouées et des crochets. La principale difficulté consiste à faire travailler le capteur en traction pure, en introduisant aussi peu de flexion que possible, pour bien représenter l'état de contrainte auquel serait soumis le capteur dans un couvert de glace. Pour ce faire, des plaquettes trouées au diamètre des pattes ont été fabriquées, pour se fixer au capteur et y suspendre les poids. Ces plaquettes étaient maintenues par une bande de ruban adhésif, et étaient libres de rotation autour des pattes. Une charge totale de 2 kg a été appliquée par paliers de 200g. Pour l'essai d'hystérésis, cette même charge a été retirée par paliers de 200g.

I.6.3.3 Résultats des essais d'étalonnage

Romain vilain a mesuré des valeurs de résistance des jauges de contrainte qui sont dans un état donné. Par conséquent lors de la lecture à vide, il mesure une valeur non nulle de la résistance de la jauge.

Pour les mesures dans la glace, il réalise une différence entre les lectures après et avant forage, cette valeur non nulle à vide n'intervient donc pas dans les calculs. Pour faciliter la lecture, les courbes d'étalonnage sont présentées avec les valeurs mesurées moins la valeur à vide. [8]

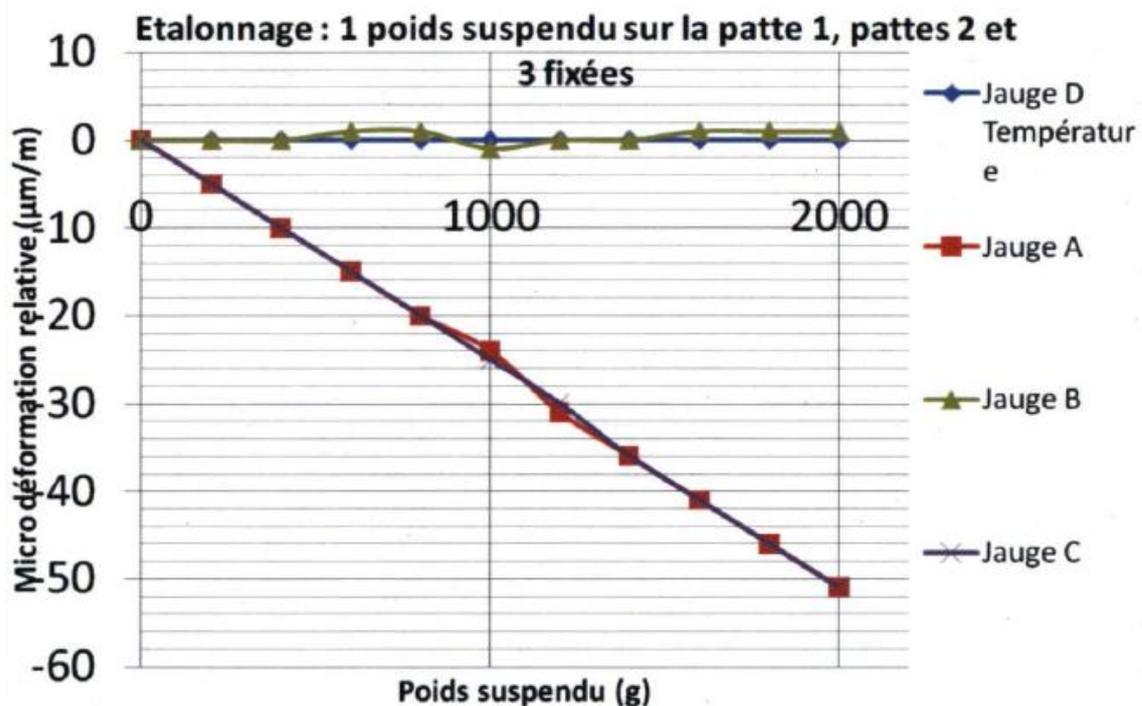


Figure I.10 : Résultats de l'étalonnage [8]

Le capteur a bien fonctionné et les mesures reflètent le comportement attendu : linéarité et absence d'hystérésis. La traction d'une patte ne semble pas créer d'effort dans les autres pattes, et aucun comportement particulier n'est à relever. [8]

Après l'étalonnage du capteur des essais sur de la glace ont été menés comme suite :

Les premiers essais ont été des essais de comportement du capteur. Il s'agissait de tests en chargement-déchargement par paliers. Le capteur a été placé dans un bloc de glace sans qu'aucun effort ne soit appliqué. Une charge est ensuite appliquée sur le capteur, de façon croissante par palier, puis cette charge est enlevée à nouveau par paliers jusqu'à la valeur de chargement initiale.

La durée des paliers est fixe (3 à 5 minutes selon l'essai) et les valeurs sont mesurées 1 minute après l'application de chaque palier les résultats de l'essai sont montrés dans la figure I.11

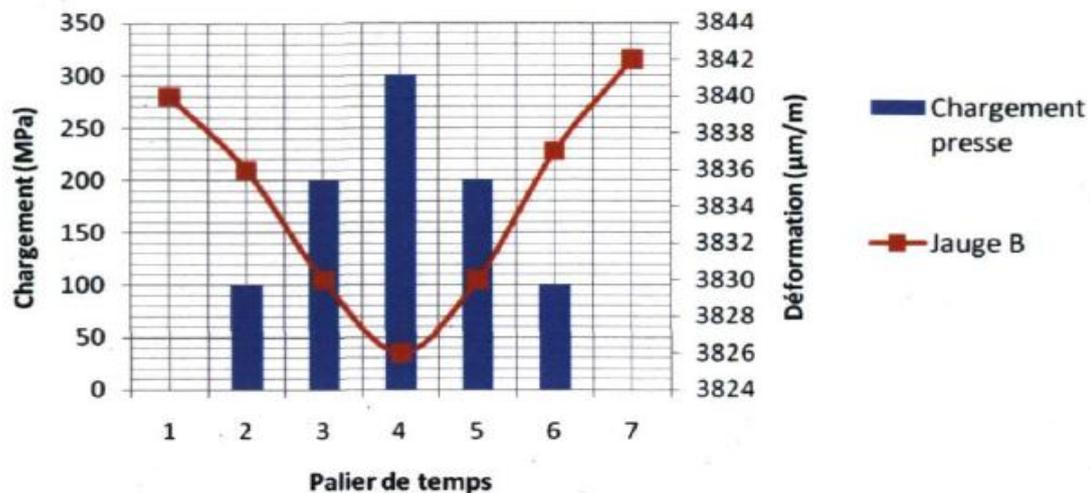


Figure I.11 : Résultats de l'essai chargement-déchargement [8]

Les résultats obtenus pour cet essai ne sont pas satisfaisant, il constate qu'une jauge donne une réponse convenable en chargement-déchargement : une variation presque linéaire avec la contrainte, et un faible hystérésis sur la courbe de progression de la déformation. Cela confirme ce qui a été observé pour l'étalonnage avec une réponse assez fidèle du capteur à la contrainte, même dans la glace.

Pour les autres jauges, le comportement est beaucoup plus erratique et ne permet pas de conclure sur les déformations mesurées. D'après les mesures faites sur quelques essais, la déformation ne fait qu'augmenter, avec une réponse linéaire. A ce stade et vu le peu de données recueillies, il n'est pas possible de conclure sur ce problème. Ces résultats sont tout de même présentés car ils peuvent servir pour la conception de la deuxième version du capteur.

I.7 Nouvelles méthodes de mesure de la déformation

Les méthodes de mesure de champs sans contact connaissent une grande effervescence depuis une dizaine d'année. En effet, la diminution du coût du matériel nécessaire (ordinateurs et caméras CCD) ainsi que l'augmentation des puissances de calcul ont permis leur développement dans de nombreux domaines d'ingénierie.[3]

Ces techniques de mesure de champs sans contact donnent accès à des champs de déplacements, de déformations ou de températures en surface d'échantillons soumis à des essais

mécaniques. Ces nouveaux moyens de mesure, de part la grande richesse des informations qu'ils délivrent, renouvellent de très nombreux aspects de la mécanique expérimentale des solides.

I.7.1 Méthode de corrélation d'images

La méthode de corrélation d'images a été développée au début des années 80. Cette méthode de mesure de champs a largement diffusée au sein de la communauté de la mécanique expérimentale. Le principe de cette technique consiste à corréler deux images grâce aux variations de texture de la surface de l'objet observé. Pour cela, un motif aléatoire est utilisé (voir la Figure 1.8), de type mouchetis de peinture, qui fournit le codage nécessaire à la surface pour permettre ensuite la corrélation. [3]

Dans certains cas, une préparation de la surface est nécessaire. Pour que la mesure soit réalisable, il faut en effet que les images comparées présentent une répartition de points particulière. Les textures aléatoires répondent parfaitement à ces critères. Un certain nombre de matériaux tels que des ciments sont donc utilisables directement, sans préparation. Mais dans d'autres cas, la surface est trop homogène pour réaliser une mesure par corrélation. La plupart du temps, il faut alors projeter une peinture blanche, puis pulvériser un léger voile de peinture noire sur la surface étudiée. On obtient ainsi un mouchetis composé de points plus ou moins gros répartis de manière aléatoire (on parle de répartition stochastique). [5]

Le contraste et la texture ainsi, crée influe directement sur la qualité de la mesure. Une autre précaution à prendre : étalonner les caméras. Ce n'est qu'à cette condition que l'on peut obtenir une vision binoculaire de l'objet et réaliser une mesure 3D. L'étalonnage consiste à "faire connaître" au logiciel tous les paramètres du système optique utilisé. Ces paramètres sont mesurables automatiquement en utilisant une mire (cible) d'étalonnage spécifique. De 5 à 10 paires d'images de la mire orientée selon différentes positions dans l'espace suffisent au logiciel pour déterminer l'angle entre les deux caméras, la distance focale et la distorsion de l'optique. Le logiciel opère alors dans un repère 3D connu et sans distorsion. [3]

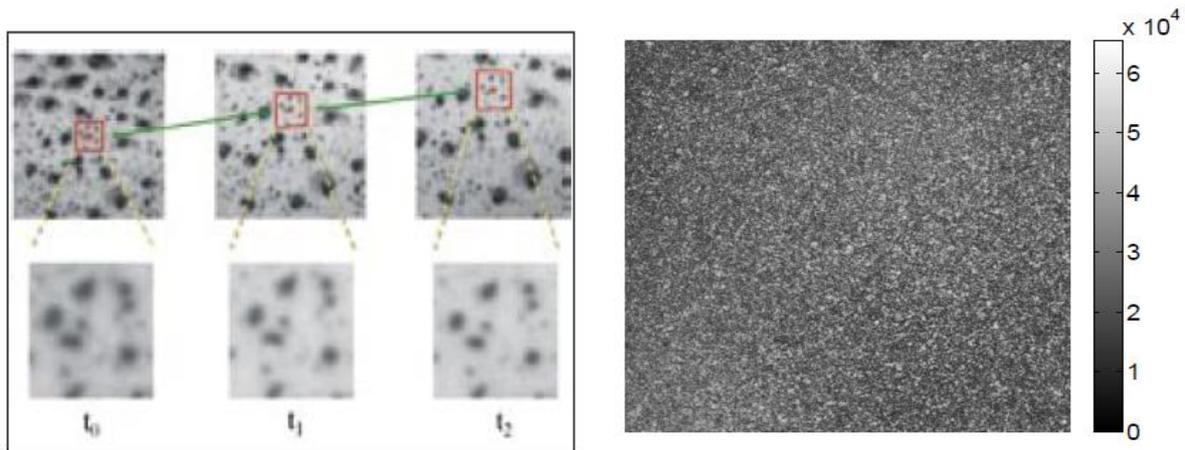


Figure I.12 : Codage aléatoire d'une surface [5]et[3]



Figure I.13 : La méthode de corrélation d'image [5]

La comparaison des deux images s'effectue en appariant des points homologues par maximisation d'une corrélation calculée sur un voisinage autour de ces points. Le motif aléatoire rend possible la reconnaissance des points homologues les uns par rapport aux autres (sauf pour un marquage de grille où un algorithme adapté doit être utilisé). La recherche du maximum de la corrélation est traitée numériquement. [5]

Avec souvent une interpolation des niveaux de gris afin d'atteindre des performances sub-pixel, une fois les coordonnées des points homologues identifiées, les déplacements sont évalués par différence et les déformations locales par dérivation discrète.

Les principaux avantages de la corrélation d'images numériques sont les suivants :

- une préparation particulière de l'éprouvette est inutile si le marquage existe naturellement sur la surface de l'éprouvette. Sinon, ce marquage s'effectue facilement, par exemple en projetant un mouchetis de peinture sur la surface peinte préalablement en blanc. C'est sans doute cet aspect de la méthode qui l'a rendue populaire.
- c'est une méthode en lumière blanche. Un simple éclairage et une caméra CCD suffisent à la mettre en œuvre si la surface de l'éprouvette convient pour le traitement ;
- la précision de la mesure est le sub-pixel grâce à l'utilisation des algorithmes d'interpolation de la fonction d'inter-corrélation.

I.7.2 Méthode de la grille

La méthode de la grille repose sur un codage périodique de la surface étudiée. Ce codage est le plus souvent composé de lignes unidirectionnelles ou croisées (voir Fig :I.14). C'est une technique en lumière blanche. L'obtention de ce codage se fait en pratique par le transfert d'une grille. Les grilles peuvent aussi être photolithographiées à une échelle plus petite. Le principal avantage de cette méthode repose sur le fait que ce codage est connu a priori et périodique, ce qui permet la mise en œuvre de techniques fondées sur l'analyse de Fourier pour le traitement.

La méthode consiste à suivre le déplacement des lignes de la grille qui est solidaire de l'éprouvette testée. Ce suivi s'effectue en pratique avec une caméra numérique. [3]

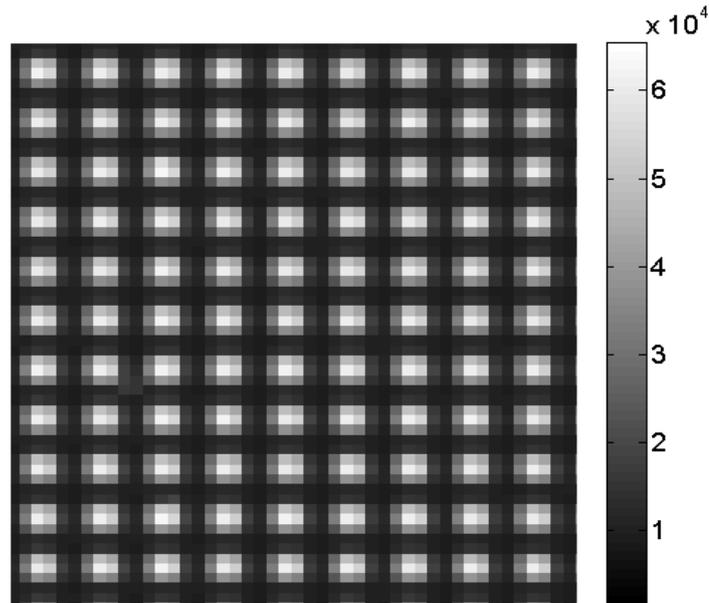


Figure I.14 : Grille croisée [3]

Supposons que la grille suive fidèlement les déplacements et les déformations du substrat sur lequel elle est déposée. La grille joue alors le rôle d'une porteuse spatiale ayant un vecteur fréquence spatiale $\vec{F} = \vec{n}/p$, où \vec{n} est le vecteur unitaire normal aux traits et p est la période (le pas) de la grille. L'intensité $s(M)$ réfléchi au point M de coordonnées (X, Y) par cette grille dans l'état initial non déformé peut être décrite par :

$$s(M) = A[1 + \gamma \text{frng}(2\pi \overrightarrow{OM} \cdot \vec{F})] \quad \text{I.3}$$

A représente l'intensité moyenne et γ le contraste de l'intensité $s(M)$. La fonction *frng* est une fonction 2π périodique. Le déplacement du point M de la structure étudiée est décrit mathématiquement par le champ de déplacements $\vec{u}(M)$: Une particule matérielle située au point géométrique M sera emmenée au point (M') à l'état final. Ainsi, l'intensité $s(M')$ réfléchi par la grille déformée dans l'état final.

$$s(M') = A[1 + \gamma \text{frng}(2\pi \overrightarrow{OM} \cdot \vec{F} + 2\pi \vec{u}(M) \cdot \vec{F})] \quad \text{I.4}$$

$$s(M') = A[1 + \gamma \text{frng}(2\pi \overrightarrow{OM} \cdot \vec{F} + \Phi(M))] \quad \text{I.5}$$

Avec

$$\Phi(M) = 2\pi \vec{u}(M) \cdot \vec{F} \quad \text{I.6}$$

Dans le cas d'une grille croisée, les modulations de phase suivant les directions x et y s'écrivent de manière analogue. La composante suivant la direction x s'écrit :

$$\Phi_x(M) = -\frac{2\pi}{p_x}u_x(M) \quad \text{I.7}$$

La composante suivant la direction y s'écrit :

$$\Phi_y(M) = -\frac{2\pi}{p_y}u_y(M) \quad \text{I.8}$$

P_x et P_y représentent les pas de la grille utilisée suivant les directions x et y respectivement.

$u_x(M)$ et $u_y(M)$ représentent les composantes du champ de déplacements suivant les directions x et y. Ces composantes sont donc proportionnelles à la phase qui apparaît lorsqu'un déplacement qui se produit en surface. Le principe de la méthode de grille est donc de transformer le champ de déplacements en une modulation de phase de la porteuse. [3]

I.8 Quelques travaux de recherche réalisés avec les nouvelles méthodes de calcul de déformations.

I.8.1 calcul de la déformation avec la méthode de la grille

C.BADULES et J.D.MATHIAS, ont fait un calcul direct de déformation par traitement d'images de grille sans dérivation du déplacement. Ils ont aussi procédé à la correction des défauts de la grille due à la variation du pas de la grille et au système optique d'acquisition des images (bruit capteur, effet du mouvement hors plan, poussière sur le capteur CCD, etc). Ils ont ainsi comparée les résultats obtenus avec d'autres méthodes classiques (éléments finis) de calcul des déformations par dérivation du déplacement. Ils ont appliquée cette méthode à divers exemples d'application, dont la translation, la traction sur une éprouvette parallélépipédique en aluminium et de la traction sur une éprouvette trouée. [4]

I.8.1.1 Correction des défauts de la grille

a) Essai de translation

Pour quantifier la déformation fictive due à la variation du pas de la grille et voir l'effet bénéfique de cette compensation du mouvement entre images finale et initiale, un essai de type translation a été réalisé sur une éprouvette équipée d'une grille [4]. L'essai de translation a été réalisé sur une éprouvette en aluminium. La grille est unidirectionnelle de pas égal à 200 micron

(5 traits/mm). La caméra encode chaque période sur 5 pixels. L'écart-type de la gaussienne vaut $\sigma = 5$ pixels, ce qui conduit à une résolution spatiale en déformation (considérée ici égale à $\pm 3 \sigma$) égale à 30 pixels.

Pour ce type d'essai, la solution de référence en déformation est connue puisqu'elle est rigoureusement nulle. En fait, toutes les variations du champ de déformation autour de cette valeur nominale, susceptibles d'être observées, sont dues à des défauts de la grille et au système optique d'acquisition d'images.

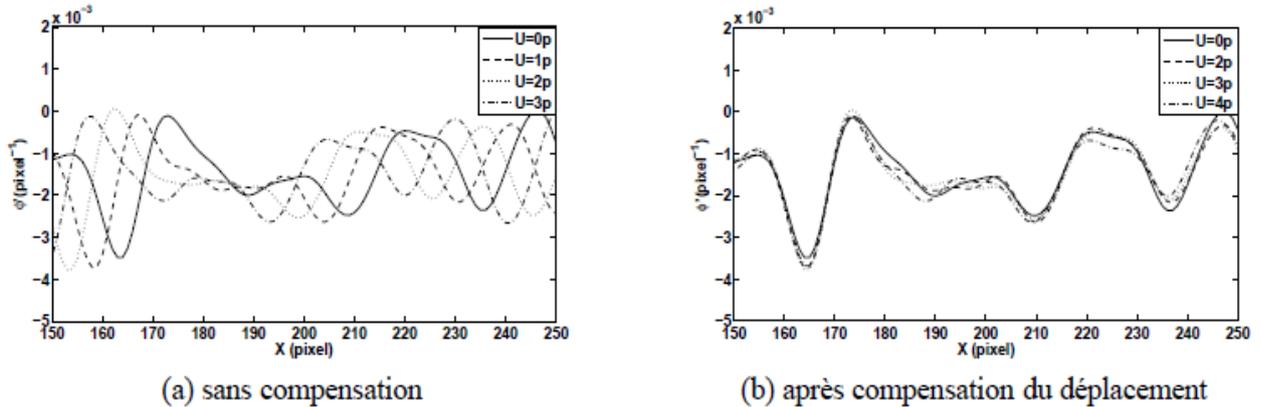


Figure I.15 : Exemple de dérivées de phase pour plusieurs valeurs du déplacement [4]

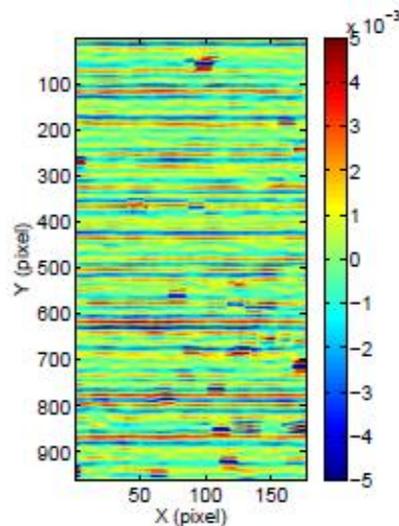


Figure I.16 : Déformations fictives dues à la variation du pas de la grille [4]

b) Essai de traction

Le deuxième essai qui est l'essai de traction a été réalisé avec une machine de traction Zwick/Roel qui développe une charge maximale de 20 kN. L'éprouvette considérée est en aluminium. Elle est équipée d'une grille 1D dont les traits sont perpendiculaires à la direction de chargement. Sa section est de $30 \times 2 \text{ mm}^2$ et l'effort appliqué est de $F = 10 \text{ kN}$. La carte de déformation pour cet essai est représentée sur la Figure I.17(a).

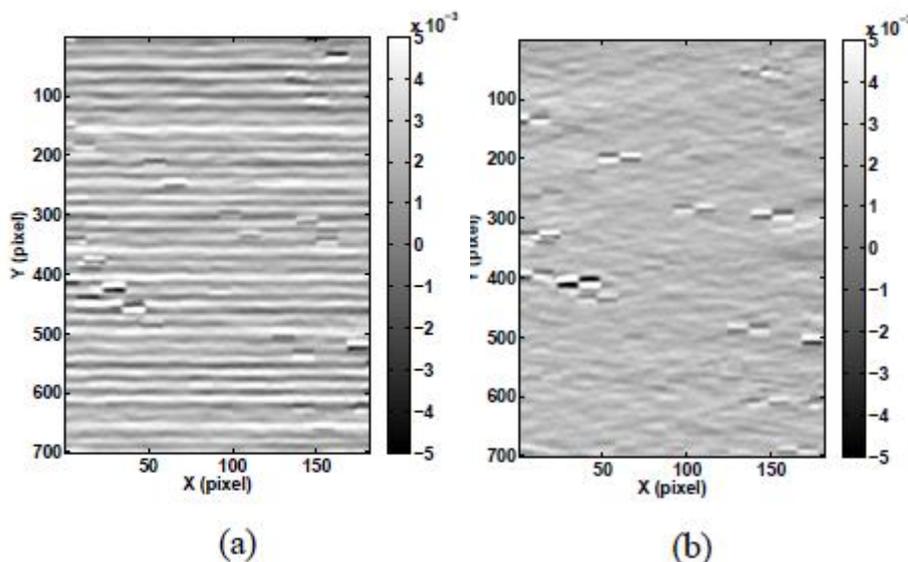


Figure I.17 : Champ de déformation, essai de traction sur une éprouvette en aluminium.[4]

Des franges parasites dues aux variations de p sont présentes sur la carte des déformations. L'effet de la correction est bien visible sur la Figure I-17 (b)

De plus, le champ de déformation corrigée est proche d'un champ homogène constant. La valeur moyenne sur le champ de déformation vaut « $\epsilon_{\text{moyenne}} = 2,30\text{E} - 3$ » ils ont constaté qu'elle est très proche de la valeur attendue qui est de $2,25\text{E} - 3$. Cette dernière valeur est obtenue à partir de la connaissance de l'effort appliqué, de la section de l'éprouvette et du module d'Young de l'aluminium. [4]

L'objectif de leur travail est dans un premier temps, le calcul direct de la déformation sans calcul préalable du déplacement. Dans un deuxième temps, différents essais ayant montré que certains défauts de la grille provoquent l'apparition de déformations fictives, ces dernières sont caractérisées et soustraites des déformations mesurées pour obtenir la déformation réelle [4]. Ils

ont montré que cette procédure, associée avec le calcul direct de la déformation, conduit à un outil efficace pour la détermination précise des champs de déformation.

c) Le Calcul direct de la déformation sans calculer le champ de déplacement

Afin d'effectuer leur calculs sans préalablement calculer le champ de déplacement, ils ont procédé de la manière suivante en utilisant la modélisation d'une frange fournie par l'un des systèmes de mesure à codage périodique qui s'écrit [4] :

$$s(x) = A[1 + \gamma \cdot \text{frng}(2\pi f x + \Phi)] \quad \text{I.9}$$

A représente l'amplitude de signal $s(x)$, γ est le contraste, frng est une fonction périodique de période 2π , f est la fréquence de la porteuse qui est calculée comme l'inverse du pas de la frange et Φ la phase modulée qui est directement liée au déplacement par la relation suivante [4]:

$$\Delta\phi = -\frac{2\pi}{p} * u \quad \text{I.10}$$

$\Delta\phi$ Représente la variation de phase. En général, la déformation est calculée à partir du déplacement en utilisant la méthode suivante :

- les cartes de phase associées aux images initiale et finale sont calculées. Divers algorithmes présentés dans la littérature peuvent être utilisés ;
- la différence des deux cartes de phases (finale et initiale) est effectuée et le déplacement en est déduit (voir l'équation (I.10) ci-dessus) ;
- le champ de déplacement est filtré ou lissé ;
- il est ensuite dérivé numériquement pour obtenir le champ de déformation.

Les deux dernières étapes peuvent être fusionnées à l'aide d'un filtre dérivateur. [4]

d) Calcul direct de la déformation

Pour des raisons de simplicité et de concision, le calcul ci-dessous est développé dans le cas unidirectionnel. En utilisant l'équation (I.11) et en calculant les dérivées de la phase pour les images initiale et finale et en les soustrayant [4] :

$$\varepsilon = -\frac{p}{2\pi} * \Delta\phi' \quad \text{I.11}$$

Ils ont fait des comparaisons pour des images simulées entre la méthode proposée et des méthodes classiques qui montrent l'efficacité de l'approche proposée. [4]

Une procédure de calcul direct de la déformation à partir d'images de grilles a été présentée. Elle intègre une dérivation directe du champ de phase et une compensation du mouvement rendue nécessaire par les défauts de grille. Il en résulte une diminution importante des déformations fictives dues aux défauts de la grille. L'efficacité de la méthode proposée a été mise en évidence à travers deux essais : de translation, de traction sur une éprouvette parallélépipédique en aluminium. Dans le derniers cas, les champs de déformations obtenus sont très proches des champs attendus en théorie.

I.8.2 Calcul de la déformation avec la méthode de corrélation d'image

Ces nouvelles méthodes optiques sont aussi appliquées sur des matériaux composites, c'est le cas de T. BEN MBAREK et L. ROBERT qui ont étudié le comportement en traction de composites fibre de bois/polyéthylène (WPC) avec et sans additif en utilisant des mesures de champs par stéréo-corrélation d'images numériques. Les valeurs de déformation macroscopique mesurées sont comparables à celles obtenues par extensométrie mécanique classique. Le module d'Young est évalué sur un modèle de Maxwell-Binhgam ajusté sur les courbes expérimentales. D'autre part, ils ont analysé le comportement endommageable de WPC à 30% de bois et le degré d'hétérogénéité pour différents pourcentages de bois à l'aide des valeurs de l'écart type spatial du champ de déformation longitudinale.[6]

Les essais de traction ont été effectués sur une machine électromécanique Instron 5800R avec une vitesse de déplacement de la traverse de 2 mm/min. Trois éprouvettes (norme ISO 527-2 / éprouvette de forme de type (1A) ont été testées pour chaque formulation. La dimension des éprouvettes est 20x4x150 mm³. [6]

Les éprouvettes sont texturées par projection de peinture (mouchetis blanc sur fond noir) car le contraste d'image dû aux fibres de bois dans la matrice PEHD n'est pas suffisant. Les images sont prises à l'aide d'un banc stéréoscopique constitué de deux caméras CCD QICAM (Qimaging) de résolution 1360x1036, 8 bits, munies d'objectifs Nikon 50 mm ouverture 11, à une fréquence d'acquisition de 1 image/2s. Le calibrage et le traitement d'images est fait avec le logiciel Vic 3D™ (Correlated Solutions Inc., 2007) à l'aide d'une mire d'étalonnage (méthode d'optimisation globale, erreur de calibrage de l'ordre de 0,05 pixels). Pour la corrélation et le calcul des déformations et pour tous les essais, les paramètres choisis sont : fenêtre de corrélation

de 19x19 pixels, facteur d'échelle de 16,1 pixels/mm d'où résolution spatiale en déplacement de 1,18 mm et résolution spatiale en déformation (taille de jauge) de 1,5 mm.

La méthode de stéréo-corrélation est utilisée lors d'essais de traction à température ambiante sur des éprouvettes de composite fibre de bois/polyéthylène pour les formulations avec ou sans additif et à 10% ou 30% de bois. La valeur de la déformation considérée est la valeur moyenne du champ mesurée. Les courbes de traction illustrées figure I.18 indiquent un comportement global non linéaire.

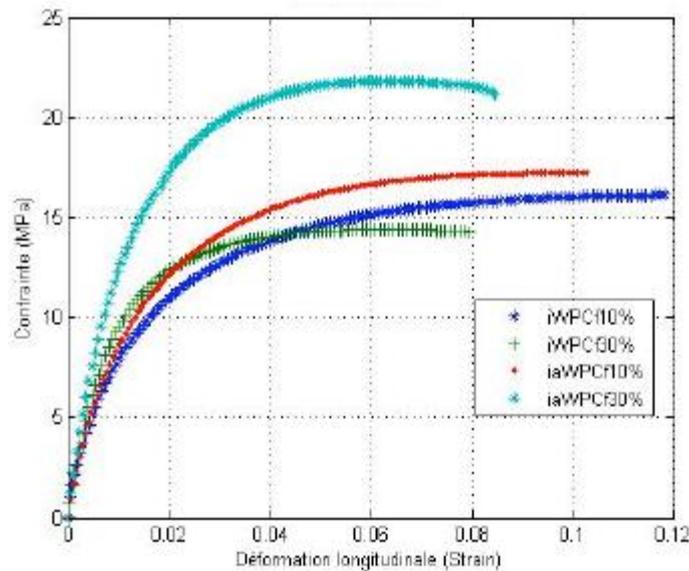


Figure I.18 : Courbes de traction de iWPCf et iaWPCf [6]

Les propriétés physiques des iWPCf et iaWPCf déterminées à partir des courbes de traction obtenues par stéréo-corrélation sont données dans le tableau I.1

% fibre de bois	iWPCf		iaWPCf	
	10%	30%	10%	30%
MOE (MPa)	980 (14)	1709 (100)	1137 (26)	1762 (27)
MOR (MPa)	15,6 (0,4)	13,6 (0,7)	16,4 (0,6)	21 (0,3)

Tableau I.1 : module de Young évalué par la tangente à l'origine d'un modèle de Maxwell-Bingham $\sigma = a(1 - \exp(-b\epsilon))$ ajusté par optimisation sur les courbes expérimentales. (les valeurs entre parenthèses représentent l'écart type) [6]

Ils ont observé que le module élastique (MOE) croît avec l'augmentation du pourcentage de bois pour les deux cas (iWPCf et iaWPCf), ainsi qu'avec l'additif (MAPE), qui confère au composite le plus fort module. D'autre part, Le module à la rupture (MOR) de l'iWPCf (sans additif) décroît avec l'augmentation du pourcentage de bois, par contre il croît de 16.4 MPa pour iaWPCf10% et jusqu'à 21 MPa pour iaWPCf30% [6]. Ils expliquent l'augmentation de (MOR) par une certaine modification des paramètres au cours du processus d'injection, et ils pensent que ceci ne contredit pas la tendance générale [6]. En fait, les résultats d'injection sont en accord avec les résultats trouvés par N. Stark and M. Berger (1997). Les résultats des mesures de déformation par stéréocorrélation d'images sont comparables à ceux obtenus par extensomètre mécanique sur les mêmes matériaux et publiés dans « F. Hugot, F. Michaud and G. Cazaurang (2007) Interface behaviour of Moulded Natural Fibre Composite » [6].

I.8.3 calcul de la déformation avec la méthode de moiré

Fabrice Brémand et son équipe de l'université de Poitiers ont réalisé une étude sur la possibilité de mesurer par des méthodes optiques, des grandeurs mécaniques sur des matériaux biologiques. Leur but est de déterminer les caractéristiques mécaniques des organes humains pour ensuite les modéliser en vue de réaliser des simulations numériques pour pouvoir créer des organes artificiels plus proches de la réalité. Pour ce faire ils ont exposés une méthode qui mesure le relief, une autre méthode qui mesure un champ de déplacements et une autre un champ de déformations.

La mesure de relief par moiré de projection, est appliquée sur un os possédant des différences de relief brutales. Cette technique consiste à projeter un réseau de traits parallèles, à l'aide d'un vidéo-projecteur, sur un écran plan, puis à la surface de l'objet. Ils enregistrent à l'aide d'une caméra CCD, dans une direction différente, une image du plan appelée image de référence. Quand l'écran est enlevé ils peuvent observer une image de l'objet et le décalage de franges entre les deux images $\Delta\phi(x)$. Ils ont obtenu un bon résultat sous forme de maillage [7].



Figure I.19 : Relief complet de la partie distale du tibia. [7]

La mesure de déformation par suivi de marques

Fabrice Brémand et son équipe ont effectués des essais en traction simple sur quatre éprouvettes taillées dans la même partie de la peau, d'origine animale. Cette méthode consiste à suivre le centre de gravité des marqueurs qui se trouvent à la surface de l'éprouvette, elle permet dans ce cas de mesurer les déformations ponctuelles dans le plan. Ils ont trouvés que cette méthode est satisfaisante, puisqu'ils ont obtenue des courbes peu bruitées qui ne donnent pas des résultats aberrants.

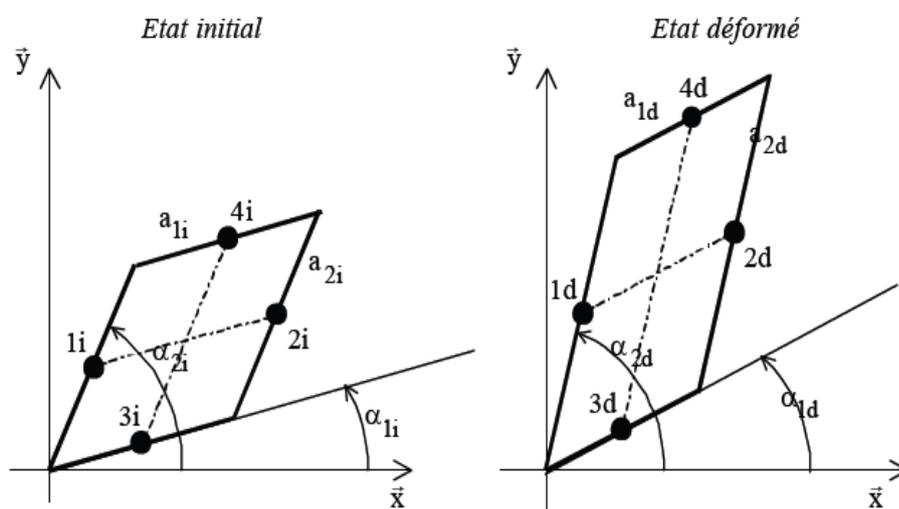


Figure I.20 : Schéma de principe de déformation d'un parallélogramme élémentaire. [7]

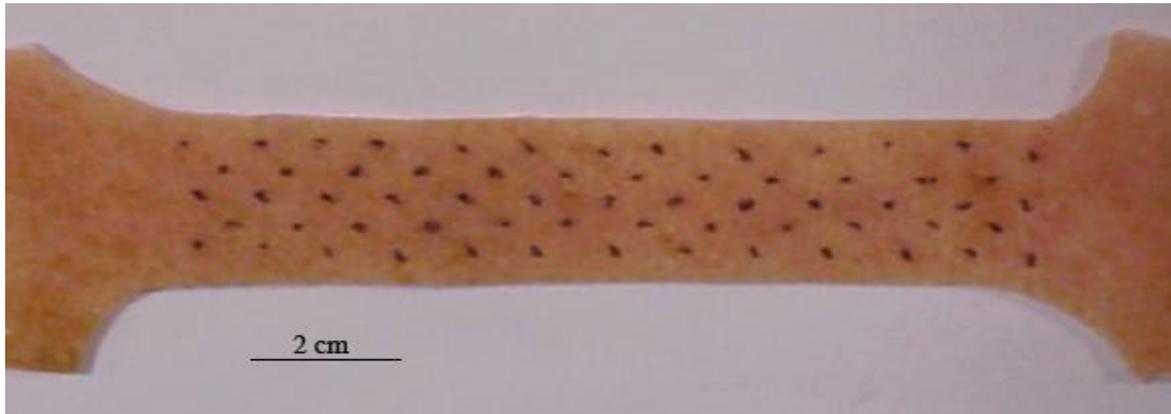


Figure I.21 : Éprouvette avec un champ de marqueurs. [7]

En ce qui concerne la méthode optique de déplacement. La corrélation permet de mesurer les translations planes d'un objet qui ne change pas de forme entre deux états de sollicitation. Elle s'applique sur un champ de granularité. Comme l'éprouvette déformée ne présente pas les mêmes déplacements en chaque point, il faut donc diviser l'image en petites zones décalées les unes par rapport aux autres, appelées « *fenêtre de corrélation* ». Le déplacement est alors représenté au centre de la fenêtre de corrélation qui lui est associé. Le champ de déformation s'obtient par dérivation.

Ils ont pu voir que dans le cas de petits déplacements (T1 à T3), cette technique fonctionne correctement. Mais lorsque la surface du matériau subit des déplacements de grande amplitude, la méthode de corrélation est mise en défaut, comme le montrent les graphiques des vecteurs déplacements de la **figure I.22** aux instants T5 et T6.

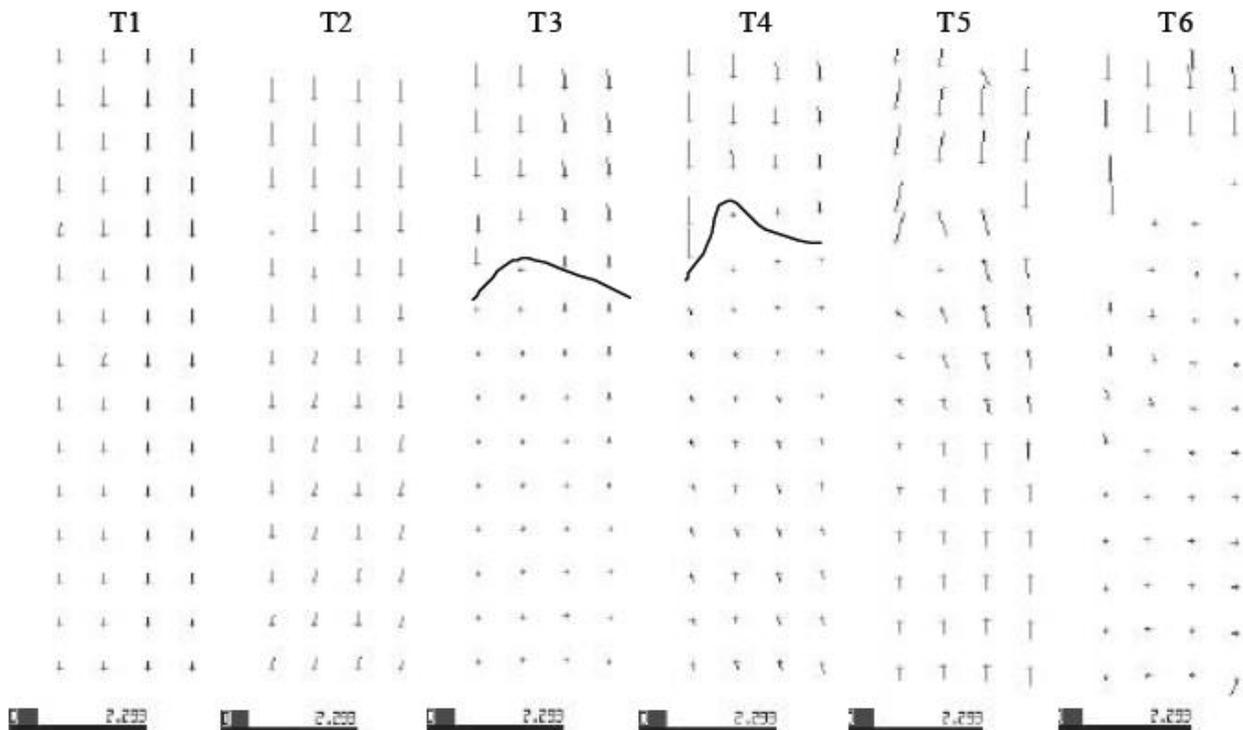


Figure I.22 : Résultats obtenus par la corrélation sur la peau d'origine animale

Ils obtiennent des points pour lesquels le déplacement est indéterminé ou erroné, cette technique est donc sensible au problème qui apparaît lorsque les deux images qu'ils doivent comparer ne peuvent se déduire l'une de l'autre par une translation. Il y aura apparition de ce problème lorsqu'il y aura entre deux états : une modification importante de l'intensité lumineuse, une translation hors plan, une rotation suivant l'axe d'observation, une rotation hors plan ou une grande déformation.

Après un bilan des méthodes optiques de mesure, ils ont montré que ces méthodes optiques qui sont des méthodes sans contacts, donc non perturbatrices, leur précision et leur processus de calcul semi-automatique sont des méthodes qui peuvent être utilisées pour la mesure des caractéristiques mécaniques des matériaux biologiques.

I.9 Conclusion

Depuis quelque temps, il y'a une tendance très nette de l'utilisation des méthodes optiques dans les laboratoires de recherche. Ces méthodes optiques connaissent aussi un essor considérable dans le domaine industriel. Les lasers et les caméras concurrencent désormais les traditionnels

capteurs à contact dans une très large variété d'applications, comme dans le cas de la mesure de distances ou de déformations. C'est le cas en particulier de la corrélation d'images numériques et la méthode de la grille. Ces méthodes offrent une vision globale et sans contact des déformations à la surface de tout type de matériau. Par exemple : dans le cas de la corrélation des images, il suffit d'utiliser deux caméras numériques et un logiciel d'analyse pour retrouver le champ des déformations à la surface d'un matériau. Pour preuve, ces dernières années, plusieurs d'entre elles ont quitté les laboratoires de recherche pour faire peu à peu leurs preuves dans l'industrie. Si ces méthodes sont longtemps restées pénalisées par des temps de calcul parfois longs, elles ont su tirer parti des progrès de l'informatique. Il faut dire que ces méthodes ne manquent pas d'attrait. Elles offrent tout d'abord une vision globale (en tout point) et sans contact du champ de déformations à la surface de tout type de matériau et les mesures sont réalisables sur des pièces allant de quelques millimètres carrés à plusieurs mètres carrés, ce qui explique que l'on utilise par exemple la corrélation d'images aussi bien pour mesurer la déformation des dentures de micro-engrenages que pour simuler l'effondrement d'un sol.

Bien que les méthodes optiques offrent un choix considérable, la jauge de contraintes reste une méthode très utilisée que se soit dans les laboratoires ou dans l'industrie, pour mesurer les déformations à la surface des matériaux.

Dans notre cas l'objectif de cette étude est d'utiliser des jauges de contraintes comme capteur de force et capteur de déformation pour l'instrumentation d'une machine de traction et de réaliser des essais de traction sur des éprouvettes plates avec une acquisition des données en temps réel.

Chapitre II : les capteurs et la chaîne d'acquisition

II.1 Introduction

Le capteur est le premier maillon de toute chaîne de mesure, de contrôle ou de régulation et le résultat de l'exploitation judicieuse d'une loi physique. Il est l'organe de saisie de l'information concernant la grandeur à mesurer. Composé, généralement, du corps d'épreuve et de l'élément sensible, il restitue un signal électrique le plus souvent de faible niveau. L'unité de conditionnement assure la mise en forme de l'amplification du signal, elle convertit le signal issu du capteur en une forme transmissible. Cette grandeur de sortie, de nature analogique ou numérique, constitue le signal électrique de mesure. L'automatisation du processus de contrôle et de régulation des capteurs, nécessite l'étude et la détermination des caractéristiques des différents capteurs.

L'**acquisition** se fait par le biais d'un **transducteur**, comme par exemple une jauge de déformation. Le signal mécanique (un allongement) est transformé en signal électrique (une variation de résistance). Le transducteur est conditionné de manière à permettre la lecture de l'information qu'il contient. Dans le cas de la jauge, il s'agit d'un pont de Wheatstone, puis d'une carte d'acquisition. L'ensemble des éléments entrant dans le processus d'acquisition constitue **la chaîne de mesure**.

Ensuite, un **étalonnage** permet de convertir la différence de potentielle en la grandeur mécanique souhaitée (le **mesurande**). Il s'agit d'utiliser un modèle correspondant à la chaîne de mesure ou un étalonnage expérimental si aucun modèle performant n'existe pour convertir la mesure en mesurande. La variation de la grandeur électrique avec la mesure (dérivée de la courbe d'étalonnage) définit la **sensibilité** d'un capteur. Si le capteur est linéaire, la sensibilité est indépendante de la valeur mesurée.

Par définition, un système de mesure n'est jamais parfait, il est essentiel de connaître la **confiance à accorder** à la valeur déterminée pour le mesurande, et pour cela, qualifier la

chaîne de mesure (incertitude, linéarité, gamme de mesure, grandeurs d'influence, durée de vie, temps de réponse, bande passante ...).

Enfin, le **traitement du signal** peut inclure par exemple du filtrage, des transformées de Fourier ou en ondelettes. Un lien dynamique existe parfois entre la sollicitation et l'acquisition. Par exemple, en grandes déformations, le pilotage d'un essai de traction se fait à vitesse de déformation constante et non à vitesse de déplacement constante. Dans ce cas, les principes d'automatisme en boucle fermée doivent être mis en œuvre dans un contexte parfois difficile (par exemple, problème de rupture).

La finalité de l'étude, qui est la mise en regard d'une sollicitation avec son effet, peut se faire sous deux formes : la **présentation** du résultat et une **discussion**, ou une **identification**. Cette dernière est toujours basée sur un **modèle physique exprimable mathématiquement** sous forme de résidu, et elle fait appelle a des **méthodes d'analyse numérique spécifiques**. L'avantage le plus important de l'identification est qu'elle conduit à la connaissance de la valeur d'un ou plusieurs paramètres du phénomène observé, mais cet avantage se paie par un temps de développement et de mise au point des outils numériques et expérimentaux qui peut être très important. En outre, le principal danger est de chercher à identifier avant d'avoir compris et modélisé le phénomène observé.

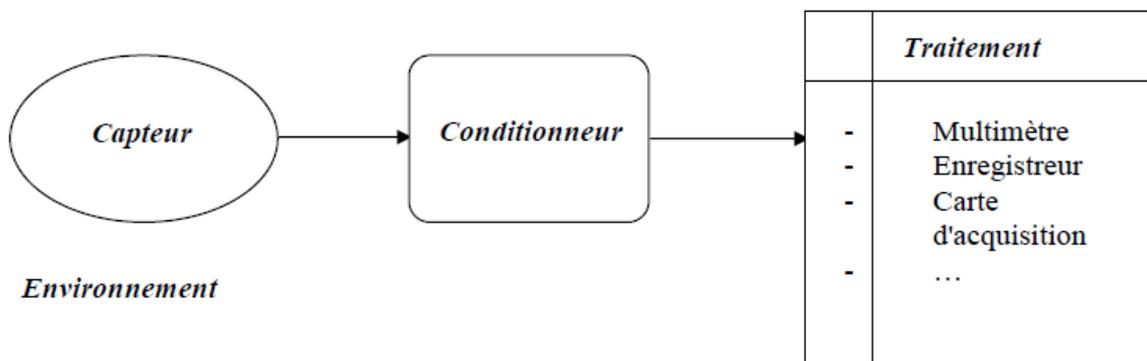


Figure II.1 : Schémas d'une chaîne d'acquisition [18]

L'industriel ou le chercheur, qui veut faire une mesure, doit résoudre des problèmes de choix qui découlent d'un cahier des charges, c'est-à-dire le choix :

- du capteur,
- du conditionneur du capteur,
- du mode de traitement des informations,
- du transport des informations jusqu'au lieu d'exploitation.

II.2 chaîne d'acquisition

II .2 .1 Rôle et construction

Une chaîne d'acquisition recueille les informations nécessaires à la connaissance et au contrôle d'un procédé : elle délivre ces informations sous une forme appropriée à leur exploitation.

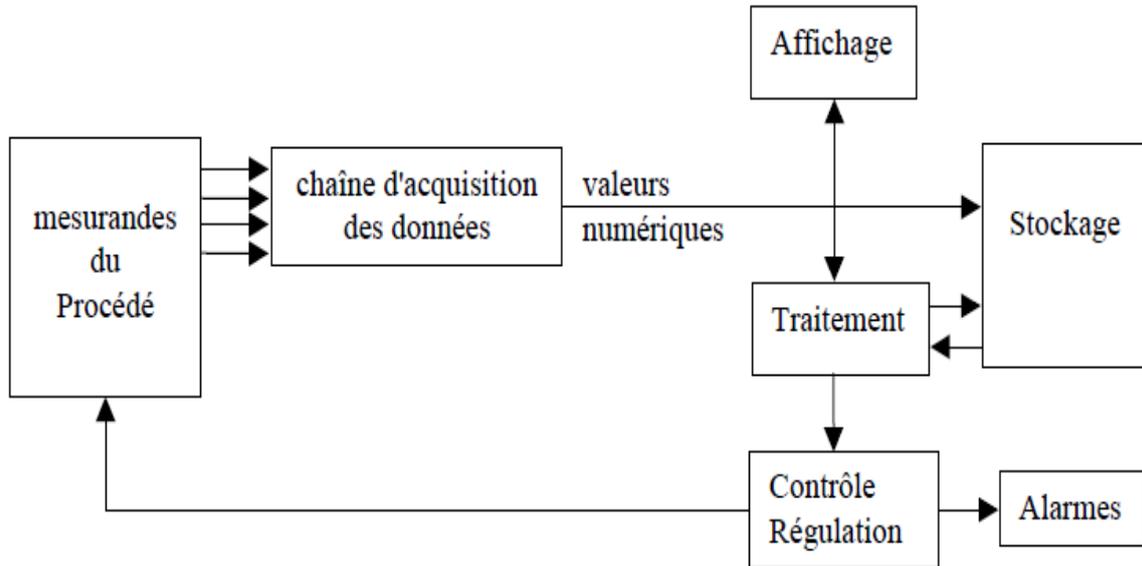


Figure II.2 : Rôle et construction d'une chaîne d'acquisition [18]

La chaîne de mesure est constituée, en particulier, de blocs ou d'éléments derrière le capteur destinés à traiter le signal délivré soit par le capteur actif, soit par l'ensemble capteur passif plus conditionneur. En sortie de la chaîne, le signal est traité pour aboutir à sa mesure. Une chaîne de mesure doit pouvoir assurer au moyen de dispositifs appropriés les fonctions suivantes :

L'extraction de l'information : concernant chacune des grandeurs physique à connaître et la traduction en signal électrique au moyen de capteurs et de conditionneurs.

Le traitement analogique du signal : afin d'éviter la dégradation du signal par le bruit et les parasites : amplification, filtrage.

La sélection à l'aide d'un multiplexeur parmi l'ensemble des signaux disponibles du seul signal requis.

La conversion du signal sous forme numérique adaptée au calculateur chargé de l'exploiter, au moyen de l'échantillonneur bloqueur et du convertisseur analogique numérique.

La coordination des opérations précédentes est assurée par un calculateur, qui peut être chargé de divers traitement sur les signaux numériques destinés à faciliter leur exploitation

(linéarisation) ou corriger des défauts d'appareillage (dérives thermiques compensées après auto-zéro et auto étalonnage par exemple).

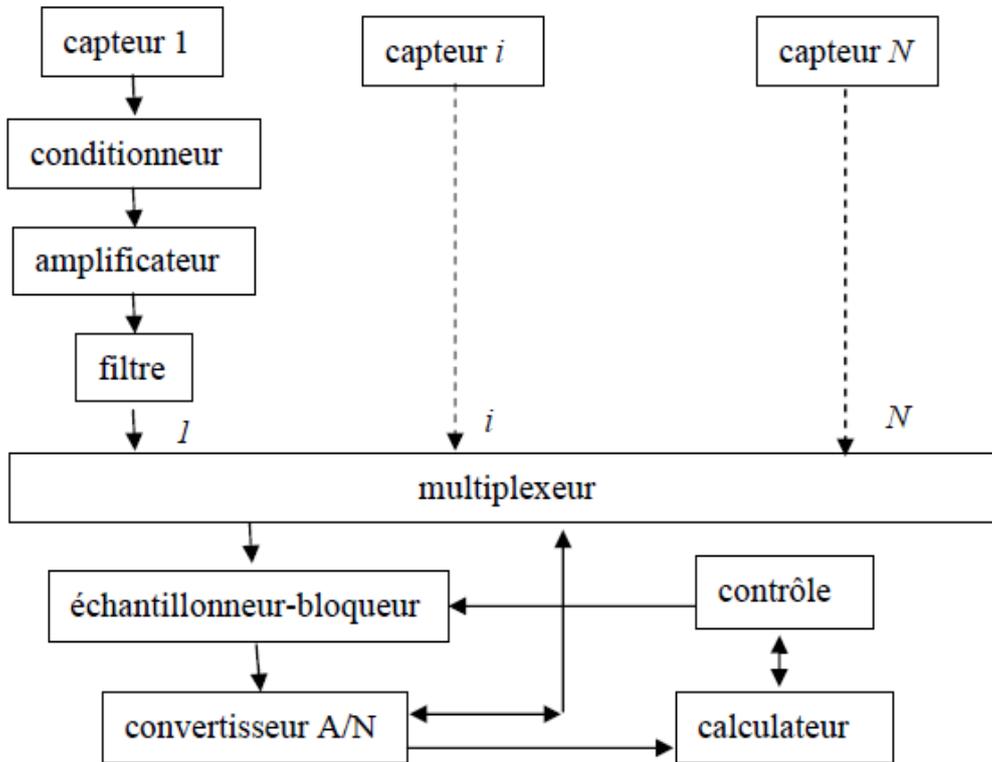


Figure II.3 : les éléments d'une chaîne d'acquisition [18]

La conception d'une chaîne doit satisfaire à des conditions imposées par l'application envisagée, définies par le cahier des charges, et qui concernent en particulier : l'étendu de mesure, la précision, la rapidité, la résolution, l'immunité aux grandeurs d'influence.

II.2.2 Les principaux composants de l'acquisition

1) *Le multiplexeur*

Lorsque l'acquisition porte sur plusieurs mesurandes, le multiplexeur permet la sélection d'un canal afin d'aiguiller son signal vers les dispositifs de traitement. La sélection d'une voie s'effectue par son adresse.

Il existe deux types de multiplexeurs : unipolaire et différentiel. Le choix est guidé par la nature des tensions à commuter : référencées par rapport à la masse ou différence de potentiels [18].

2) L'échantillonneur-bloqueur

Cet élément assure les fonctions suivantes :

- Prélever à un instant connu avec précision un échantillon d'une tension appliquée à son entrée,
- mémorisé cet échantillon,
- délivrer en sortie une tension égale à celle mémorisée.

Dans les cas de signaux dont la variation risque d'être importante pendant la durée d'une conversion analogique numérique, l'échantillonneur-bloqueur doit nécessairement précéder le CAN de façon à lui présenter une tension stable représentative du signal à l'instant de l'échantillonnage. [18]

3) Le convertisseur analogique numérique CNA

Recevant à son entrée une tension analogique V_i , il délivre en sortie un mot de n bits selon un code binaire déterminé.

4) Le microprocesseur

Une fois programmé, il va être le chef d'orchestre de la chaîne de mesure, c'est-à-dire délivrer les séquences de commande activant chacun des blocs de circuit de la chaîne :

- la sélection d'une voie d'entrée par l'envoi d'une adresse au multiplexeur
- la fixation du gain programmable
- échantillonnage puis le blocage du signal
- le déclenchement de la conversion analogique /numérique
- la lecture et le stockage de la donnée numérique dès la réception du signal de fin de conversion du CAN [18].

II. 3 Les capteurs

Le monde qui nous entoure est composé d'innombrables capteurs. Ils peuvent revêtir des formes très variées et être conçues pour des usages bien divers. Il est donc nécessaire de décrire les différents type de capteurs et leur mode de fonctionnement, leurs avantages et leurs inconvénients ainsi que leurs sensibilité à l'environnement auquel ils sont soumis.

Tous les capteurs existant peuvent être caractérisés selon deux principaux critères :

- Les grandeurs physiques mesurées : pour tous les capteurs qui mesurent des pressions, vitesse, température,...)
- Les différents types d'informations délivrées : pour tous les capteurs qui envoient des valeurs binaires (capteur Tout Ou Rien ~ TOR), digitales ou analogiques/numériques.

II. 3. 1. Types de capteurs suivant l'information délivrée

Il existe quatre grandes familles de capteurs qui sont :

II. 3. 1. 1. Capteurs analogiques

Ce type de capteurs fournit un signal analogique en fonction d'une grandeur physique, électrique ou mécanique. C'est la catégorie la plus importante. Il y a une relation mathématique entre la grandeur d'entrée E et le signal de sortie : $S = f(E)$.

Cette famille se décompose en deux grands groupes :

- Les capteurs physiques sont caractérisés par une relation permanente entre la grandeur à mesurer et le signal de sortie du capteur,

- Les capteurs chimiques ne possèdent pas cette caractéristique et vont donc impliquer un processus d'utilisation séquentiel beaucoup plus complexe et beaucoup plus susceptible de conduire à des erreurs d'interprétation. En effet, les capteurs chimiques impliquent une réaction physico-chimique entre le capteur et l'environnement qu'il est chargé d'appréhender ; une réaction mettant en jeu une surface d'échange dont la taille est limitée. Il en résulte le risque de saturation et donc d'inefficacité du capteur, risque que l'on doit apprécier et éviter en procédant très régulièrement à un reconditionnement du capteur.

Ce processus sera généralement automatisé selon une fréquence adaptée (toutes les secondes parfois) et pendant sa durée le capteur ne sera évidemment pas disponible pour une mesure. Quelques principaux domaines d'application des capteurs sont représentés dans le (tableau II.1).

Capteurs Physiques	Capteurs Chimiques
capteurs optiques	capteurs de gaz
capteurs de déformation (force, pression, accélération, etc.)	capteurs d'humidité
capteurs de température	capteurs ioniques
capteurs magnétiques	capteurs biochimiques
capteurs acoustiques	

Tableau II.1 : Quelques principaux domaines d'application des capteurs [12]

II. 3. 1. 2. Capteurs logiques

Ils sont représentés par deux états (0 et 1) dont le modèle est le contact ouvert ou fermé (fin de course, capteur de niveau...). C'est la catégorie appelée (Key sensor) en anglais. Ils interviennent le plus souvent en tant qu'éléments de sécurité, $S = 0$ ou 1 [12].

II. 3. 1. 3. Capteurs numériques

Les capteurs numériques fournissent un signal fréquentiel, c'est à dire un certain nombre d'impulsions par unité de temps (n) en fonction de la grandeur mesurée (E). Le capteur type de cette catégorie est le pluviomètre à auget basculant. Leur intérêt majeur réside dans leur facilité d'emploi puisqu'ils peuvent être directement couplés à un compteur. Ils ne nécessitent donc qu'une électronique associée réduite. $S = n$, avec $n = k \cdot E$ avec k entier [18].

II. 3. 1. 4. Capteurs digitaux

Il s'agit de dispositifs qui donnent directement des informations binaires combinatoires. Ils sont parfaitement représentés par la famille des codeurs optiques. Ces dispositifs possèdent une grande immunité au bruit et sont peu influencés par des grandeurs parasites, comme ils peuvent être directement couplés au système informatique sans la nécessité d'un système d'amplification puis de conversion analogique numérique. Dans ce cas S est un code en base 2 en relation linéaire avec E . [18]

II.3.2 Types de capteurs suivant la grandeur physique mesurée délivrée**II.3.2.1 Capteurs actifs**

Fonctionnant en générateur, dont une partie de l'énergie physique prélevée sur le mesurande est transformée directement en énergie électrique qui constitue le signal de sortie. Ce signal est un courant, une tension ou une quantité d'électricité. [12]

Les signaux de sortie délivrés par les capteurs actifs sont de très faible puissance. Ils sont dits de bas-niveau et doivent être amplifiés pour pouvoir être ensuite exploités.

Les effets physiques qui assurent la conversion de la forme d'énergie propre au mesurande (énergie thermique, mécanique ou rayonnement), en énergie électrique sont :

La réponse d'un capteur actif peut être un courant, une tension ou une charge.

<i>Mesurande</i>	<i>Effet utilisé</i>	<i>Grandeurs de sortie</i>
Température	Thermoélectricité	Tension
Flux de rayonnement optique	Pyroélectricité	Charge
	Photoémission	Courant
	Effet photovoltaïque	Tension
	Effet photoélectromagnétique	Tension
Force Pression Accélération	Piézo-électricité	Charge
Vitesse	Induction électromagnétique	Tension
Position (aimant)	Effet Hall	Tension

Figure II.4 : effet et grandeurs de sortie d'un capteur [12]

Quelques un de ces effets sont décrits ci- dessous.

L'effet thermoélectrique : Un circuit formé de deux conducteurs de nature chimique différente dont les jonctions sont à des température T_1 et T_2 est le siège d'une force électromotrice $e(T_1, T_2)$. [12]

L'effet pyroélectrique : Certain cristaux dits pyroélectriques, le sulfate de triglycine par exemple, ont une polarisation électrique spontanée qui dépend de leur température ; ils portent en surface des charges électriques proportionnelles à cette polarisation et de signes contraires sur les faces opposées. [12]

L'effet piézoélectrique : L'application d'une force et plus généralement d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézoélectrique, le quartz par exemple, entraîne une déformation qui suscite l'apparition de charge électrique égales et de signes contraires sur les faces opposées. (La figure II.5 c) montre l'effet piézoélectrique. [12]

L'effet d'induction électromagnétique : Lorsqu'un conducteur se déplace dans un champ d'induction fixe, il est le siège d'une *f.e.m.* (*force électromotrice*) proportionnelle au flux coupé par unité de temps, donc à sa vitesse de déplacement.

De même, lorsqu'un circuit fermé est soumis à un flux d'induction variable du fait de son déplacement ou de celui de la source de l'induction (aimant par exemple), la *f.é.m.* dont il est le siège est égale et de signe contraire à la vitesse de variation du flux d'induction [12].

L'effet photoélectrique. On en distingue plusieurs, qui diffèrent par leurs manifestations mais qui ont pour origine commune la libération de charges électriques dans la matière sous l'influence d'un rayonnement lumineux ou plus généralement électromagnétique, dont la longueur d'onde est inférieure à la valeur seuil, caractéristique du matériau.

L'effet photoémissif. Les électrons libérés sont émis hors de la cible éclairée et forment un courant collecté par application d'un champ électrique.

L'effet photovoltaïque. Des électrons et des protons sont libérés au voisinage d'une jonction de semi-conducteurs P et N illuminée ; leur déplacement dans un champ électrique de la jonction modifie la tension à ses bornes.

L'effet photoélectromagnétique. L'application d'un champ magnétique perpendiculaire au rayonnement provoque dans le matériau éclairé l'apparition d'une tension électrique dans la direction normale au champ et au rayonnement.

L'effet Hall. Un matériau, généralement semi-conducteur et sous forme de plaquette, est parcouru par un courant I et soumis à une induction B faisant un angle θ avec le courant. Il apparaît, dans une direction perpendiculaire à l'induction et au courant une tension V_H qui a pour expression :

$$V_H = K_H \cdot I \cdot B \cdot \sin \theta$$

Où K_H dépend du matériau et des dimensions de la plaquette.

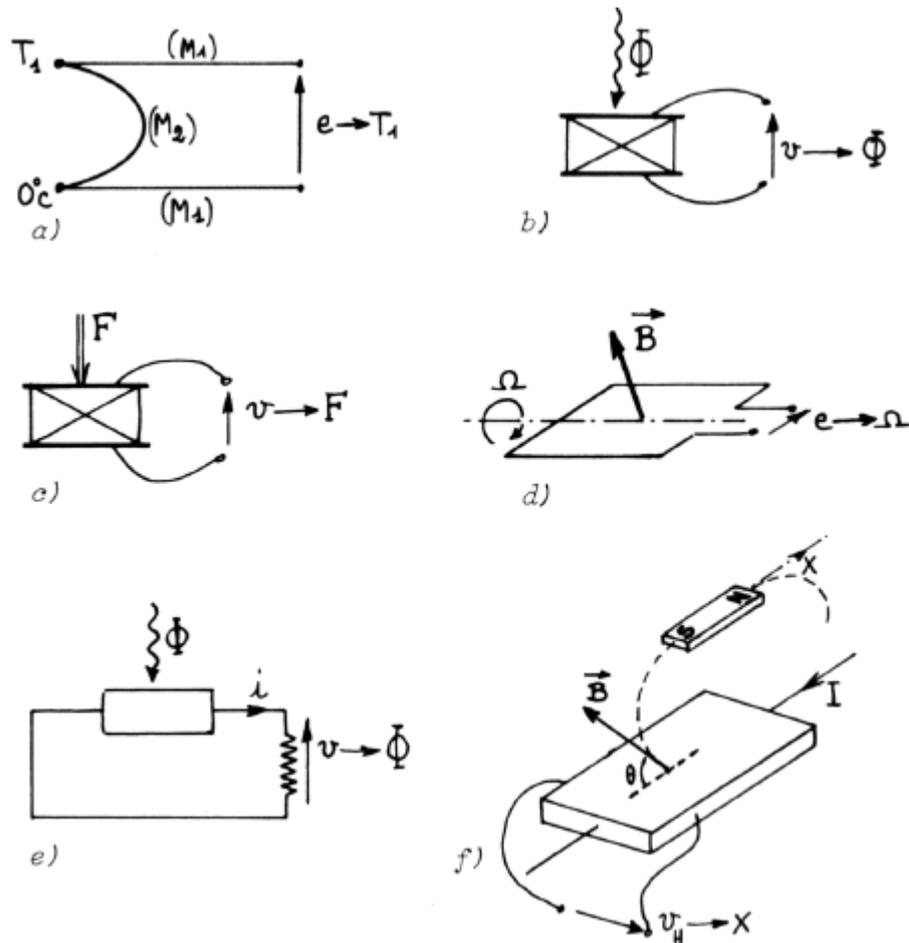


Figure II.5 : Exemples d'application d'effets physiques à la réalisation de capteurs actifs : (a) thermoélectricité, (b) pyroélectricité, (c) piézoélectricité, (d) induction électromagnétique, (e) photoélectricité, (f) effet Hall. [12]

II.3.2.2 Capteur passifs

Doivent être alimentés par une source d'énergie électrique extérieure, cette source d'énergie peut être une tension continue ou un courant. Ce signal de sortie est également une tension continue en module.

Ces modules de fonctionnement correspondent à des principes de base et s'adaptent essentiellement aux capteurs à sortie numérique et logique.

Il s'agit d'impédance dont l'un des paramètres déterminants est sensible au mesurande. Dans l'expression littérale d'une impédance sont présents des termes liés d'une part à sa géométrie et ses dimensions et d'autre part aux propriétés électriques des matériaux : la résistivité ρ , la perméabilité magnétique μ et la constante diélectrique ϵ .

La variation d'impédance peut donc être due à l'action du mesurande soit sur les caractéristiques ou les dimensions, soit sur les propriétés électriques des matériaux, soit plus rarement sur les deux simultanément.

Les paramètres géométriques ou dimensionnels de l'impédance peuvent varier si le capteur comporte soit un élément mobile, soit un élément déformable.

Dans le premier cas, à chaque position de l'élément mobile correspond une valeur de l'impédance et la mesure de celle-ci permet de connaître la position ; c'est le principe d'un grand nombre de capteurs de position ou de déplacement : potentiomètre, inductance à noyau mobile, condensateur à armature mobile.

Dans le second cas, la déformation résulte de forces appliquées soit directement soit indirectement au capteur : armature d'un condensateur soumis à une pression différentielle, jauge d'extensométrie liés rigidement à une structure soumise à contrainte. La modification d'impédance qu'entraîne la déformation du capteur est liée aux efforts auxquels celui-ci se trouve soumis et elle en assure une traduction électrique.

Les propriétés électriques des matériaux, selon la nature de ces dernières, peuvent être sensibles à des grandeurs physiques variées : température, éclairage, pression, humidité... Si l'une des ces grandeurs varie l'impédance variera avec la variation de celle-ci. [12]

II.3.2.3 Capteurs inductifs

Principe : Le déplacement que l'on veut traduire électriquement est imposé à l'un des éléments d'un circuit magnétique, entraînant une variation du flux dans un enroulement de mesure. Lorsque l'élément mobile est un noyau ferromagnétique, en translation, son déplacement peut être mis en évidence de 2 manières :

- Soit par la modification du coefficient d'auto-induction d'une bobine (inductance variable).
- Soit par le changement du couplage entre les enroulements primaire et secondaire d'un transformateur provoquant une variation de la tension secondaire.

Les variations du coefficient d'auto-induction L ou de mutuelle induction M en fonction du déplacement d'un noyau sont en général d'une linéarité médiocre ; celle-ci peut être notablement améliorée par l'association en opposition de deux bobines dont les coefficients L ou M varient en sens contraire pour un même déplacement, réalisant ainsi une compensation partielle des non-linéarités (fonctionnement en push-pull). [12]

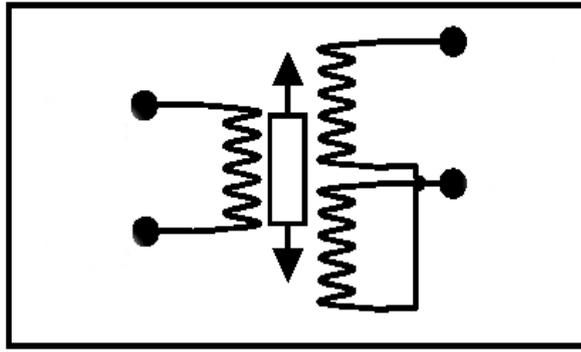


Figure II.6 : Capteurs inductifs [12]

Le capteur inductif est placé dans un circuit alimenté par une source de tension sinusoïdale dont la fréquence est, en général, limitée à quelques dizaines de kilohertz afin que soient réduites les pertes magnétiques et par courant de Foucault ainsi que l'influence des capacités parasites. La tension de mesure V_m résulte de la modulation d'amplitude de la tension d'alimentation $E_s \cdot \cos(\omega_s t)$ par le déplacement $x(t)$:

$$V_m = k \cdot x(t) \cdot E_s \cdot \cos(\omega_s t + \varphi)$$

De par leur principe même, les capteurs inductifs sont d'une part sensibles aux champs électromagnétiques parasites et d'autres parts sont susceptibles d'en induire. C'est pourquoi il est nécessaire de les placer à l'intérieur d'un blindage servant d'écran magnétique.

Les capteurs inductifs habituels sont composés d'une bobine, d'une ferrite et d'un circuit électronique monté sur un circuit imprimé, le tout est assemblé et encapsulé dans un boîtier cylindrique. La fabrication, l'assemblage et la connexion de tels capteurs nécessitent aujourd'hui diverses étapes compliquées, qui sont à la fois inadaptées à la miniaturisation et un obstacle pour la réduction des coûts de fabrication.

Mais de nouveaux capteurs miniaturisés sont à l'étude : la solution comprend une électronique d'interface située directement sous une bobine plate de 1 mm de côté et de 75 nH d'inductance. Le signal de sortie de ce capteur est un signal carré, dont la fréquence varie en fonction de l'approche d'une cible métallique.

L'industrie se tourne vers les capteurs inductifs, Pour leur précision, leur fiabilité et leurs performances extrêmes. Pour donner des exemples d'industries où les capteurs inductifs sont utilisés, on en trouve dans l'aéronautique (tests et analyses de la déflexion du fuselage, simulateur de vol), le génie civil (pour la détection de séismes) et l'automobile (développement des moteurs et des suspensions).

a) Principe et caractéristiques générales

Il s'agit soit de condensateurs plans soit de condensateurs cylindriques dont l'une des armatures subit le déplacement à traduire, entraînant une variation de la capacité. [12]

L'effet de bord du capteur dépend de la distance des armatures. Si la distance est négligeable par rapport aux dimensions des surfaces, nous avons :

-Pour le condensateur plan

$$C = \frac{\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot D}{A}$$

ε_r étant la permittivité du lieu placé entre les armatures, A et D étant leur surface en regard et leur distance.

-pour le condensateur cylindrique :

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 l}{\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

l étant l'enfoncement du cylindre intérieur de rayon r_1 dans le cylindre creux de rayon r_2 .

L'effet de bord devient important lorsque la distance des armatures n'est pas très faible par rapport aux dimensions linéaires des surfaces en regard. Il peut dans certains cas, être éliminé de la mesure par l'emploi d'un anneau de garde qui permet de reporter la perturbation au-delà de la surface des armatures effectivement utilisées dans la mesure.

Le déplacement de l'armature peut s'effectuer :

- dans le cas d'un condensateur plan : soit dans son propre plan : A variable, D constant, soit perpendiculairement à son plan : A constant, D variable ;
- dans le cas d'un condensateur cylindrique : uniquement parallèlement à l'axe, l variable.

Les capteurs capacitifs sont remarquables par la simplicité de leur constitution qui permet des réalisations robustes et fiables.

- Le diélectrique a généralement l'air si bien que les performances ne dépendent que des caractéristiques géométriques et sont indépendantes des propriétés des matériaux utilisés, à condition qu'ils soient bien choisis.

- L'influence de la température qui fait varier la surface et l'écartement des armatures peut être rendue indécélable par un choix convenable du métal des armatures et de l'isolant de leur support.

II.3.3 Définitions des caractéristiques générales d'un capteur

Mesurande m : c'est la grandeur physique en général non électrique que l'on veut mesurer (température, déplacement, pression, ...). C'est la grandeur d'entrée du capteur ou l'excitation.

Mesurage : c'est l'ensemble des opérations expérimentales qui conduisent à la connaissance de m .

Réponse ou grandeur de sortie s : c'est l'information délivrée par le capteur. Elle dépend de m . Toute valeur de s doit permettre, de remonter à chaque instant à une seule valeur de m et inversement (relation biunivoque) $\Rightarrow s = F(m)$.

L'exploitation de la grandeur de sortie du capteur en fonction du mesurande, $s = F(m)$, résulte en général d'un étalonnage.

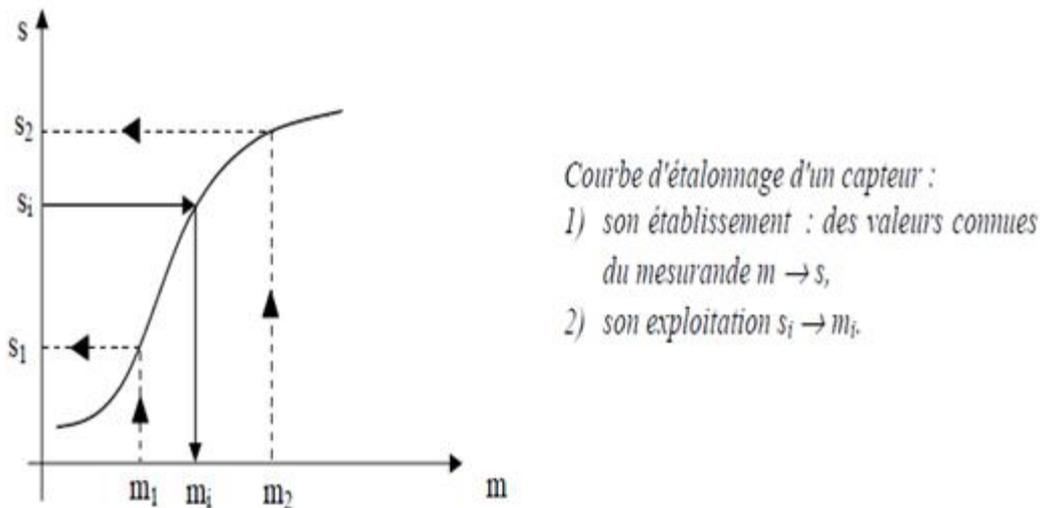


Figure II.7 : courbe d'étalonnage d'un capteur [18]

D'autre part, on essaiera toujours d'avoir si possible une relation de proportionnalité entre les variations de l'excitation et celle de la réponse du capteur $\Leftrightarrow \Delta s = S \cdot \Delta m$, où S est la sensibilité du capteur. A Δs donné, plus Δm est petit plus le capteur est sensible.

Un des problèmes important dans la conception et l'utilisation d'un capteur est la constance de sa sensibilité qui doit dépendre aussi peu que possible :

- de la valeur de $m \Rightarrow$ le capteur est linéaire donc $S = \Delta s / \Delta m$,
- de sa fréquence de variation \Rightarrow largeur de la bande passante,
- du temps \Rightarrow vieillissement n

- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure => les grandeurs d'influences (température, humidité, vibration, ...). [18]

II.3. 4 Les caractéristiques métrologiques d'un capteur

1) Réponse statique d'un capteur

A chaque mesurande m est associé un capteur dont le rôle est de traduire ce mesurande en une grandeur électrique $E(m)$ qui peut être une tension, un courant, une charge ou encore une impédance.

Lorsqu'on trace la courbe $E(m)$, implicitement on suppose :

- que chaque point de la courbe correspond à une position d'équilibre (statique).
- que toutes les grandeurs d'influence (température, humidité, ...) sont fixes. [18]

2) Grandeurs d'influences

La relation $E=F(m)$ entre mesurande et grandeur électrique n'est de cette forme que dans le cas idéal. En réalité, beaucoup d'éléments autres que le mesurande peuvent modifier la grandeur E . La relation est de la forme : $E=F(m, g_1, g_2, \dots)$ où les g_i sont les grandeurs d'influence.

Les grandeurs d'influence sont variables d'un capteur à l'autre car elles dépendent du processus physique mis en œuvre. On retrouve les grandeurs de type mécanique ou thermique mais aussi des grandeurs électriques.

On les classe en deux types :

- grandeurs d'ambiance : grandeurs physiques indépendantes du mesurande (température, hygrométrie, champ magnétique...). La température joue souvent un rôle important. Elle provoque deux types de phénomènes : dilatation des corps et modifications des propriétés électriques (changement de conductibilité et de caractéristiques diélectriques). Les variations de pression, les forces (éventuellement d'inertie) provoquent des déformations. Les champs magnétiques peuvent induire des f.e.m. parasites.
- grandeurs d'influence d'alimentation : paramètres électriques (courant, tension, fréquence) des circuits d'alimentation du capteur.

Face à ces grandeurs d'influence, il y a plusieurs attitudes possibles :

- prise en compte : lorsqu'on utilise le capteur pour mesurer m , il faut en parallèle mesurer toutes les grandeurs d'influence.

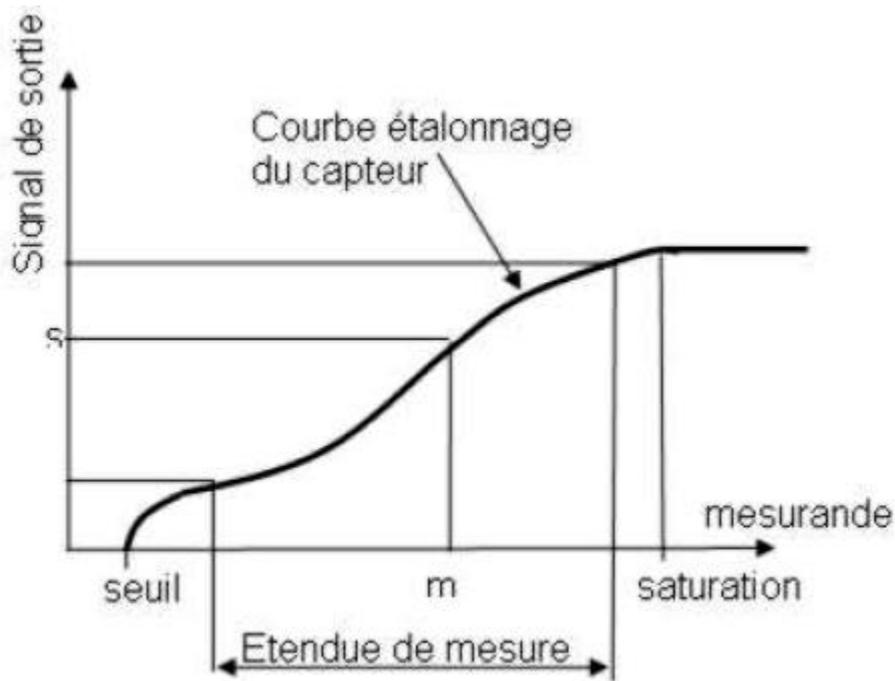
- Isolation du capteur vis-à-vis des éléments pouvant modifier les grandeurs d'influence : blindage électromagnétique ; suspension antivibratoire; ...
- Stabilisation des grandeurs d'influence : enceinte thermostatée ; sources de courant et de tension stabilisées ; ...
- Compensation par un circuit électrique ou électronique adapté (méthodes utilisant des ponts par exemple). [18]

3) Étendue de mesure

L'étendue de mesure est définie sur la courbe d'étalonnage du capteur (ci dessous). A l'extérieur de cette zone se trouvent deux valeurs particulières : le seuil et la saturation.

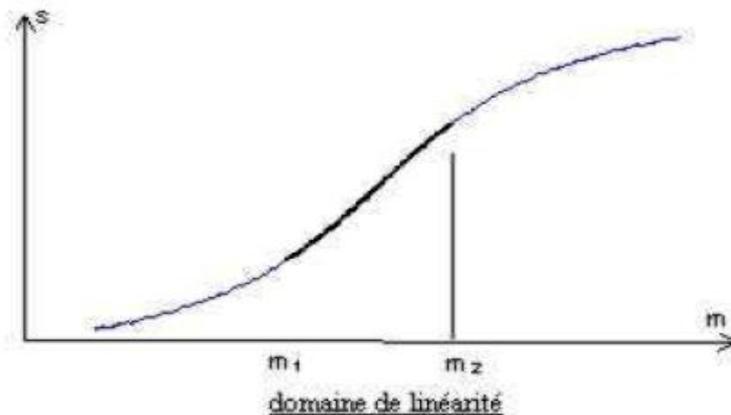
Le phénomène de saturation est fréquemment rencontré en physique. Même si la valeur du mesurande augmente, la grandeur de sortie ne peut dépasser une valeur maximale E_{\max} : pour $m > m_{\max}$, $E = E_{\max}$. On ne peut donc pas effectuer de mesurage pour des valeurs au dessus de m_{\max} . L'origine peut être mécanique (butées...) ou électrique (limitation en courant ou tension...). La saturation n'existe pas forcément, et l'on peut arriver dans le domaine de détérioration du capteur sans atteindre de saturation. Le seuil correspond à la valeur minimale du mesurande nécessaire pour obtenir une grandeur de sortie non nulle : pour $m < m_0$, $E = 0$. Cet effet de seuil peut provenir de frottements solides, du fonctionnement de diodes... En résumé, on ne peut mesurer que des mesurandes compris entre m_0 et m_{\max} . La portion linéaire de la caractéristique est elle encore plus réduite.

Rappelons aussi qu'il ne faut pas confondre l'étendue de mesure telle qu'elle est définie par le constructeur du capteur et la plage de mesure (souvent abusivement appelée étendue de mesure) qui sera celle d'une application donnée et qui sera donc en règle générale sensiblement réduite par rapport à l'étendue de mesure.



4) Domaine de linéarité

Le domaine de linéarité est le domaine pour lequel la caractéristique est une portion de droite. Dans ce domaine, la variation de la grandeur de sortie est proportionnelle à la variation du mesurande. Si le capteur est parfaitement linéaire, la caractéristique est une droite.



Dans la réalité, un capteur décrit comme linéaire présente toujours un écart par rapport à la linéarité.

5) Résolution – Précision

C'est un paramètre qui n'apparaît pas directement sur la courbe de réponse mais qui est une caractéristique de la réponse. C'est la plus petite variation de mesurande que peut détecter le capteur.

On exprime très souvent la précision en pourcentage de l'étendue de mesure (ou de la pleine échelle % P.E. soit en anglais % fso, pour full scale output) [18].

6) Rapidité - temps de réponse

Jusqu'à maintenant, on ne s'est intéressé qu'au régime permanent. Or il y a toujours un régime transitoire avant l'établissement de ce régime permanent. Il faut donc évaluer le temps au bout duquel ce régime transitoire devient négligeable. La rapidité est caractérisée par le temps que met le capteur à réagir à une variation brusque du mesurande. Cependant la valeur finale étant le plus souvent atteinte de manière asymptotique on retient alors comme principal critère d'évaluation de la rapidité d'un système, le temps de réponse à $n\%$ (en pratique le temps de réponse à 5%). La connaissance du temps de réponse d'un capteur est un élément essentiel lors de la réalisation de mesures. Il permet de déterminer au bout de combien de temps (pour une précision donnée) après un changement de mesurande, la grandeur fournie par le capteur est effectivement représentative du mesurande.

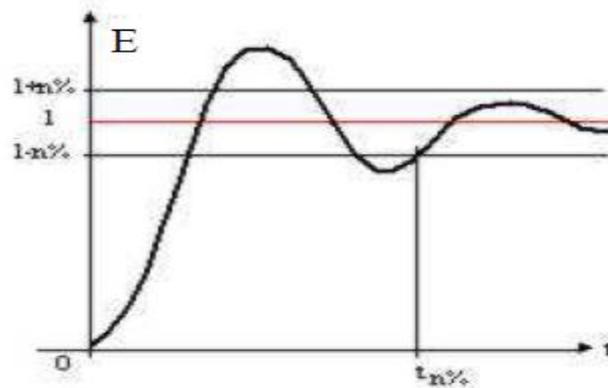


Fig II.10 : Temps de réponse d'un capteur [18]

II.4 Quelques exemples de capteurs

II.4.1 capteur LVDT

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

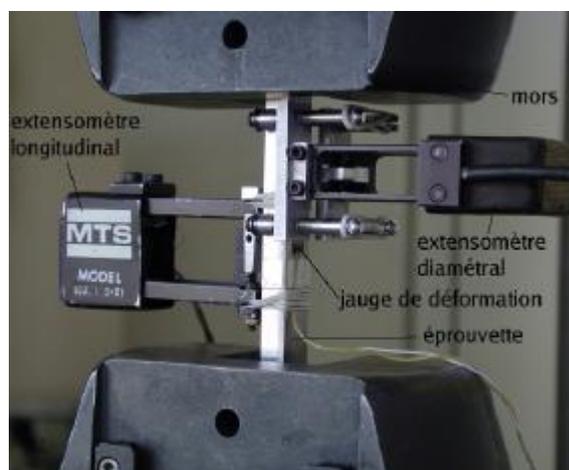


Figure II.11 : Extensomètres diamétral et longitudinal sur une éprouvette de traction

[10]

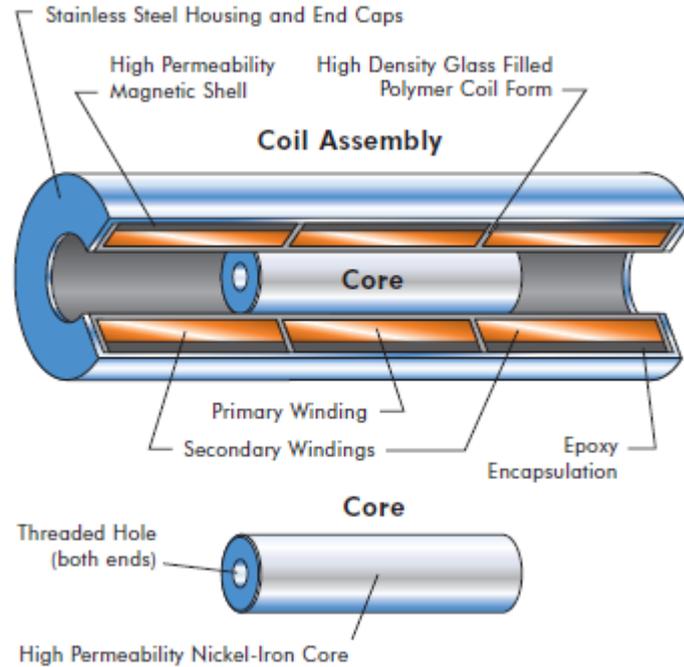


Figure II.12 : Les principales composantes d'un LDVT [11]

II.4.2 Capteur de Force et de pression

Dans la pratique, pour mesurer une force on dispose de cinq méthodes qui se basent sur la relation suivante

$$F = m \cdot g, \quad P = F/S \quad \text{Ainsi, on va pouvoir :}$$

- Comparer la force inconnue via un système de leviers à une masse connue m ,
- Mesurer l'accélération d'une masse connue,
- La transformer en une pression en la distribuant sur une aire connue et utiliser un capteur de pression,
- Enfin la convertir en une déformation d'un élément élastique.

- **Cellules de pression**

La figure II.13 représente le principe de mesure qui s'explique comme suit :

La force s'applique sur un dispositif solidaire d'une membrane déformable, cette force vient compresser un liquide hydraulique, d'ou variation de pression mesurée par un capteur en P . Un tel dispositif est utilisé essentiellement en statique ou avec des forces variantes lentement dans le temps.

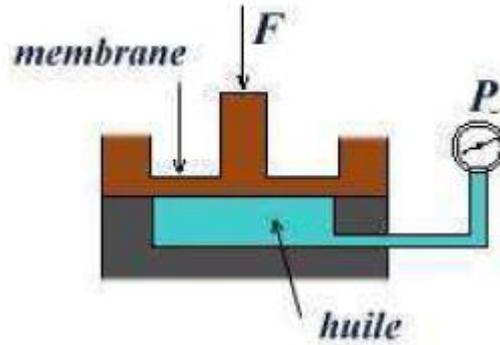


Figure II. 13 : Mesure de pression

II.5 Conclusion

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. Mais cette amplification ne doit concerner que le signal utile. Or ce dernier côtoie bien souvent une tension parasite (souvent du même ordre de grandeur que le signal utile) ainsi qu'une tension due au conditionneur associé au capteur (cas d'un pont de Wheatstone). Il faut donc faire une amplification « sélective » qui élimine ou atténue fortement tout signal ne contenant pas d'information pour ne garder que le signal du capteur.

De manière classique la sortie d'une chaîne de mesure est du type électrique. Si la chaîne de mesure fait intervenir plusieurs transducteurs, on appelle corps d'épreuve celui en contact direct avec le mesurande. Le dernier transducteur est associé à un conditionneur qui fournit la grandeur électrique de sortie de manière exploitable. Le choix de ce conditionneur est une étape importante dans le cadre de la chaîne de mesure car, associé au capteur, il détermine la nature finale du signal électrique et va influencer les performances de la mesure.

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on s'intéresse aux extensomètres qui sont des appareils qui servent à mesurer les déformations ou bien l'allongement qui est la conséquence des contraintes. Ces jauges de contraintes (ou jauges d'extensométrie) sont largement utilisées depuis de nombreuses années pour la mesure de déformations à la surface des structures engendrées par la pression, la force, l'accélération, le couple...Ets. Toute grandeur mécanique dont l'action sur un corps d'épreuve entraîne sa déformation est mesurable à l'aide des extensomètres. Cette mesure de déformation permet d'accéder à la contrainte étant souvent la conséquence de l'application d'un effort sur une surface. L'extensomètre débouche naturellement sur toute une série de capteurs de déplacement, d'accélération, de force ou de pression. Les méthodes expérimentales dans le domaine de l'extensomètre connaissent actuellement un regain d'intérêt en tant que complément indispensable aux outils numériques pour l'analyse prédictive du comportement des systèmes structuraux (constructions mécaniques, ouvrage d'art) ou biomécaniques. Avant de donner plus de détail sur les jauges il est impératif d'aborder quelques notions sur les contraintes et les déformations qui sont la cause de trouver ces instruments de mesures.

III.2 Contraintes

Le terme stress, qui désigne en français le syndrome général d'adaptation et a pris dans le langage courant la signification de (nervosité), (tension nerveuse), (inquiétude), (panique) signifie (contrainte) en anglais. De façon générale, une contrainte est une restriction de quelque ordre. Une contrainte n'est pas un obstacle, mais une condition de créativité pour la détourner et la contourner, à l'exemple illustratif des machines volantes pour la contrainte de la pesanteur newtonienne. Une contrainte est un effort par unité de surface qui s'exerce dans le matériau (on pourra parler de densité de force par unité de surface). Elle dépend de la valeur

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

de la sollicitation et de la surface du solide. Pour une même sollicitation, la contrainte sera d'autant plus faible que la surface est grande et inversement. Dans la mécanique, pour des petites déformations, la contrainte normale σ est proportionnelle à l'allongement relatif ε par la constante du module de Young.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{III.1})$$

Avec l'allongement relatif donné par :

$$\varepsilon = \frac{L_{finale} - L_{initiale}}{L_{initiale}} \quad (\text{III.2})$$

Traction-Compression : la contrainte de traction-compression est donnée par :

$$\sigma = \sigma_{traction} = \sigma_{compression} = \frac{F}{S} \quad (\text{III.3})$$

- **Flexion** : la contrainte de flexion est décrite avec le moment de flexion de la flèche Y et le moment d'inertie.

$$\sigma_{flexion} = \frac{M_{Flexion} \cdot Y}{I} \quad (\text{III.4})$$

Avec

$$I = \int_S Y^2 dS \quad (\text{III.5})$$

- **Cisaillement** :

$$\tau = \frac{\sigma_{cisaillement}}{S} = G \cdot \gamma \quad (\text{III.6})$$

Avec

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (\text{III.7})$$

III.3 Déformation

III.3.1 Définition

La déformation mécanique est une déformation physique, elle définit le changement de forme d'un corps quand les forces appliquées sur celui-ci ou générées à l'intérieur lui font atteindre un nouvel état d'équilibre. La déformation est quantifiée par l'allongement relatif ε , encore appelé déformation.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{(III.8)}$$

III.3.2 Types de déformation

On peut distinguer deux types de déformations, la déformation élastique, qui est réversible et la déformation plastique qui ne l'est pas. Le fluage 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.

III.3.2.1 Déformation élastique

La déformation élastique est une déformation réversible, c'est-à-dire lorsque l'on supprime les sollicitations le milieu retourne à son état initial. L'élasticité linéaire concerne les petites déformations proportionnelles à la sollicitation. Dans cette gamme, l'allongement est proportionnel à la force dans le cas d'un étirement, et l'angle est proportionnel au couple dans le cas d'une torsion. Aux plus grandes déformations, l'élasticité devient non linéaire pour certains matériaux. Pour d'autres, la fracture ou le fluage interviennent. La déformation élastique intervient pour les faibles sollicitations. Si l'on augmente les sollicitations, on change le mode de déformation.

III.3.2.2 Déformation plastique

La déformation plastique est une déformation irréversible d'une pièce ; elle se produit par un réarrangement de la position des atomes. Lorsque l'on sollicite une pièce, un objet (on le tire, on le comprime, on le tord...), celui-ci commence par se déformer de manière réversible (déformation élastique), c'est-à-dire que ses dimensions changent, mais il reprend

sa forme initiale lorsque la sollicitation s'arrête. Certains matériaux, dits (fragiles), cassent dans ce mode de déformation si la sollicitation est trop forte.

III.4 La limite d'élasticité

Expérimentalement, on a défini pour chaque matériau une contrainte limite admissible au-delà de laquelle la pièce subit des détériorations de ses caractéristiques mécaniques, dimensionnelles, voire une rupture. Donc il faut vérifier que les contraintes engendrées par les sollicitations extérieures ne dépassent pas la contrainte limite admissible par le matériau. Le calcul des contraintes sert à évaluer la tension dans la matière [9].

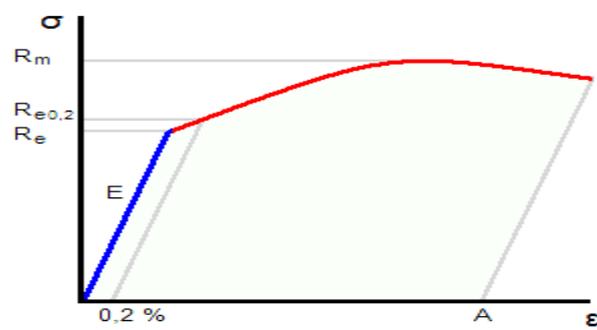


Figure III. 1 : La courbe contrainte-déformation [9]

La limite d'élasticité est la contrainte à partir de laquelle un matériau commence à se déformer de manière irréversible. C'est la zone en rouge sur le graphique dans la figure II. 1, au-delà du domaine élastique E représenté en bleu au-delà duquel l'augmentation de la contrainte donne une déformation à la fois linéaire en fonction de cette contrainte et réversible à la suppression de cette contrainte. Les déformations subies au-delà de la limite d'élasticité restent permanentes. Elles se mesurent ou se vérifient habituellement à l'aide d'un essai de traction [9].

III.5 Loi de Hooke

La loi de Hooke est une loi de comportement des solides soumis à une déformation élastique de faible amplitude. Elle a été énoncée par Robert Hooke, par (l'allongement est proportionnel a la force).

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

Cette loi est appliquée dans le cas d'un état de contraintes uniaxial. Les autres états possibles exigent des versions plus étendues. Hooke a considéré que la phase élastique est linéaire, donc proportionnelle et réversible. [9].

La forme la plus simple de la loi de Hooke est :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{III.9})$$

Dans notre cas le matériau est isotrope, si on prend en compte le coefficient de Poisson ν , la loi de Hooke devient :

$$\sigma_{ii} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{JJ} \right) \quad (\text{III.10})$$

Il faut inverser, la relation précédente pour donner les déformations en fonction des contraintes :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \cdot \left(\sigma_{ij} (1 + \nu) - \nu \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} \right) \quad (\text{III.11})$$

III.5.1 Module de Young

Le module de Young ou module d'élasticité longitudinal est un rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constante, tant que cette déformation reste petite et que la limite du matériau n'est pas atteinte. Le module de Young est la contrainte mécanique qui engendrerait un allongement en % de la longueur initiale d'un matériau. Il ne faut pas confondre élasticité et rigidité puisque la rigidité d'une poutre par exemple dépend de son module de Young mais aussi du moment d'inertie de sa section [9].

III.6 Notions d'extensométrie des jauges à résistance électrique

Les jauges de déformation et des contraintes permettent de transformer une déformation mécanique à des signaux électriques. La fidélité de ces jauges, permet d'envisager leur usage pour fabriquer des capteurs. Avec les mêmes jauges et la même instrumentation en aval, il est possible d'imaginer de nombreux types de capteurs. Les capteurs extensométriques simples peuvent être exécutés même par des non-spécialistes. Il est

d'ailleurs fréquent que, dans des ateliers ou des laboratoires, l'utilisateur fabrique d'abord lui-même ses capteurs, quitte à les faire réaliser, ensuite par des professionnels lorsque la méthode s'est révélée satisfaisante et susceptible d'être étendue à de plus grandes précisions. [10]

III.6.1 Jauge de contrainte

Les capteurs de déformation sont aussi désignés comme extensomètres ou jauges de déformation. Le capteur passif le plus souvent utilisé étant la jauge résistive : elle est collée sur la structure dont elle subit la déformation. Ses faibles dimensions, du mm au cm selon les modèles, permettent des mesures quasi ponctuelles.

Les applications des jauges de déformation débordent de la seule analyse des contraintes. En effet toute grandeur physique, en particulier mécanique, dont l'action sur un corps d'épreuve entraîne sa déformation est mesurable par extensométrie : c'est le cas de la pression, de la force, de l'accélération, du couple. La jauge et le corps d'épreuve constituent alors un capteur composite de la grandeur physique agissante. La jauge est un petit élément résistif qui est collé sur une pièce au point où on veut mesurer la déformation. Cet élément est fait d'un fil fin enroulé selon une direction préférentielle et collé à la pièce par l'entremise d'un support d'isolation. Lorsque la pièce est soumise au chargement, sa déformation est transmise à travers la colle et le support à la jauge. Un changement proportionnel de la résistance en résulte. [10]

Les jauges résistives sont des capteurs passifs traduisant en variation de résistance leur propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où elles sont collées.

Le domaine des déformations mesurables avec une précision pouvant atteindre 0,1% s'étend environ de 10^{-3} % à quelques %. La limite inférieure est fixée par le bruit de fond de la jauge et des circuits associés, la limite supérieure est celle imposée par l'élasticité de la jauge et de la colle de fixation.

Dans le cas général, une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur filiforme de résistivité ρ , de section s et de longueur nl , l étant la longueur d'un brin et n leur nombre ; n est généralement compris entre 10 et 20.

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

Le conducteur étant fixé sur un support isolant, lui-même collé sur la structure étudiée, il subit une déformation identique à celle de la structure, dans une direction parallèle ou non aux brins, ce qui entraîne une déformation $\Delta l / l$.

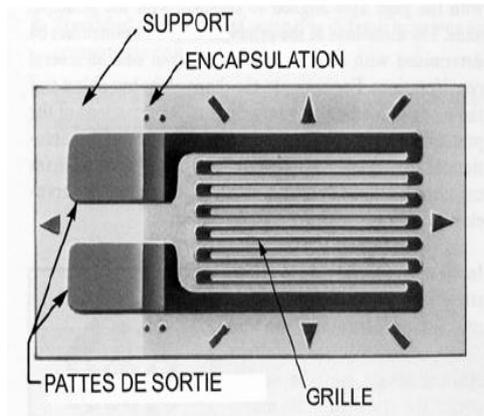


Figure III.2 : diagramme d'une jauge

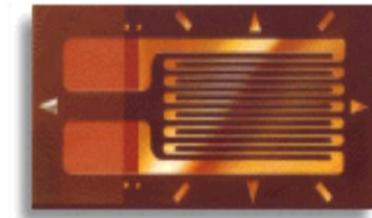


Figure III.3 : Jauge de contrainte

La jauge est un capteur passif traduisant, en variation de résistance électrique, sa propre déformation qui est en principe égale à celle de la structure à l'endroit où elle est collée. Pratiquement, son allongement est habituellement limité à environ 3%. En général, une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur collé sur un support isolant.

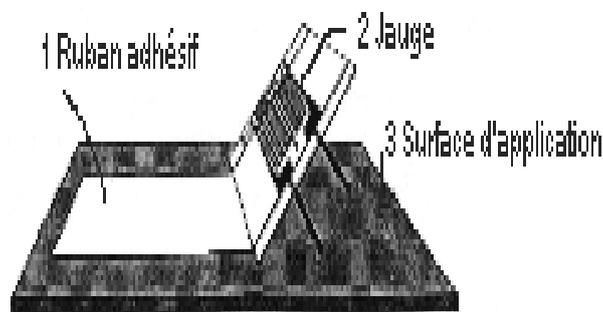


Figure III.4 : Jauge juste avant son collage sur la structure[10]

III.6.2 Constituant de la jauge

Selon son utilisation (environnement, précision, ...), différents matériaux peuvent être utilisés.

1) Le corps d'épreuve

Le corps d'épreuve est la partie qui subira les déformations. Il est donc préférable d'utiliser un matériau facilement déformable afin d'obtenir un signal de forte amplitude. Il faut également

éviter de sortir de la gamme de déformation élastique de celui-ci pour éviter tout risque de déformation permanente.

Certain aciers alliés (E4340 par exemple) donnent une bonne précision et une excellente résistance à la fatigue mais doivent être protégés de la corrosion alors qu'un acier inoxydable n'a pas ce problème mais est moins homogène et donc moins précis. Il est également possible d'utiliser des capteurs en aluminium pour des capteurs de faibles capacités.

2) Le support

Le support fait le lien entre le corps d'épreuve et la pièce déformée. Il doit donc répondre à des caractéristiques bien spécifiques : déformation facile, bonne aptitude au collage et un coefficient de variation relativement faible. On peut ici utiliser des résines époxydes ou des polyamides.

3) La colle

Elle réalise la liaison entre le support de la jauge et le corps d'épreuve. Elle a également le rôle d'isolant. La colle est choisie en fonction du support.

4) La jauge

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.

Le conducteur est soit d'origine métallique, souvent des alliages à base de nickel, soit c'est un semi-conducteur. Le nombre de brin de la grille diffère selon le type du conducteur. Il varie

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

entre 10 et 20 pour un conducteur métallique et est égale à 1 pour les jauges semi-conductrices. [10]

Le support isolant est en papier ou, le plus souvent, en plastique. C'est ce support qui est collé sur la pièce dont on veut connaître les déformations et c'est lui qui transmet les déformations au circuit imprimé métallique. On conçoit que, pour transmettre avec fidélité les déformations, le support doit avoir des caractéristiques bien particulières (bonne aptitude au collage, coefficient de dilatation pas trop important afin d'éviter un décollage de la jauge par cisaillement, l'adhérence ou la faculté du support de pouvoir être bien collé au circuit métallique...). On peut encore différencier les jauges métalliques par la réalisation de la grille. En effet, il existe des jauges dites à fil et d'autres dites à trame pelliculaire comme elle est montrée dans la figure III.5. C'est les plus fréquentes ; elles sont réalisées selon les procédés de fabrication des circuits imprimés [10].

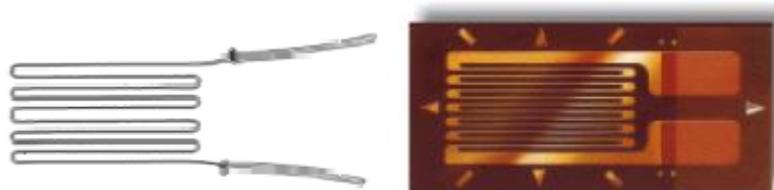


Figure III.5 : Jauge à fil et jauge à trame pelliculaire

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

$$R = \rho L/S \quad \text{(III.12)}$$

où R est la résistance électrique

ρ : La résistivité du matériau

L : La longueur du fil

S : La section du fil

III.6.3 Différents types de jauges

On donnera un aperçu sur les types de jauges utilisées en analyse des contraintes. Chaque type correspond bien évidemment à une application particulière.

III.6.3.1 Les jauges simples

Ce type est utilisé pour la mesure des déformations en vue du calcul des contraintes. Elles ont des formes classiques avec une grille rectangulaire.

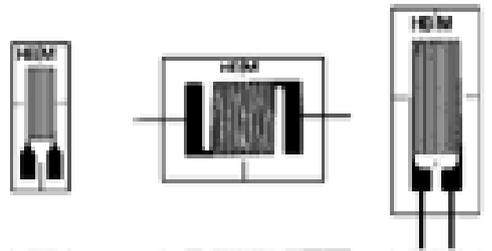


Figure III.6 : Jauge simple

III.6.3.2 Les minis et micros jauges

Les minis et les micros jauges sont utiles aux points de concentration de contraintes. Certaines ont des dimensions de l'ordre de 0.2 mm. (Chainette de jauges).

III.6.3.3 Rosettes

Ce sont des associations de jauges fixées sur un support unique et dont les directions des brins font entre elles des angles parfaitement définis. Elles sont utilisées quand on souhaite connaître simultanément les déformations dans plusieurs directions. Lorsque les directions principales des déformations sont inconnues, il faut pour les déterminer mesurer les déformations dans trois directions : on emploie pour cela des rosettes de 3 jauges à 120° ; lorsque l'une des directions principales est présumée probable, on utilise des rosettes à 45° , la jauge centrale étant alignée avec cette direction. Les rosettes à deux jauges perpendiculaires sont utilisées quand on connaît les directions principales de déformation. D'autres rosettes à deux jauges sont adaptées à la mesure des déformations de torsion.

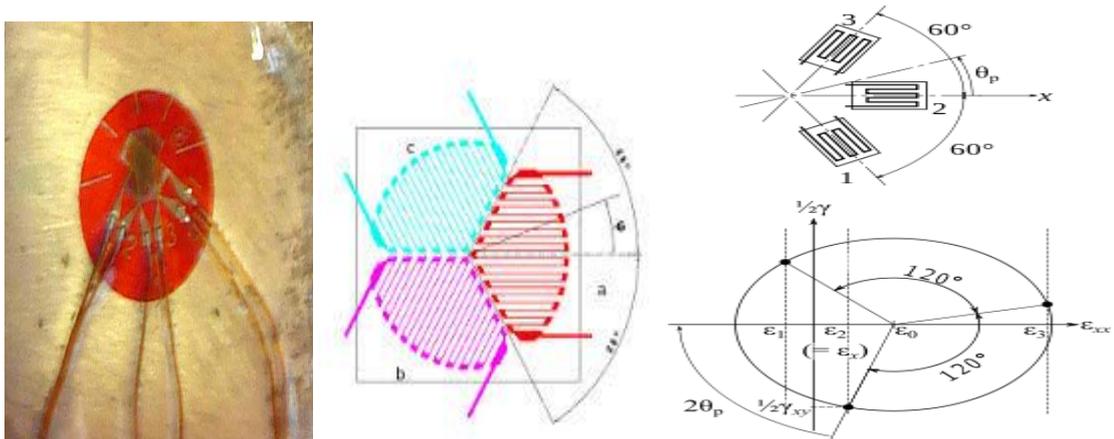


Figure III.7 : Rosette de jauges

III.6.3.4 Les jauges des contraintes résiduelles

Tous les procédés de fabrication (usinage, soudage,...Ets) induisent ou/et modifient les contraintes résiduelles. Afin de mesurer ces contraintes, on colle la jauge à l'endroit où l'on souhaite faire la mesure, ensuite on perce un trou à l'endroit indiqué sur la jauge Enfin mesure les contraintes induites par les jauges (figure III.8).



Figure III. 8 : Jauges de contraintes résiduelles



Figure III.9 : Perçage de la jauge de contraintes résiduelles

III.6.3.5 Les jauges longues

On utilise les jauges longues (figure III.10) pour mesurer la moyenne d'une déformation intégrée sur une certaine longueur, par exemple sur des matériaux hétérogènes, tel que le béton.



Figure III.10 : Jauge longue

III.6.3.6 Les jauges de contrainte optiques

Les jauges de contrainte optiques représentées dans la figure III.11, sont conçues à partir des fibres de verre ayant un diamètre de noyau très petit, pas plus de 4 à 9 microns. En comparaison, le diamètre des cheveux humains est de 60 à 80 microns. Le noyau de la fibre est entouré par une couche de verre le plus pur qui soit avec un diamètre de 125 micromètres.



Figure III.11 : Jauge de contrainte optique

Comme on a vu qu'il y a plusieurs types de jauges, on peut dire généralement que les jauges sont différentes à cause de leurs matières de construction elles peuvent être métalliques ou semi conductrices. Ces dernières sont constituées de Silicium comme matériau de jauge plutôt qu'un alliage métallique. Le principal intérêt réside dans le facteur de jauge accru d'un facteur 50. Dans ce dernier cas on évite ainsi toutes les opérations de montage des jauges sur une membrane. Cependant le silicium présente l'inconvénient majeur d'avoir un fort coefficient de dérive thermique.

Il y a deux présentations différentes des jauges semi-conductrices qui sont la conséquence de leur mode de fabrication : les jauges découpées et les jauges diffusées.

- *Les jauges découpées* sont formées d'un brin unique découpé mécaniquement ou photo chimiquement dans un monocristal de silicium dopé. Le brin est parallèle à la diagonale du cube cristallin pour le silicium. Ordre de grandeur des dimensions :

Longueur : de quelques 10^{-1} [mm] à quelques mm ; épaisseur : quelques 10^{-2} [mm]. Le brin est collé sur le support en plastique. Étant formées d'un brin unique, ces jauges ont une sensibilité transversale pratiquement nulle.

- *Jauges diffusées* : ce type de jauge a une résistance qui est réalisée par diffusion d'impuretés dans une partie d'un substrat de silicium monocristallin déjà dopé.

Les jauges métalliques sont utilisées pour la mesure précise de déformations pouvant atteindre des amplitudes importantes et dans des domaines de température étendus. Les résistances de jauges, métalliques ou semi-conductrices, ont des valeurs standard définies de + 0,2 à + 10 % près et comprises entre 100 Ω et 5000 Ω .

III.6.4 Effets parasites

III.6.4.1 Effet de la température

La relation entre la variation relative de résistance de la jauge de déformation et de la déformation de la structure à étudier a été établie avec l'hypothèse de température constante. Ce paramètre expérimental peut varier pendant des manipulations de durée assez longue et il a trois effets physiques majeurs :

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

- La dilatation de matériaux,
- La variation de résistivité du matériau de la jauge,
- La variation des caractéristiques mécaniques du matériau de la structure.

Les coefficients de dilatation thermique du matériau de la jauge(α_j), et du matériau de la structure étudiée(α_s), sont en général différents et toute variation de température entrainera une déformation différentielle thermique entre le (bilame), constitué par la jauge et la surface ou elle est collée, de valeur égale à :

$$d\varepsilon_{th} = (\alpha_s - \alpha_j) \cdot dT \quad \text{(III.13)}$$

Les fabricants de jauges mettent à disposition des utilisateurs des matériaux auto-compensés en température. Ces matériaux sont des alliages de composition particularisée pour que leur coefficient de dilatation thermique soit voisin de celui du matériau de la structure à équiper dans une plage d'une dizaine de degrés autour de la température ambiante. Ce type de jauge permet dans cette plage, de réduire d'un ordre de grandeur la déformation d'origine thermique.

Ces jauges auto-compensées existent pour des matériaux courants : aciers, alliages légers, fontes...pour les autres matériaux et pour des variations plus importantes de température on a recours à des montages de mesure pour éliminer cette variation parasite par rapport à la déformation d'origine mécanique à mesurer.

L'effet de la température sur la résistivité du matériau de jauge est pris en compte globalement avec la dilatation de la jauge avec l'influence sur le facteur de jauge K. Pour les jauges à base de matériaux métalliques, cette variation de K est de 0.004 % par ° C environ, elle est donc négligeable en première approximation pour des variations de température de 10° C. Dans le cas des jauges semi-conductrices, l'effet de la température est plus important, les variations sont dans ce cas dix fois plus importantes pour des jauges à très fort facteur de jauges et nécessitent l'emploi de circuits correcteurs. Le dernier effet de la température à prendre en compte concerne la sensibilité du module d'élasticité longitudinale du matériau de la structure à étudier. En général, cette propriété mécanique diminue quand la température augmente. Le module de l'acier diminue de 0.026 % par degré Celsius autour de 20 ° C, celui des alliages légers de 0.058 %. Cette influence est faible si l'on ne considère que les variations de la température ambiante. Elle n'a de l'influence que sur la conversion des déformations mesurées en contraintes subies par le matériau de la structure lors de

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

l'application de la loi de Hooke, ou sur les facteurs d'étalonnage des capteurs de force. Cet effet peut être une source d'erreur si la température du matériau de la structure située sous la jauge s'échauffe trop sous l'effet joule, avec un pouvoir de dissipation de la chaleur trop faible. Ce cas peut se produire avec une tension d'excitation trop élevée pour les jauges collées sur un matériau isolant ou mauvais conducteur. [12]

D'une part, la dilatation différentielle entre jauge et support, d'autre part, les effets thermoélectriques liés à un écart de température entre deux points de raccordement (on peut éliminer ce problème en alimentant les jauges en alternatif).

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). [12]

III.6.4.2 Effet d'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. On peut aussi contrôler la dureté des feuilles de constantan. [12]

III.6.4.3 Erreur de linéarité

Un capteur présente une erreur de linéarité lorsque la courbe force-signal capteur n'est pas une droite parfaite. L'erreur de linéarité d'un capteur de force dépend du design du capteur (par exemple, lorsque la force croît, la répartition des forces varie ce qui influence la linéarité), mais aussi le 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. [12]

III.7 Principe de fonctionnement d'une jauge d'extensométrie

Ce principe est basé sur une mesure de variation relative d'une résistance d'un conducteur ohmique. Les jauges collées sur les structures sont des circuits résistifs.

La résistance du fil conducteur est définie par la loi de Pouillet comme étant :

$$R = \frac{\rho L}{A} = 4 \frac{\rho L}{\pi d^2} \quad (\text{III.14})$$

Où

R: Résistance du conducteur (Ω)

ρ : sa résistivité ($\Omega \cdot m$)

L: sa longueur (m)

A: sa section (m^2)

d : le diamètre du fil conducteur

Cette propriété physique d'un conducteur peut varier en fonction de la température et de son état de déformation ; la différenciation de l'expression de R.

Cette expression est dérivée pour trouver les sources des petites variations de résistance.

$$dR = \frac{\rho}{A} dL - \frac{\rho L}{A^2} dA + \frac{L}{A} d\rho \quad (\text{III.15})$$

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 :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} \quad \text{(III.16)}$$

Qui peut se réécrire

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \text{(III.17)}$$

Où K est appelé le *facteur de jauge*.

Le conducteur étant fixé sur un support isolant, lui-même collé sur la structure étudiée, il subit une déformation identique à celle de la structure, dans une direction parallèle ou non aux brins, ce qui entraîne une déformation $\Delta l / l$.

La résistance de la jauge métallique ayant pour expression : $R = \frac{\rho nL}{A}$ sous l'influence de la déformation elle varie de ΔR tel que :

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad \text{(III.18)}$$

La déformation longitudinale du fil entraîne une variation de ses dimensions transversales : côtés a et b , pour une section rectangulaire, diamètre d pour une section circulaire ; la déformation transversale est proportionnelle à la déformation longitudinale.

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{\Delta b}{b} = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \frac{\Delta l}{l} \quad \text{(III.19)}$$

Où ν est le coefficient de poisson, voisin de 0.3 dans la zone de la déformation élastique.

Il en résulte puisque : $A = a \cdot b$ où $A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2$

$$\frac{\Delta A}{A} = -2\nu \frac{\Delta l}{l} \quad \text{(III.20)}$$

Les jauges métalliques et semi-conductrices se distinguent par l'expression et l'importance de la variation de résistivité $\Delta \rho / \rho$. Pour les jauges métalliques une relation due à Bridgman lie la variation du volume V à la variation de résistivité

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V} \quad \text{(III.21)}$$

C étant la constante de Bridgman

$$\text{Comme } V=A.l, \frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l} \text{ et } \frac{\Delta \rho}{\rho} = c(1 - 2\nu) \frac{\Delta l}{l}$$

$$\text{On déduit alors } \frac{\Delta R}{R} = [(1 + 2\nu) + c(1 - 2\nu)] \frac{\Delta l}{l} = K \frac{\Delta l}{l} \quad \text{(III.22)}$$

$\frac{\Delta A}{A}$ et $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ pouvant s'exprimer en fonction de $\frac{\Delta L}{L}$, $\frac{\Delta R}{R}$ s'écrit sous la forme :

$\frac{\Delta R}{R} = k \frac{\Delta L}{L}$, où K, appelé facteur de jauge, a pour expression : $K = 1+2\nu+C (1-2\nu)$, où ν est le coefficient de Poisson et C la constante de Bridgman. Compte tenu des valeurs numériques ($\nu = 0,3$ et $C = 1$ environ) le facteur de jauge K est généralement de l'ordre de 2.

Le facteur de jauge k est le coefficient de proportionnalité entre $\Delta R/R$ et $\Delta L/L$. Il dépend du conducteur utilisé pour la fabrication de la jauge et quantifie sa sensibilité. Pour le constantan, l'alliage préféré pour la construction des jauges métalliques, le coefficient de Poisson ν est voisin de 0,3 et la constante de Bridgeman c de 1, d'où un facteur de jauge légèrement supérieur à 2. Le constantan (Cu-44%Ni-1%Mn) se caractérise par des propriétés mécaniques acceptables, par une excellente résistance à la corrosion et dispose surtout d'une résistivité qui est pratiquement indépendante de la température.

($\rho = 49 \mu\Omega cm$ et $\left(\frac{1}{\rho}\right) * \left(\frac{d\rho}{dT}\right) = \pm 40 ppm/K$ entre 0 et 100 °C). Comme la variation de la résistance électrique due à la déformation est très faible, une bonne stabilité thermique de la résistance est indispensable.

Pour les jauges semi-conductrices, la constante C est beaucoup plus élevée que pour les métaux et k peut atteindre des valeurs supérieures à 100. Comme malheureusement, la limite élastique des semi-conducteurs est fort inférieure à celles des métaux, l'application des jauges semi-conductrices est limitée aux mesures de faibles déformations. De plus, la résistance électrique varie très fortement avec la température. La plage des déformations mesurables avec les jauges est de 10^{-8} à 10^{-3} (10^{-6} à 10^{-1} en %) avec une précision qui peut atteindre 0,1%.

La variation relative de résistance étant de l'ordre de la déformation, déformation qui vaut tout au plus quelques %, on a toujours $\Delta R \ll R$ dans le cas des jauges métalliques.

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

Les matériaux utilisés sont généralement à base d'alliages de Nickel ; les jauges qui sont mises en œuvre dans la manipulation sont constituées d'un alliage de Nickel-Cuivre (Constantan) dont le facteur **K** est précisément égal à **2,1**.

Alliages	Nom commercial	Facteur de jauge
Nickel- Cuivre	Constantan	2 à 2.1
Nickel- Chrome	Karma	2.1 à 2.2
Nickel- Fer- Chrome	Isoélastic	3.2 à 3.6
Platine- Tungstène		4 à 4.6
Silicium mono- cristal	Semi- Conducteur	50 à 200

Tableau III .1 : Nom commercial et facteur de jauges de quelques alliages [10]

Les jauges en constantan sont les plus utilisées avec les géométries adaptées à l'extensomètre générale (jauges doubles, rosettes a 90°, 120°, chainette pour mesure de gradients de déformation, etc....).

Le karma a des propriétés de sensibilité à la température particulièrement bien adaptées aux variations des propriétés mécaniques des aciers ; il est souvent retenu pour les capteurs de précision en acier.

L'iso-élasticité a de très bonnes propriétés de résistance à la fatigue, il est donc retenu pour toutes les mesures dynamiques ou les phénomènes vibratoires ont une influence importante sur les durées de vie.

La platine-tungstène a une sensibilité double des autres matériaux et peut ainsi permettre d'améliorer la précision de mesure pour de faibles déformations. Le silicium est évidemment dans le domaine des fortes sensibilités, le mieux adapte théoriquement ; son emploi en extensométrie courante se heurte à la fragilité des monocristaux qui imposent des techniques de collage sans pression, et ne tolèrent aucune courbure des surfaces des structures à équiper.

A l'exception de ce dernier type de matériau, la variation relative de la résistance d'une jauge de contrainte est donc du même ordre de grandeur que la déformation à mesurer. Sachant que celle-ci dans le domaine élastique des matériaux est bornée par la limite élastique et le module d'élasticité longitudinale. On peut déduire que les mesures extensométriques sur des aciers avec $\sigma_e = 100$ [MPa] au maximum et $E = 200\ 000$ [MPa] conduiront à des déformations très inférieures à 0.5 % et sur de l'aluminium avec $\sigma_e = 500$ [MPa] et $E = 70\ 000$

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

[MPa] à des déformations inférieures à 0.7 %. Le domaine des mesures habituelles est en générale de l'ordre de 0.1 % sauf sur des matières de synthèse comme les polymères ou les résines ou dans le domaine plastiques des métaux.

Les jauges sont en général conçues pour supporter 2 à 3% de déformation. Des traitements thermiques spéciaux du constantan permettant de porter son domaine d'utilisation jusqu'à 10 %. Dans le cas de l'iso-élastique, il faut limiter son utilisation à 0.5 % pour garder un facteur de jauge constant. Cette évaluation des variations relatives de résistance entraînées par les déformations « usuelles » indique la précision imposée pour la mesure de cette propriété électrique traduisant la quantité mécanique à évaluer.

	métallique	semiconducteur
plage de mesure	$10^{-7} \dots 0.04$	$10^{-9} \dots 0.003$
facteur de jauge	1.8 ... 2.35	50 ... 200
résistance Ω	120, 350, ..., 5'000	1'000, ..., 5'000
tolérance de la résistance	0.1% ... 0.2%	1% ... 2%
taille, mm	0.4 ... 150 standard : 3 ... 6	1 ... 5

Tableau III 2 : Caractéristiques typiques des jauges [10].

III.8 Mesure de Champ de déformation quelconque avec jauge de contrainte

Lors de l'établissement de la relation entre la variation de résistance du conducteur formant la jauge et la déformation mesurée, il a été suppose un état de déformation particulier correspondant à une traction uniforme de direction parallèle à celle du conducteur. En générale à la surface d'une pièce, l'état de contrainte plane est quelconque avec deux contraintes principales non nulles suivant deux directions principales inconnues à priori comme on montre dans la figure III.11. De plus, dans le cas des jauges réelles, le conducteur forme de boucles à des parties non parallèles à la direction générale de la grille qui sera sensibles aux déformations transversales.

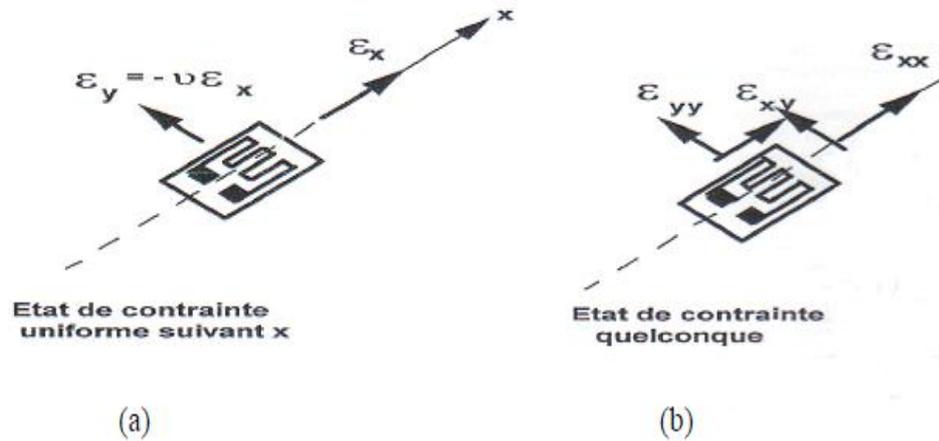


Figure III. 12 : État de contrainte [10]

III.9 Changement de résistance des jauges provoqué par la déformation

Les variations de résistance des jauges soumises à des déformations sont donc assez faibles. Pour leur mesure, on fait appel à des méthodes de zéro avec pont de Wheatstone simple ou double, ou des méthodes de mesure directe de déséquilibre de pont avec amplification importante permettant soit des lectures directes, soit des acquisitions de données

III.9.1 Pont de Wheatstone

Un pont de Wheatstone (figure III.12) est un moyen de mesure inventé par Samuel Hunter Christie. Il est utilisé pour mesurer une résistance électrique inconnue par équilibrage de deux branches d'un circuit en pont, avec une branche contenant le composant inconnu.

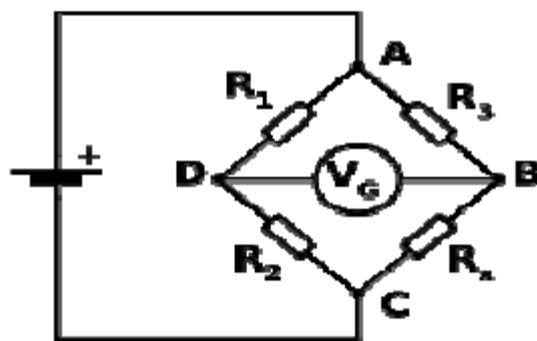


Figure III. 13 : Pont de Wheatstone [12]

Le pont est constitué de deux résistances connues, R_1 et R_2 , d'une résistance variable de précision, R_3 , et d'un galvanomètre ou voltmètre sensible G.

Chapitre III : Mesure des contraintes et des déformations à l'aide des jauges d'extensométrie

Le potentiel au point de jonction entre R1 et R2 (nœud D) est obtenue grâce au théorème de Millman et vaut : $V.R_2 / (R_1 + R_2)$, ou V est la différence de potentiel aux bornes de la pile. Si nous plaçons entre R3 et la masse une résistance inconnue Rx, la tension au point de jonction entre R3 et Rx vaut : $V.R_x / (R_3 + R_x)$. Ajustons R3 de façon à annuler le courant dans le galvanomètre ; la différence de potentiel aux bornes de celui-ci est donc nulle. En égalant les deux tensions calculées ci-dessus, l'on trouve :

$$R_x = R_3 \cdot R_2 / R_1 \qquad \text{III.23}$$

En pratique, le pont de Wheatstone comporte un ensemble de résistances calibrées, de façon à pouvoir mesurer une large gamme de valeurs de Rx avec une seule résistance de précision ; il suffit de changer le rapport R1/R2. Par ailleurs, la même technique peut être utilisée pour mesurer la valeur de condensateurs (pont de Sauty) ou d'inductances (pont de Maxwell). On remplace la source de tension continue par une source de tension alternative et la résistance de précision par un condensateur ou une inductance de précision. A l'équilibre du pont (courant nul dans le galvanomètre), le rapport des impédances dans la branche réactive est égal au rapport des résistances.

Comme le pont n'est jamais parfait, on sera amené à ajouter une compensation de dérivé de température du coefficient de jauge ainsi qu'un dispositif d'équilibrage du zéro. Dans ces conditions l'électronique associée pourrait être du type de celle (figurée III.14) :

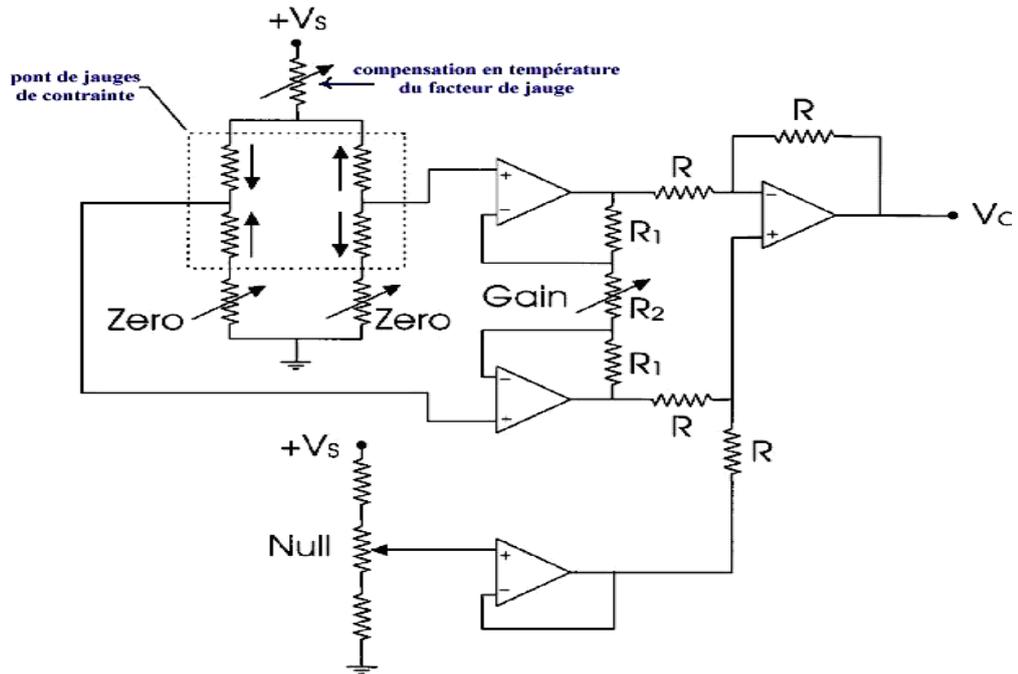


Figure III. 14 : Circuit de conditionnement associé à un capteur de pression à pont de jauge[18]

Les capteurs à jauges peuvent se présenter sous de nombreuses apparences selon leur destination. A titre indicatif et non limitatif nous donnons ci-dessous quelques exemples.

La mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de la résistance de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone (voir figure III.14).

III.9.2 Différents montage du pont

Le montage peut être réalisé avec une seule jauge active (montage dit en quart de pont), deux jauges actives (demi-pont) ou encore quatre jauges actives (pont complet). Ce dernier montage est le montage le plus couramment utilisé pour les capteurs (force, pression...).

1) Montage en quart de pont

Dans la figure III.15 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 la somme des variations de tension rencontrées sur les câbles de liaison. A 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) se 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%.
- Des corrections sont indispensables à ce type de montage tel que l'étalonnage (shunt) du système de mesures.

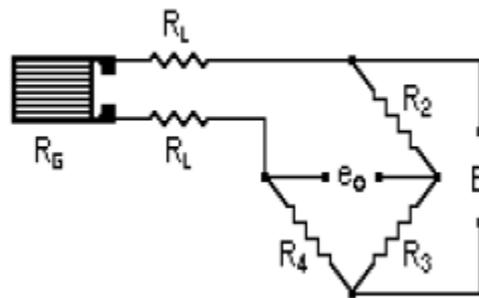


Figure III. 15 : Montage en quart de pont [18]

2) Montage en demi-point

Le montage demi-point représenté par la figure III.16 est couramment utilisé lorsque l'on souhaite faire des corrections en température.

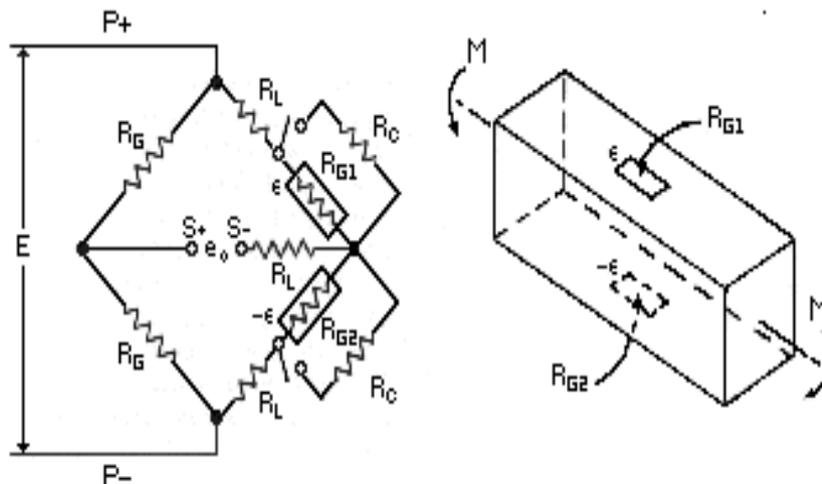


Figure III. 16 : Montage en demi-point [18]

3) Montage en pont complet

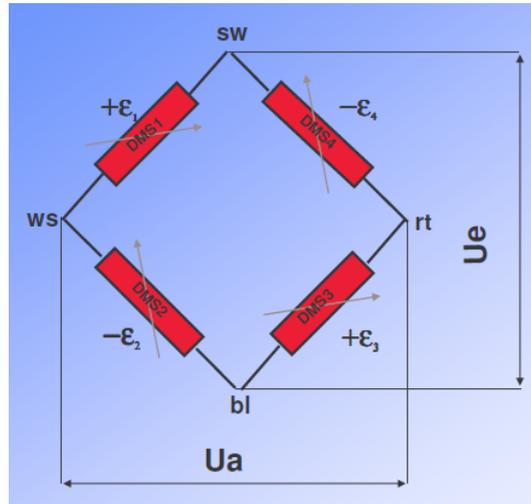


Figure III.17 : Montage en pont complet

Soit un circuit constitué de quatre résistances R_1, R_2, R_3, R_4 montées en pont complet. On alimente par une source électromotrice V_e suivant la diagonale AC. À l'équilibre la tension V_s est nulle mais la variation d'une quelconque des résistances fait apparaître une tension V_s entre B et D.

Pour de très faibles variations (de l'ordre du microhms pour les jauges de contraintes), la sortie V_s est proportionnelle aux variations relatives $\Delta R/R$ de chacune des résistances. En négligeant les termes d'ordres supérieurs, elle vaut :

$$V_s = \left(\frac{V_e}{4}\right) * \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) \tag{III.24}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4}\right) \tag{III.25}$$

$$\frac{\Delta R_i}{R_i} = k \epsilon_i \tag{III.26}$$

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{k}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \tag{III.27}$$

III.10 Conclusion

Les jauges de contraintes sont aujourd'hui fabriquées dans une multitude de types différents, qui permettent de couvrir tous les problèmes de mesure, et ce même dans des conditions d'utilisation les plus dure. Les jauges des contraintes sont des capteurs très utilisées dans la mesure des déformations dans tous les domaines.

Les principaux champs d'application sont :

- L'analyse expérimentale des contraintes
- La biomécanique
- Les capteurs

Chapitre IV : Essai de traction

IV.1 Introduction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques telles que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Ce chapitre a comme objectif de faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction ; d'interpréter les diagrammes de traction (déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture).

IV.2 Les éprouvettes

L'essai de traction est effectué soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte uniaxiale, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette. Afin d'éviter toute influence de la force pinçante des mors, elles doivent être suffisamment loin des points d'amarrage. Les têtes ont une section supérieure à celle de la partie cylindrique ou rectangulaire de façon qu'elles ne subissent aucune déformation plastique et qu'elles ne cassent pas en premier. Comme la limite d'écoulement plastique dépend aussi des contraintes latérales, on doit essayer d'éviter toute influence de la force pinçante des mors. Ceci n'est pas un détail que l'on doit respecter seulement lorsqu'on effectue l'essai de traction. Dans la pratique aussi, on doit garder à l'esprit que la limite

d'écoulement plastique déterminée dans un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uniaxiale. L'éprouvette fixée par ses têtes, entre deux mordaches, est soumise à un effort de traction suivant son axe. Une longueur de base L est définie par la distance séparant les deux repères que constituent les points d'attache de l'extensomètre. Les repères sont à tracer très finement, afin qu'ils ne puissent pas constituer des amorces de rupture.

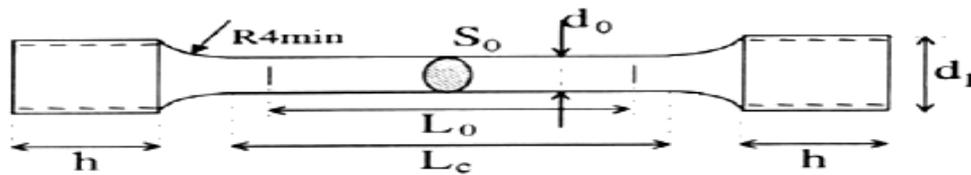
En augmentant l'effort de façon continue, il y a d'abord l'allongement élastique uniforme et puis, au-delà de la limite d'écoulement plastique (= limite d'élasticité), l'allongement plastique qui s'y ajoute. Au début, la déformation plastique est encore uniforme mais vers la fin lorsque la rupture s'approche, il y a apparition d'une striction (déformation non uniforme) et rupture.

Au-delà de la limite élastique, la courbe de traction force = $f(\text{allongement})$ ne dépend pas seulement de la déformation, mais aussi des dimensions géométriques de l'éprouvette.

Lorsque la déformation commence à se localiser et ne se produit qu'à l'endroit de la striction, il importe par quelle longueur L (longueur de mesure initiale) on divise l'allongement L pour obtenir la déformation moyenne. Afin de pouvoir comparer deux allongements à la rupture, on doit donc se baser sur des règles de similitude. L'expérience a montré que l'allongement relatif de deux éprouvettes mesuré sur la base d'une longueur L ne dépend pas de la forme de la section droite (aire initiale S_0) si le produit $L_0 S_0$ est le même. Pour pouvoir comparer les résultats provenant de différents laboratoires, les normes fixent ce rapport à $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5.65$ soit, $L_0 = 5.65 \cdot \sqrt{S_0}$ pour les éprouvettes cylindriques (diamètre d_0), ou alternativement $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 11.3$ soit,

$L_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0}$. Mis à part les dimensions géométriques, le prélèvement des éprouvettes n'est pas sans influence sur la courbe de traction. Les propriétés élastiques et plastiques sont fortement anisotropes, c.-à-d. dépendantes de la direction de traction par rapport aux axes cristallographiques. Pour les échantillons polycristallins, on admet habituellement que les axes cristallographiques des grains soient orientés au hasard et que, de ce fait, ils ont des propriétés isotropes. Or cette supposition n'est pas toujours justifiée. Notamment des produits laminés, emboutis, martelés ou tréfilés présentent souvent des textures importantes. Ceci les place entre les monocristaux et les polycristaux et la direction selon laquelle l'éprouvette est prélevée n'est donc pas sans importance.

Les éprouvettes avec têtes filetées, sont très souvent utilisées en raison de sa fixation simple et sûre, en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer des essais de traction avec des extensomètres de précision.



d_0 = \varnothing partie calibrée
 d_1 = \varnothing des têtes filetées
 L_0 = longueur entre repère = $5 d_0$
 L_c = longueur calibrée
 h = longueur des têtes

Figure IV.1 : éprouvette de traction cylindrique

IV.3. Machines d'essais de traction

Une machine de traction moderne dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce aux micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches.

Le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex. : pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement). Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les céramiques, qui ne peuvent pas s'adapter. De même toute composante de torsion est à éviter.

L'effort est exercé par l'entraînement soit mécanique soit hydraulique sur l'une des fixations. Un système de réglage assure une vitesse de déformation constante. Ce système permet également d'effectuer des cycles de déformation (p.ex. : vitesse d'accroissement constante, cycles sinusoïdaux, etc.) ou d'imposer la contrainte au lieu de la déformation. Bien que les machines de traction soient rigides, il ne suffit normalement pas de prendre le déplacement de la traverse comme mesure pour l'allongement. Notamment pour des éprouvettes courtes, l'allongement élastique du bâti de la machine et des dispositifs d'amarrage n'est d'habitude pas négligeable par rapport à celui de l'échantillon. Il est en tout cas préférable de fixer un extensomètre aux extrémités de la longueur de mesure et d'utiliser

ce signal pour tracer les courbes. Ce signal est indispensable pour régler le déplacement de la traverse lorsqu'on veut effectuer un essai de traction à vitesse de déformation constante, ce qui est le mode d'essai préféré. Comme alternative, on peut régler le déplacement de la traverse de façon à ce que la contrainte de traction ou de compression augmente selon une fonction du temps prédéfinie (fatigue oligocyclique à amplitude de contrainte constante). Un troisième mode de réglage, enfin, constitue le contrôle direct de la vitesse de la traverse. Ce mode s'applique lorsqu'on veut uniquement déterminer la résistance à la traction sans fixation d'un extensomètre.

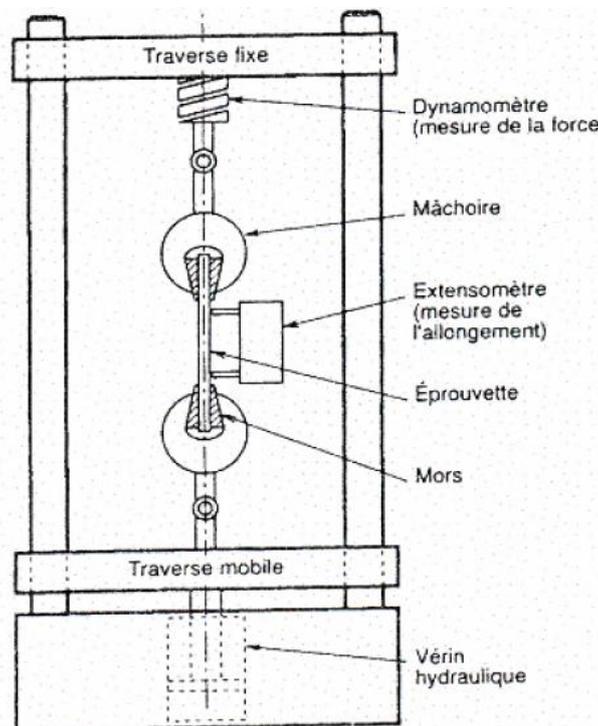


Figure IV.2 : dessin d'une machine traction

Dans les anciennes machines, ces rampes et fonctions du temps ont été générées par des circuits électriques analogiques que l'on a dû brancher avant l'essai dans le circuit de réglage.

L'informatique moderne nous permet aujourd'hui de définir des fonctions à volonté. Elles sont stockées sous formes numériques ou calculées au fur et à mesure par un programme numérique. Le logiciel de contrôle se charge de presque toutes les tâches survenant lors d'un essai, du début jusqu'à la fin des mesures. Le rôle de l'opérateur se réduit au choix du type d'essai à effectuer et à l'échange des éprouvettes. Après le choix du type d'essai, l'opérateur doit entrer les paramètres particuliers pour l'essai prévu. Il s'agit notamment des valeurs pour

la force ou le déplacement maximal, le nombre de cycles, ainsi que des paramètres qui déclenchent un arrêt automatique de l'essai. Souvent ces paramètres se laissent charger en bloc, à partir d'un fichier de paramètres ou d'un fichier de configuration. Avec ces informations, le programme numérique passe à l'initialisation de la machine de traction, des instruments de mesure utilisés pour les signaux reçus du capteur de force et l'extensomètre (voltmètre digital, convertisseur analogue digital).

Bien que les ordinateurs modernes et leurs systèmes d'exploitation soient devenu très fiables, on ne peut jamais écarter l'éventualité d'une panne (blocage de l'ordinateur, rupture d'un câble électrique, paramètres incompatibles). Dans ce cas, la traverse risque de se déplacer, sans aucun contrôle, avec la dernière vitesse imposée. La perte de l'éprouvette n'est généralement pas grave mais les dégâts qui peuvent se produire à l'extrémité de la course, éventuellement après écrasement de l'extensomètre, risquent d'imposer une fin prématurée à la série des mesures en cours. Pour éviter ces dégâts, les machines de traction doivent être dotées d'interrupteurs de fin de course qui agissent directement sur l'alimentation du moteur.



Figure IV.3 : machine de traction avec acquisition de données

IV.4. Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = F/S_0 \qquad \text{IV.1}$$

De même la déformation ε , se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale).

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad \text{IV.2}$$

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. Ils sont obtenus en divisant la force ou l'allongement par la section, respectivement la longueur instantanée. Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. La figure IV.4 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux.

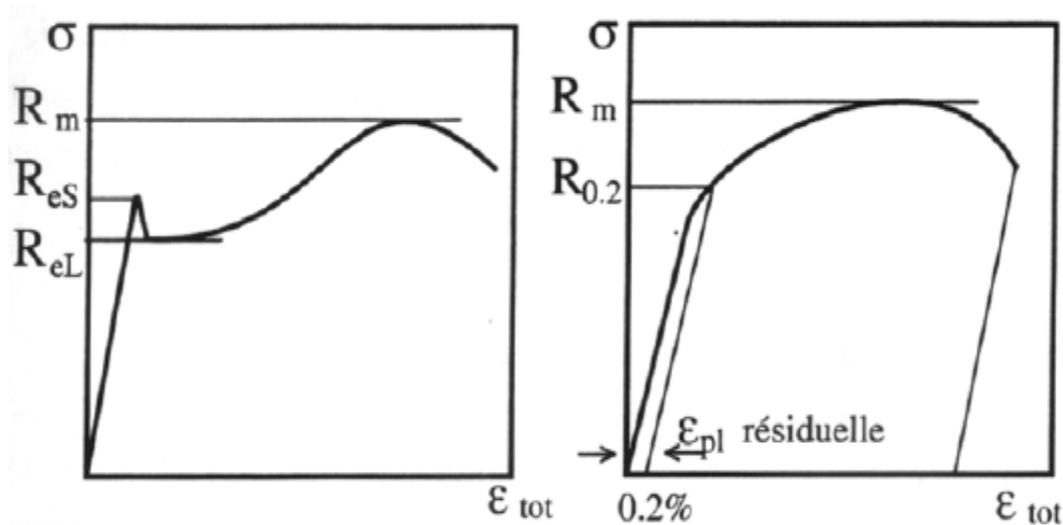


Figure IV.4 : Schéma représentant deux types différents de courbes de traction. [2]

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

IV.4.1 Courbe rationnelle de traction

Dans l'essai de traction, on mesure les efforts rapportés à la section initiale de l'éprouvette. Il existe une représentation de la courbe de traction, de plus en plus utilisée en laboratoire, qui consiste à reporter la contrainte vraie σ en fonction de la déformation rationnelle ε^* ; c'est la courbe rationnelle de traction. [14]

L'allure d'une telle courbe est représentée sur la figure ci après.

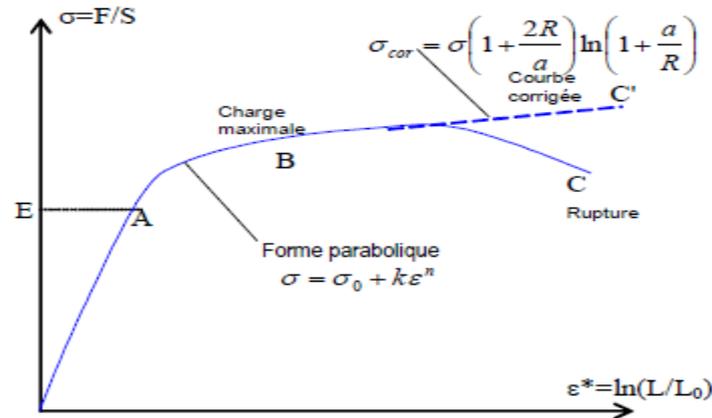


Figure IV.5 : Courbe rationnelle de traction [14]

Sur cette courbe il n'y a pas de différence avec le tracé ordinaire pour la partie élastique et la limite d'élasticité R_e , car les déformations élastiques sont très faibles entre la limite d'élasticité et le point correspondant à la charge maximale, la courbe a une forme parabolique.

a) Équation de la courbe rationnelle

La portion d'allure parabolique de la courbe rationnelle peut être mise sous forme mathématique. L'expression la plus utilisée est la parabole généralisée de la forme :

$$\sigma = \sigma_0 + k\varepsilon^n \quad \text{IV.3}$$

σ_0 , k et n étant des constantes.

Pour les aciers doux, on observe expérimentalement que σ_0 est nul, d'où l'emploi de la formule simplifiée :

$$\sigma = k.\varepsilon^n \quad \text{IV.4}$$

b) Le coefficient d'écroutissement n .

Il caractérise la propension (disposition) de l'acier à se durcir au cours de la déformation dans le domaine plastique (plus n est élevé, plus l'acier se consolide vite) et à subir une déformation en expansion. Si dans le domaine élastoplastique la contrainte croît en même temps que la déformation alors on dit que le matériau est écroutissable. Si on supprime la charge avant d'atteindre σ_{Max} alors la courbe revient parallèle au domaine élastique ; l'éprouvette s'étant allongée de ε résiduel. Si on soumet de nouveau cette éprouvette à un essai, on s'aperçoit que σ_{Max} a augmenté. L'écroutissement est souvent un inconvénient dû à un procédé de fabrication, mais peut-être exploité comme traitement mécanique.

IV.4.2 Caractéristiques mécaniques

IV.4.2.1 Module d'élasticité

Le module d'élasticité ou module de Young est défini comme la pente de la partie droite partant de l'origine du diagramme. Sa détermination par un essai de traction nécessite impérativement un extensomètre de bonne précision car la rigidité finie, même de la machine la plus robuste, est susceptible de modifier cette pente. Lorsque l'éprouvette n'est pas proprement alignée, la première partie de la courbe est arrondie. Dans la pratique il n'est d'ailleurs pas facile de commencer les mesures exactement à la force 0, car la fixation rigide d'une éprouvette qui résiste à plusieurs tonnes ne va pas sans effort. Le tableau 1 rassemble les valeurs typiques du module d'élasticité pour différents alliages et métaux purs. Comme le module d'élasticité est principalement fonction des forces interatomiques, on constate que celui-ci est relativement peu sensible aux éléments d'alliage, au traitement thermique ou à l'écroutissage. [15]

Matériaux	Module d'élasticité (GPa)
Acier Carbone	210
Fer	211
Alliage de cuivre	124
Cuivre	130
Alliage d'aluminium	72
Aluminium	70

Tableau IV.1 : Valeur typique du module d'élasticité pour différents métaux [15]

IV.4.2.2 Limite élastique conventionnelle $R_{p0.2}$

La fixation d'un seuil d'écoulement plastique n'est pas possible sans convention car, même à des contraintes largement en dessous de $R_{p0.2}$, on observe à l'aide des instruments hautement précis des déformations irréversibles. Pour la plupart des constructions mécaniques des déformations aussi faibles sont insignifiantes. On préfère donc une limite plus élevée et aussi plus facilement déterminable. Ainsi on fixe la limite conventionnelle d'élasticité à la contrainte maximum applicable qui laisse, après décharge, une déformation permanente

(plastique) de 0,2 %. Pour la mécanique de précision les exigences sont plus poussées, et on détermine parfois de manière analogue $R_{p0.02}$. La valeur s'obtient en augmentant graduellement la force de traction jusqu'à ce qu'après déchargement, l'allongement résiduel atteigne la valeur cherchée ou on peut aussi tracer une ligne parallèle à la droite élastique passant par $\varepsilon = 0.2\%$. [14]

IV.4.2.3 La limite apparente d'élasticité supérieure/inférieure R_{es} / R_{el}

L'apparition d'une chute de la contrainte, après dépassement de la limite d'élasticité supérieure, est un phénomène que présente le fer, les aciers doux, la plupart des métaux ayant une structure cubique centrée et contenant des impuretés interstitielles, ainsi que plusieurs autres alliages, notamment l'Al-Mg. On y trouve une limite d'élasticité supérieure suivie d'une chute de la contrainte. A partir de là, la déformation augmente à une valeur de contrainte constante, appelée limite d'élasticité inférieure (palier de la courbe). A la fin du palier, la déformation se poursuit suivant le mode habituel. [14]

IV.4.2.4 La résistance à la traction R_m

C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(\Delta L)$ divisée par la section initiale (= maximum de la contrainte nominale).

IV.4.2.5 L'allongement à la rupture A

C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %. En raison de la localisation de la déformation, la majeure partie de l'allongement ne provient que d'une fraction de la longueur L_0 . La valeur de A est donc d'autant plus petite que l'éprouvette est longue. C'est pour cette raison que l'on doit mentionner le rapport L_0/d_0 avec la valeur de l'allongement. On désigne par A_5 et A_{10} l'allongement obtenu sur des éprouvettes ayant un rapport L_0/d_0 de 5 et 10. [14]

IV.4.3 Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction

Il est bien connu que pour un matériau de composition donnée, la courbe de traction dépend fortement de sa microstructure (écroui, recuit à doux, etc.) et de la température à laquelle l'essai est exécuté. De même la vitesse de traction, qui est à spécifier au début de l'essai, effectue une influence non négligeable sur la courbe de traction.

L'influence de la vitesse de traction sur la courbe de traction (fig. 3) s'explique par le fait que la déformation plastique ne suit pas instantanément la variation de déformation ϵ_{tot} imposée (comportement visqueux). Lors d'un incrément rapide et discontinu de l'allongement, l'éprouvette se déforme d'abord élastiquement. Au cours du temps, une partie de cette déformation élastique est transformée en déformation plastique produisant ainsi le phénomène de relaxation de la contrainte. Pour un essai de traction à vitesse de déformation constante, ces deux phénomènes opèrent en même temps et la courbe obtenue dépend de la cinétique et de l'amplitude de la déformation plastique. La courbe $\sigma(\epsilon)$ passe, au-delà de la limite d'écoulement plastique, par un niveau d'autant plus haut que la vitesse de déformation est élevée. La démonstration de cet effet nécessite cependant des vitesses de traction variant d'un à plusieurs ordres de grandeurs.

La vitesse de déformation recommandée pour un essai standard est de l'ordre de 0.4% par s dans le domaine plastique. Aux alentours de la limite élastique, le taux d'augmentation de la contrainte ne devrait pas dépasser une dizaine de MPa par second.

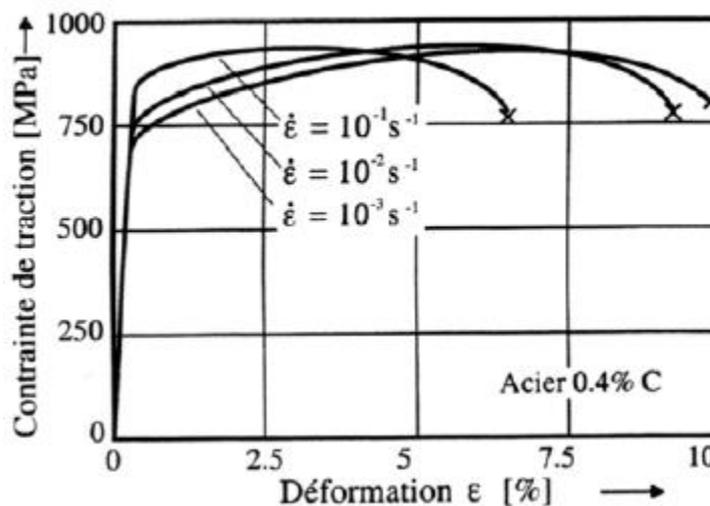


Figure IV.6 : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction [1]

IV.4.4 Influence de la température

Les limites élastiques et de rupture dépendent de la température. Cette propriété est utilisée pour la mise en forme par déformation plastique à chaud (forgeage).

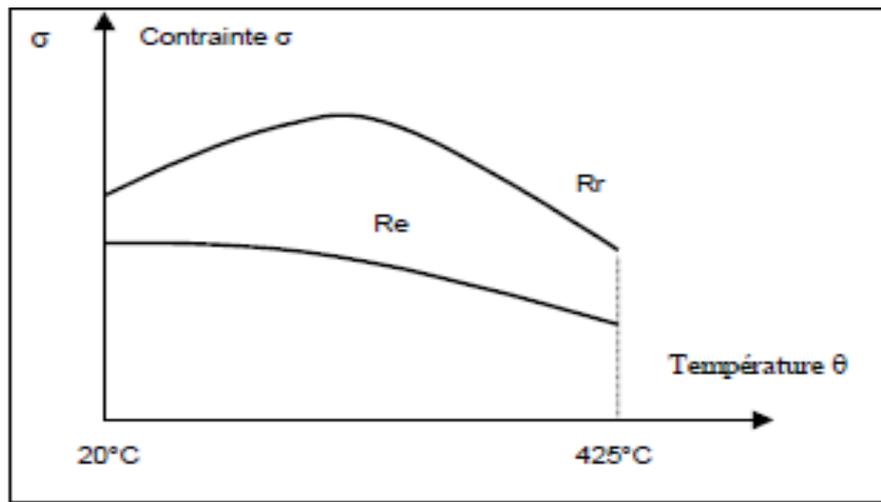


Figure IV.7 : Influence de la température sur la courbe de traction [1]

Remarque : En métrologie, on tient compte du fait qu'un acier admet une dilatation de $1\mu\text{/}^\circ\text{C}/10\text{ mm}$ environ.

IV.5. Exploitations de l'essai

IV.5.1 Interprétation qualitative

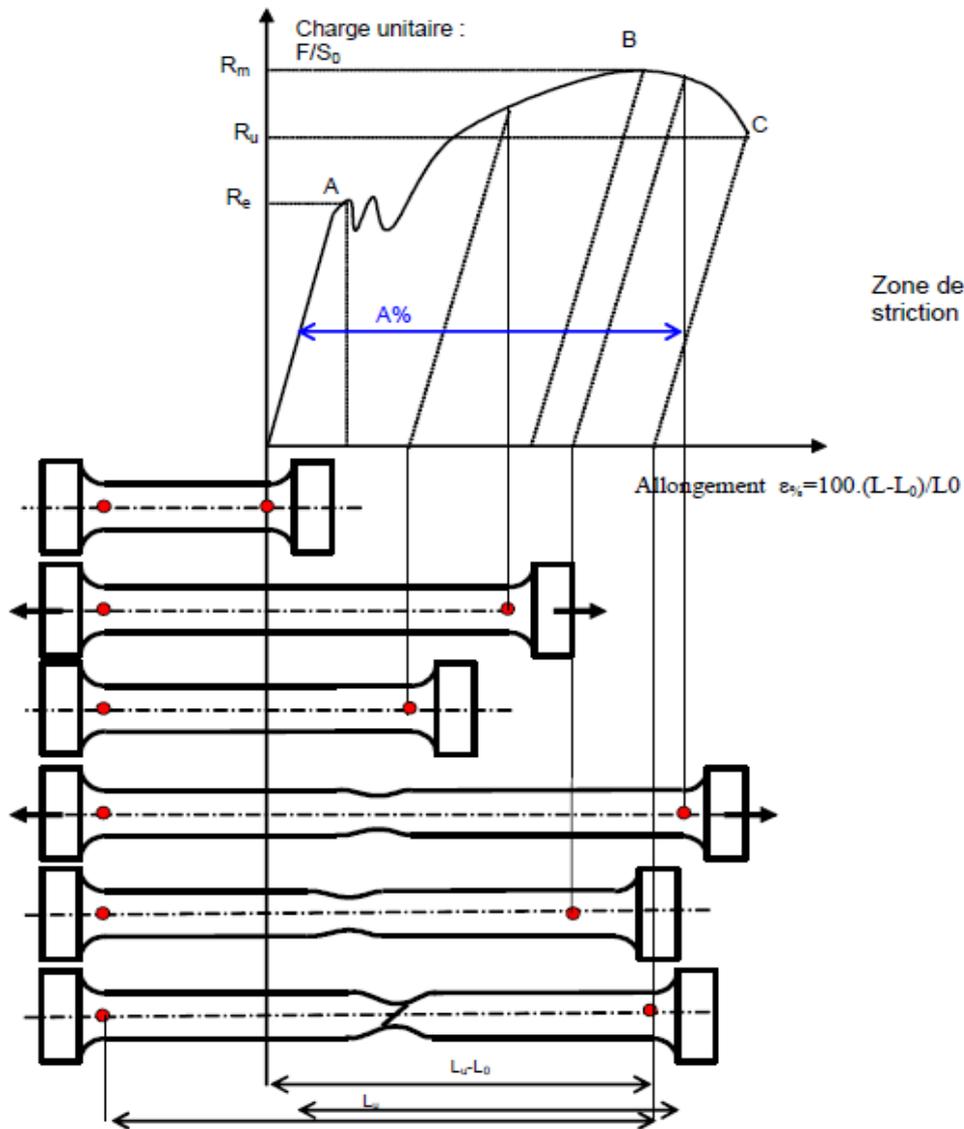


Figure IV.8 : Les différentes phases d'un diagramme de traction [1]

Sur un diagramme effort-déformation, on observe les phases successives suivantes :

Zone OA : domaine des **déformations élastiques ou réversibles** (zone parfois linéaire) si l'on cesse la charge, l'éprouvette retrouve ses dimensions initiales

Zone AB : la déformation n'est plus complètement réversible. La **déformation est plastique (ou permanente)** homogène ; appelée aussi déformation plastique répartie. Les allongements croissent plus vite que les charges. L'allongement a lieu avec une diminution régulière de la section tout au long de l'éprouvette.

Zone BC: la déformation plastique se localise dans une petite portion de l'éprouvette et n'est plus homogène, c'est la **striction** on aboutit à la rupture en C. les allongements croissent avec une diminution de la charge.

- **Définitions**

Sur le diagramme charge-allongement, qui peut être enregistré ou tracé par points, on utilise les coordonnées suivantes : en abscisse, **l'allongement relatif** $\Delta L/L_0$ de l'éprouvette ou plutôt d'une certaine base de mesure L_0 (L_0 est la longueur initiale de l'éprouvette) ;

$$\varepsilon\% = 100 \cdot \frac{L - L_0}{L_0}$$

- en ordonnée : la **charge unitaire**, définie à tout instant de l'essai, c'est le quotient de la charge par la section initiale de l'éprouvette S_0

$$\sigma = F/S_0$$

Le point A est la **limite d'élasticité** (ou résistance élastique à la traction) :

$$R_e = F_e/S_0$$

Le point B correspond à la charge maximale ; il est appelé **résistance à la traction** ou résistance à la rupture (bien qu'il n'y ait pas encore rupture) ;

$$R_m = F_r/S_0$$

C'est la charge maximale atteinte durant l'essai de traction. A partir de ce point, la déformation commence à se localiser sous forme de striction, ce qui explique la décroissance de l'effort nécessaire aux déformations au delà du point B.

Un processus de mise en forme qui conduirait à franchir ce point se traduirait par des risques difficiles à contrôler de rupture ou de non-conformité géométrique.

Le point C correspondant, lui, à la **charge ultime**.

Après rupture de l'éprouvette et reconstitution de celle-ci, on mesure L_u et S_u respectivement longueur entre repères et section minimale ultimes.

L'allongement relatif total ou **A pour cent** de l'éprouvette est l'allongement de rupture :

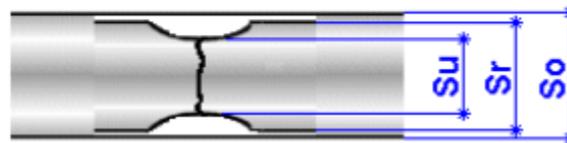
$$A\% = \frac{L_u - L_0}{L_0}$$

Où L_u est la longueur de l'éprouvette après rupture. Il caractérise la ductilité du matériau.

La **striction** est la réduction de section maximale de l'éprouvette rompue c'est-à-dire dans la section de rupture (fig-3). Le coefficient de striction traduit l'aptitude à la déformation à froid.

$$Z\% = 100 \cdot \frac{S_u - S_0}{S_0}$$

avec S_0 : section initiale et S_u : section après rupture.



S_0 : Dimension éprouvette initiale
 S_r : Dimension éprouvette après rupture
 S_u : Dimension de la striction après rupture

Figure IV.9 : Les différentes sections de l'éprouvette avant et après rupture [1]

Cette déformation est également la somme de la déformation homogène répartie et de la déformation de striction proprement dite.

1V.6 Constante d'élasticité

Définitions

Dans la première portion de la courbe, il y a proportionnalité entre charge unitaire et déformation, au moins en première approximation : c'est la **loi de Hooke**. La caractéristique d'élasticité est la **pente** de cette droite qui est le **module d'élasticité E** (Coefficient d'élasticité longitudinal ou **module d'Young**) ; il exprime le rapport entre la charge unitaire appliquée et la déformation longitudinale de l'éprouvette. [15]

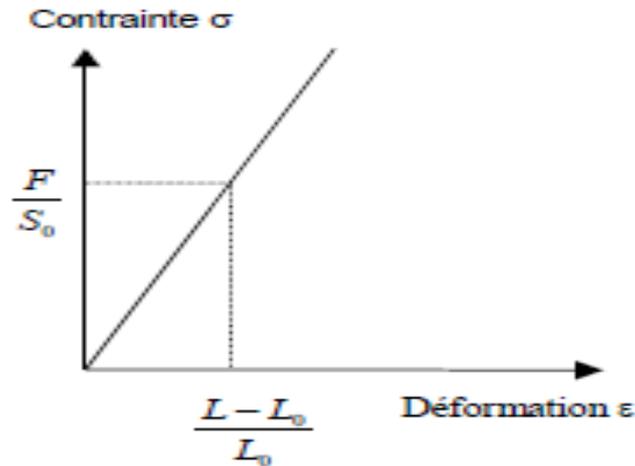


Figure IV.10 : Module d'Young [15]

Bien que l'essai de traction permette difficilement de les mesurer, il est intéressant de rappeler les définitions des constantes élastiques et leurs relations. Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par la tangente θ :

$$E = \frac{F \cdot L_0}{S_0 \cdot \Delta L}$$

Remarque : L'essai de traction n'est pas assez précis en général pour la mesure du module d'élasticité, car même si l'on amplifie suffisamment, et les techniques électroniques le permettent, de petites déformations parasites diminuent la valeur de la pente en plus des écarts à la loi de proportionnalité.

Ces écarts sont attribués à des microdéformations plastiques pour les aciers doux et à des contraintes résiduelles pour certains aciers traités qui conduisent à une plastification progressive de l'éprouvette.

ν le coefficient de Poisson,

G le module d'élasticité transversal ou de cisaillement.

Le coefficient de Poisson exprime le rapport entre la déformation longitudinale de l'éprouvette et la déformation transversale. Pour les Aciers on a environ : $\nu = 0,3$.

Le module de cisaillement G exprime le rapport entre le couple et la déformation par cisaillement, par exemple dans un essai de torsion.

Ces trois grandeurs sont liées par la relation suivante

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

- Quelques valeurs usuelles de E :

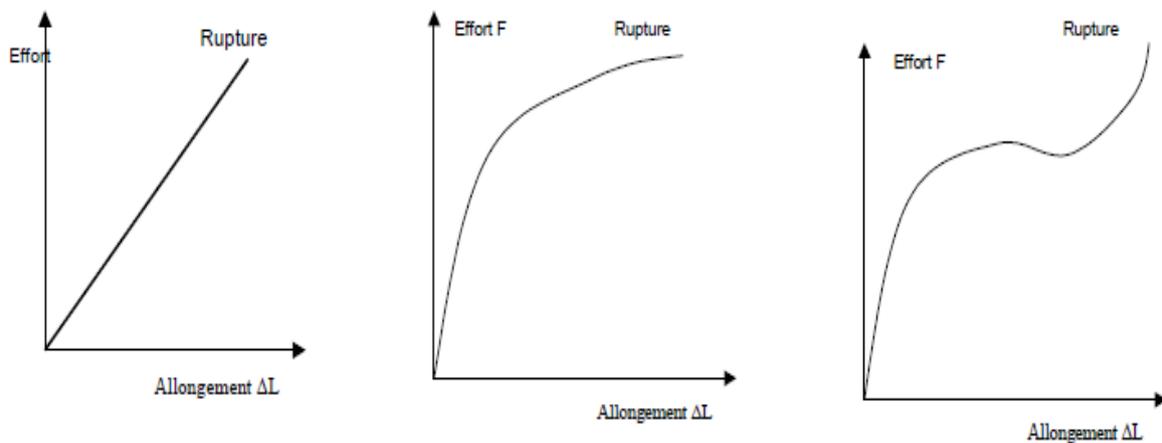
Tungstène	420 000 MPa
Aciers	200 000 à 220 000 MPa
Aciers inox	198 000MPa
Fontes graphite sphéroïdal	160 000 à 190 000MPa
Cuivre	126 000 MPa
Fontes graphite lamellaire	120 000 MPa
Laitons	105 000 MPa
Alliages d'aluminium	70 000 à 75 000 MPa
Plomb	17 000 MPa

Tableau IV.2 : Quelques valeurs du module de Young

IV.7. Limite d'élasticité

Cas général

Le diagramme de l'essai de traction peut présenter différentes formes de courbes



Figures IV.11 (a, b et c) : différents diagramme de l'essai de traction [1]

Figure IV.11a : La rupture intervient très rapidement à l'issue de la période élastique. La période plastique est inexistante. C'est le cas de tous les **matériaux fragiles** tels que le verre, les céramiques, les bétons, les pierres à bâtir, les polymères thermodurcissables, la fonte grise et les aciers bruts de trempe (avant revenu).

Figure IV.11b : Le passage de la période élastique à la période plastique est progressif. La striction est pratiquement inexistante en fin d'essai. C'est le cas des aciers peu ductiles (aciers alliés et à fort pourcentage de carbone).

Figure IV.11c : Les périodes élastique et plastique sont très distinctes. La striction est importante. C'est le cas des aciers ductiles (aciers doux et à faible pourcentage de carbone). L'élasticité n'est pas linéaire et le comportement sous contrainte dépend du temps. C'est le cas des élastomères et de certaines matières plastiques.

- **Cas des aciers**

Pour les aciers, on est conduit à distinguer 2 types principaux de courbes de traction suivant la présence ou non d'un crochet à la limite d'élasticité.

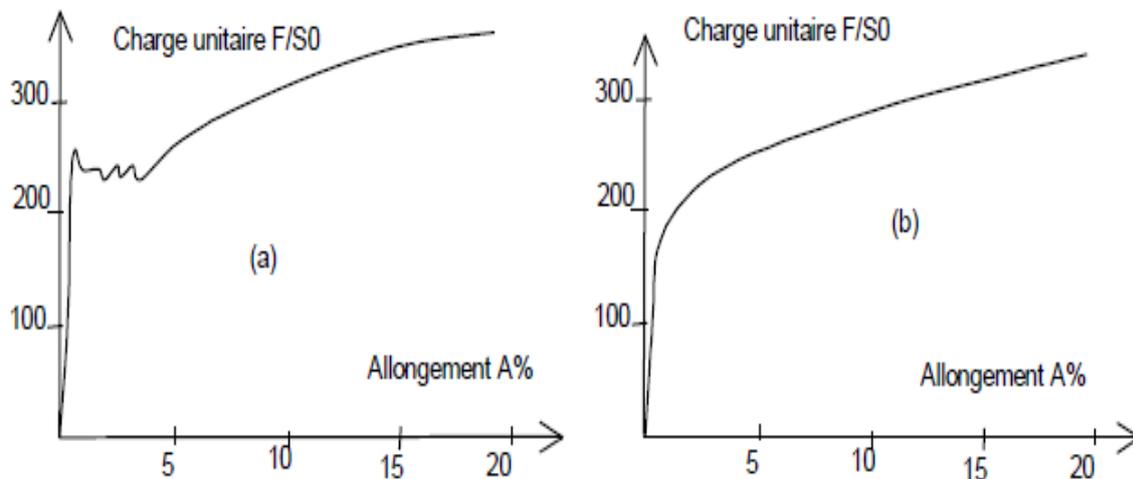


Figure IV.12 : courbes de traction des aciers[1]

La courbe (a) correspond à des aciers ferritiques en général, mais peut se présenter avec moins de netteté pour des aciers plus durs traités, parfois même alliés. Ce type de courbes amène à la définition des grandeurs :

- la limite d'élasticité R_{eH} en MPa
- la limite d'élasticité inférieure R_{eL} en MPa
- et la longueur du palier A_p en %

La courbe (b), avec un passage progressif, correspond aux aciers durs ou aux aciers austénitiques.

IV.8 Limites conventionnelles

Comme montre la figure ci-dessus, il y a passage progressif de l'élasticité linéaire à la déformation plastique. La limite d'élasticité pourrait être prise égale à la limite de proportionnalité, mais au fur et à mesure que l'on amplifie l'enregistrement de l'allongement pour mieux voir cette limite, on met en évidence le manque de linéarité de la montée élastique pour des raisons d'imperfections d'éprouvette et de non obéissance rigoureuse à la loi de HOOKE.

Il est donc préférable de définir des limites conventionnelles où l'on apprécie un allongement permanent faible mais mesurable avec précision, comme 0,2 % par exemple.

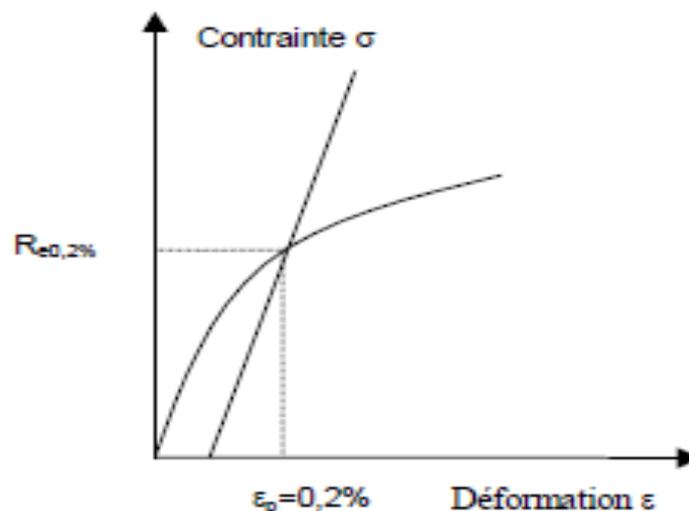


Figure IV.13 : Limites conventionnelles [1]

La limite élastique, notée $R_{e0,2\%}$ correspond au point où le comportement cesse **d'être** élastique pour devenir plastique. Pour certains matériaux, le passage d'une zone à l'autre pouvant être progressif (figure IV.13), il est nécessaire de définir un critère permettant de fixer tout de même une valeur de R_e . Ainsi on choisit souvent **$R_{e0,2\%}$ qui correspond après décharge à un allongement plastique** (ou rémanent) de 0,2%.

On définit des limites conventionnelles à 0,2% - 0,1 % - 0,02 % ou 0,01 %

L'emploi le plus répandu de $R_{0,2}$ ($R_p 0,2\%$) est lié aux méthodes de mesure, puisque autrefois on soumettait l'éprouvette à des charges croissantes avec démontage et mesure de l'allongement rémanent ; il fallait donc que l'on puisse apprécier l'allongement rémanent avec une certaine précision dépendant des moyens métrologiques.

L'apparition des extensomètres mécaniques, puis des extensomètres électroniques à amplification forte, a amené à considérer de plus en plus l'allongement mesuré sur diagramme au détriment de l'allongement rémanent. La limite conventionnelle s'obtient alors en traçant par la valeur d'allongement choisie une parallèle à la montée élastique ; la précision obtenue permet le cas échéant de prendre des valeurs plus petites que 0,2 %. Cette dernière est la plus fréquemment employée car elle est utilisable avec tous les types d'extensomètres.

On admet généralement que la limite d'élasticité proportionnelle est voisine de $R_p 0,01$ % mais ce n'est qu'une approximation.

L'acquisition se fait par le biais d'un transducteur, comme par exemple une jauge de déformation. Le signal mécanique (un allongement) est transformé en signal électrique (une variation de résistance). Le transducteur est conditionné de manière à permettre la lecture de l'information qu'il contient. Dans le cas de la jauge, il s'agit d'un pont de Wheatstone, puis d'une carte d'acquisition. L'ensemble des éléments entrant dans le processus d'acquisition constituent la chaîne de mesure. Ensuite, un étalonnage permet de convertir la différence de potentielle en la grandeur mécanique souhaitée (le mesurande). Il s'agit d'utiliser un modèle correspondant à la chaîne de mesure ou un étalonnage expérimental si aucun modèle performant n'existe pour convertir la mesure en mesurande.

La variation de la grandeur électrique avec la mesure (dérivée de la courbe d'étalonnage) définit la sensibilité d'un capteur. Si le capteur est linéaire, la sensibilité est indépendante de la valeur mesurée.

Conclusion

L'essai de traction nous permet de déterminer le comportement des matériaux selon différentes contraintes. Ainsi, il est possible de voir la façon dont va se déformer le matériau. De ce fait, il est possible de déterminer différentes informations comme les contraintes maximales, de limites élastiques, de ruptures, ou les déformations de limites élastiques, de ruptures... Enfin il est également possible de déterminer le module d'Young. A partir de ces lois de comportement, il sera possible d'étudier dans quels domaines un matériau peut être utilisé.

Conception du capteur de déformation, réalisation d'essais de traction

V.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre, est de décrire la conception de notre capteur de déformation puis de le tester, en réalisant des essais de traction, en vue de tracer la courbe (contrainte-déformation) en temps réel. On terminera par l'interprétation des résultats obtenus.

La machine de traction déjà équipée d'un capteur de force réalisé au niveau de notre département, qui fonctionne parfaitement. On a alors décidé de le garder et de l'utiliser pendant les essais. Il reste donc à réaliser un capteur de déformation qui s'adaptera sur la machine de traction, écrire un programme pour l'acquisition des données et en fin réaliser l'essai de traction de validation du fonctionnement des capteurs.

V.2 Description du capteur de déformation

Un capteur de déformation permet comme son nom l'indique de pouvoir mesurer un allongement ou une déformation d'une structure donnée, sur laquelle une charge donnée est appliquée. Dans notre cas d'étude le capteur servira à mesurer l'allongement d'une éprouvette plate monté sur une machine de traction soumise à des efforts uni-axiaux.

Le capteur de déformation est inspiré des extensomètres avec contact qui existent sur le marché. Le corps d'épreuve sur lequel seront montées nos jauges de contraintes, est un dispositif qui se fixe sur l'éprouvette plate, afin de mesurer la déformation réelle de cette dernière.

Le dispositif a été réalisé dans les ateliers de mécanique de l'université Mouloud Mammeri, avec un aluminium de dureté 135HB connu pour sa légèreté et sa bonne adaptabilité à la corrosion. Il est équipé de jauges de contraintes montées en pont complet sur une partie du capteur très flexible qui est en acier inoxydable, afin que ce capteur soit très sensible aux moindres déformations.

L'idée donc est de pouvoir réaliser un dispositif qui se fixe sur une éprouvette de longueur utile déterminée, et qui peut suivre l'allongement de l'éprouvette lors de sa déformation sans que ce dernier rompe. Le capteur est en principe doté des jauges de contraintes qui sont collées minutieusement sur la partie flexible du capteur.

Principalement notre capteur à jauges est constitué de deux parties essentielles :

La partie rigide qu'on a nommé les pieds et les crochets qui sont en aluminium, et les crochets qui permettent de fixer le capteur sur l'éprouvette.

La partie flexible est une lame en acier flexible sur laquelle on a fixé les jauges.

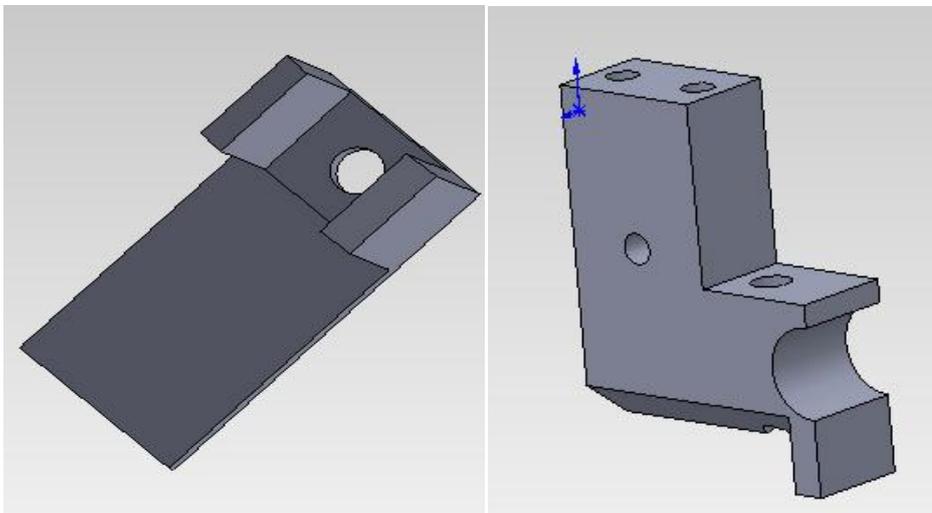


Figure V.1 : la partie rigide (crochets et les pieds)

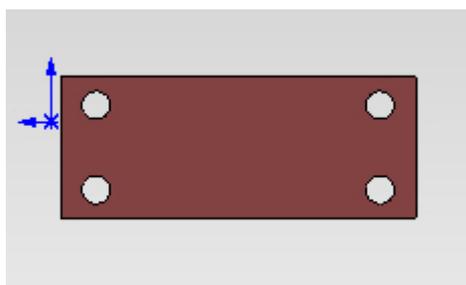


Figure V.2 : la partie flexible

L'assemblage de ces deux parties rigide et flexible à l'aide des vis filetées, constitue le capteur de déformation à jauges de contrainte (figure V.3).

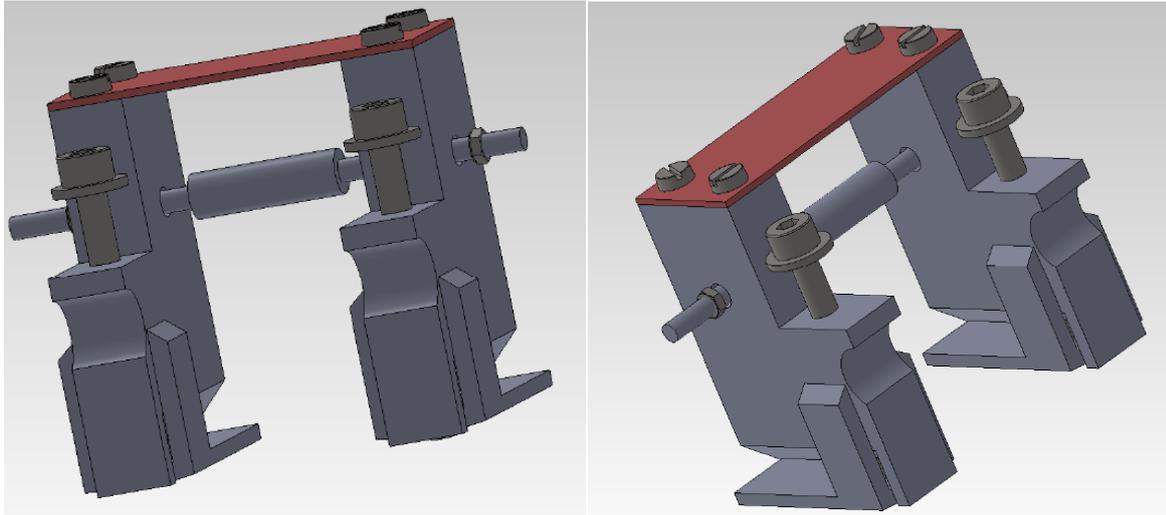


Figure V.3 : l'assemblage des deux parties (rigide et flexible)

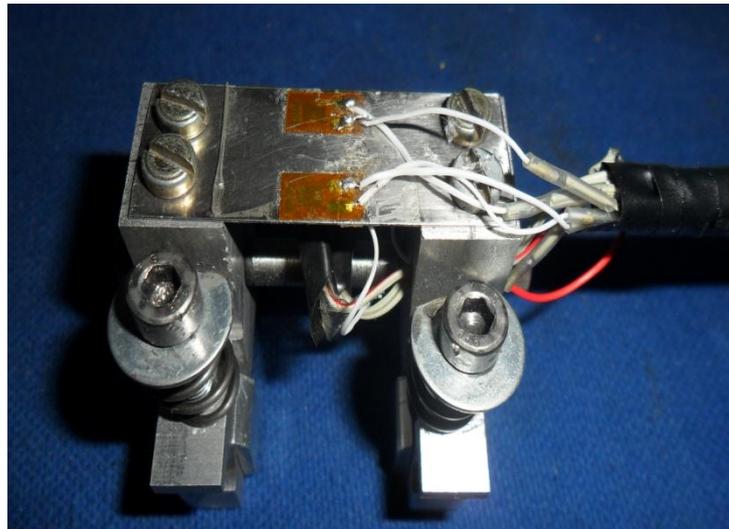


Figure V.4 : Image du capteur de déformation

V.3 Le collage des jauges

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

- Préparation de l'état de surface : tout d'abord faire un nettoyage grossier de la surface, ensuite faire un nettoyage fin et répéter le nettoyage, jusqu'à ne plus avoir de trace de saleté sur le tampon.

• Préparation de la jauge et cosses relais : Préparer une bande adhésive disposée en angle sur la jauge et la cosse relais, aligner la jauge sur la marque et fixer avec une bande adhésive, la jauge et la cosse relais doivent être manipulées avec une pince.

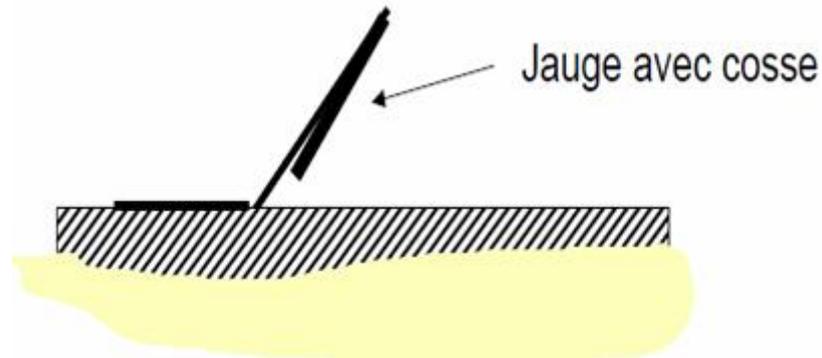


Figure V.5 : Dessin de préparation de la jauge et cosses relais

• Collage avec colle : verser une goutte de colle et étaler aussitôt uniformément le produit sans exercer de pression. Rabattre la jauge aussitôt avec une feuille téflon en appliquant une pression uniforme d'environ une minute sur l'ensemble. Après la prise de la colle, la bande adhésive peut être enlevée de l'ensemble jauge et cosse relais.

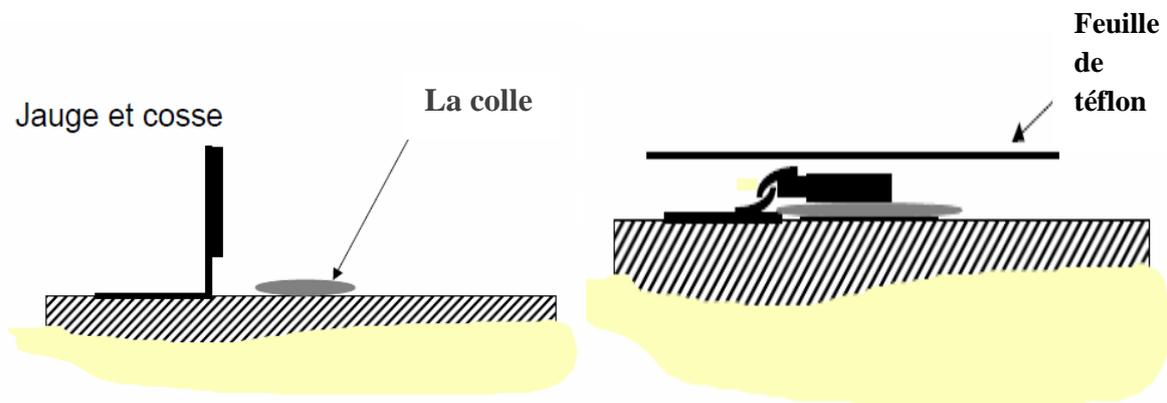


Figure V.6 : Collage de la jauge

- Raccordement du câble : dans notre cas les jauges sont des jauges pré-câblées.
- Contrôle électrique et visuel de l'équipement
- Test (raccordement sur l'amplificateur)
- Tests de bon fonctionnement avec l'amplificateur

Le choix du collage des jauges au milieu de la partie flexible, est dû fait que la sollicitation à laquelle la partie flexible est soumise, est identique au comportement d'une

barre soumise à des moments de flexion à ces deux extrémités. Au milieu de la lame, la flèche est à son maximum.

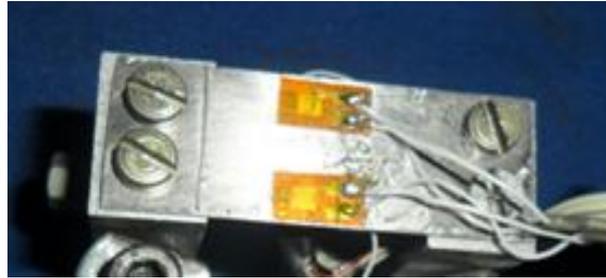


Figure V.7 : jauges en ponts complet au milieu de la partie flexible

L'allongement de nos éprouvettes lors de l'essai de traction, entrainera l'écartement des pieds de notre capteur, qui engendra à leurs tours une flexion de la partie en acier très flexible. Au milieu de cette partie, on observe une flèche maximale.

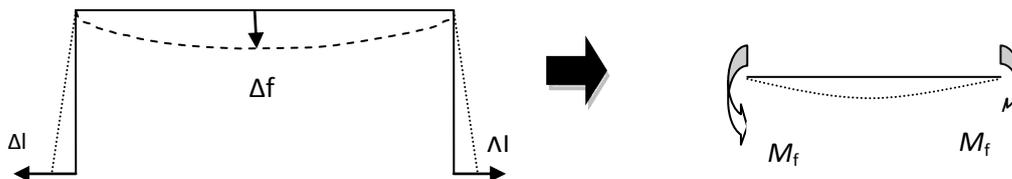


Figure V.8 : La flèche due au déplacement imposé par l'éprouvette

Le capteur de déformation est équipé d'un dispositif de fixation des éprouvettes. L'assemblage des crochets et des pieds via des trous percés dont les crochets à l'aide des tiges filetées en acier et un ressort de rappel de très grande rigidité, permet l'ouverture des crochets en appuyant sur les tiges, ces efforts sont transmis ensuite aux ressorts qui à leurs tour se compriment ainsi les crochets se déplacent pour laisser un vide entre les pieds et les crochets. On place l'éprouvette entre ce vide et on cesse d'appuyer sur les tiges pour laisser les ressorts de rappelles de fixer l'éprouvette.

Le capteur est conçu de manière à le placer sur la partie utile de l'éprouvette et ne pas gêner le déplacement des traverses de la machine de traction. Il a une longueur de 60 mm et une profondeur de 33 mm. Une description du capteur est représentée dans l'annexe, Sa conception est réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks, et sa réalisation est faite au hall technologique de Oued Aissi.

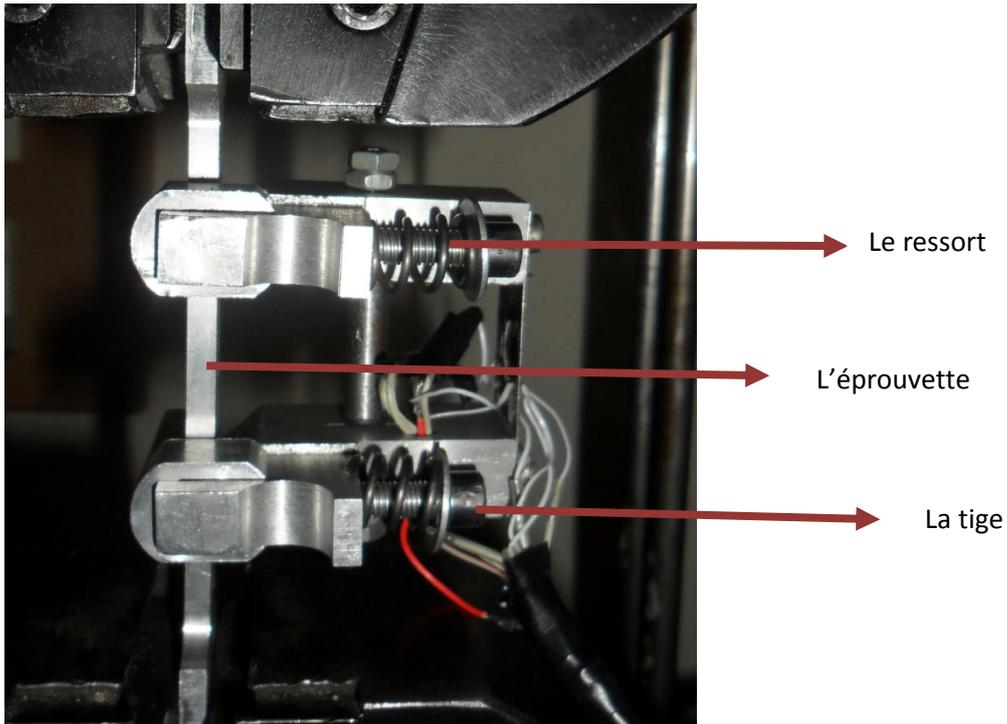


Figure V.9 : Image de fixation du capteur sur l'éprouvette.

Le capteur est équipé également d'un limiteur de course afin d'éviter la destruction.

V.4 Description du capteur de force

Le capteur de force est un cylindre creux réalisé par des étudiants en master. Il est en acier XC 60, à ces extrémités des filetages sont réalisés pour permettre sa fixation sur la machine de traction.

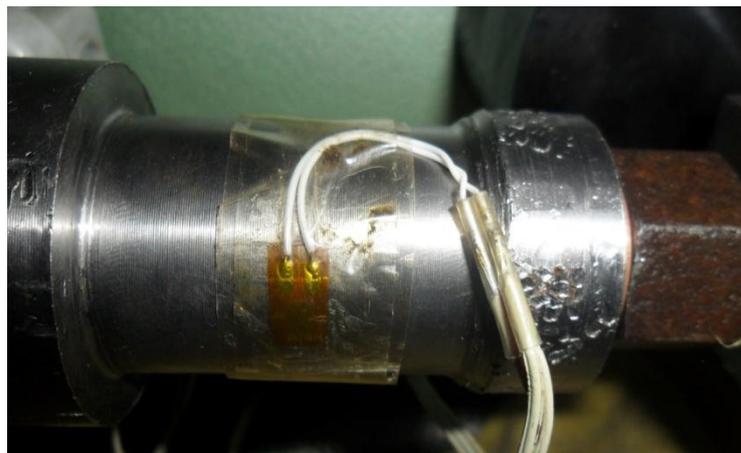


Figure V.10 : Capteur de force

Le capteur est monté dans la canalisation hydraulique de la machine de traction (figure V.11).

Une jauge de contrainte est collée sur le corps d'épreuve (cylindre creux) qui subit des déformations due à la pression interne du système hydraulique.



Figure V.11 : Montage du capteur de force sur la canalisation hydraulique de la machine de traction.

Le capteur est vissé au répartiteur d'huile qui assure sa répartition à l'intérieur du corps d'épreuve du capteur et du manomètre de pression de la machine.

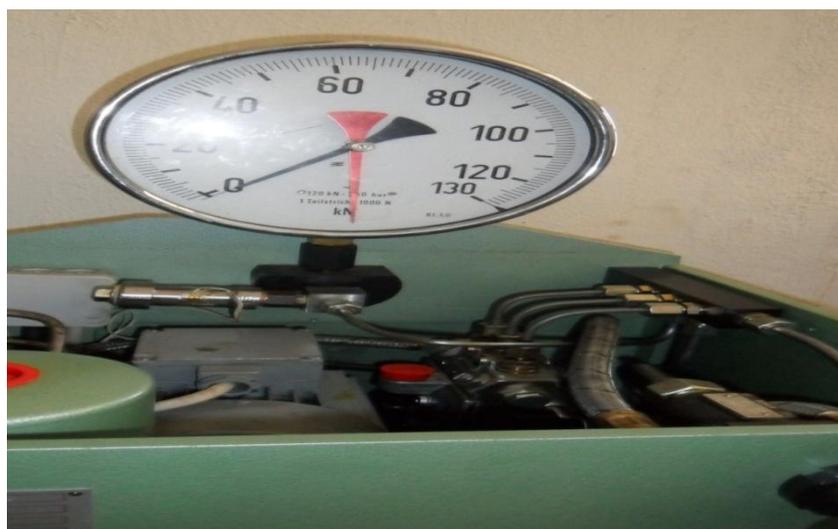


Figure V.12 : Montage du capteur sur le répartiteur

V.5 La chaîne d'acquisition

La chaîne d'acquisition de fabrication « VISHAY MICROMESURE», est constituée de dix entrées analogiques et dix sorties. Le conditionnement de nos capteurs permet la mise à zéro, l'équilibrage des ponts, l'amplification et le gain du signal d'entrée.



Figure V.13 : Chaîne d'acquisition « MICROMESURE VISHAY »

V.6 Carte Arduino

Arduino est un circuit imprimé sur lequel se trouve un microcontrôleur qui peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme le contrôle des appareils domestiques - éclairage, chauffage..., le pilotage d'un robot, etc. C'est une plateforme basée sur une interface entrée/sortie simple. Arduino peut être utilisé pour construire des objets interactifs indépendants, ou bien peut être connecté à un ordinateur pour communiquer avec des logiciels. Les modules sont programmés au travers d'une connexion série [RS-232](#). Les premiers Arduino possédaient un port série, puis l'[USB](#), tandis que certains modules destinés à une utilisation portable se sont affranchis de l'interface de programmation, relocalisée sur un module USB-série dédié (sous forme de carte ou de câble). L'Arduino utilise la plupart des entrées/sorties du microcontrôleur pour l'interfaçage avec les autres circuits [17].

L'Arduino est une carte électronique qui a assuré la liaison entre la chaîne d'acquisition et l'ordinateur pour acquérir les données des essais de traction. Elle peut servir également :

- pour des dispositifs interactifs *autonomes* simples ;

- comme *interface* entre capteurs/actionneurs et ordinateur ;
- comme programmeur de certains microcontrôleurs.

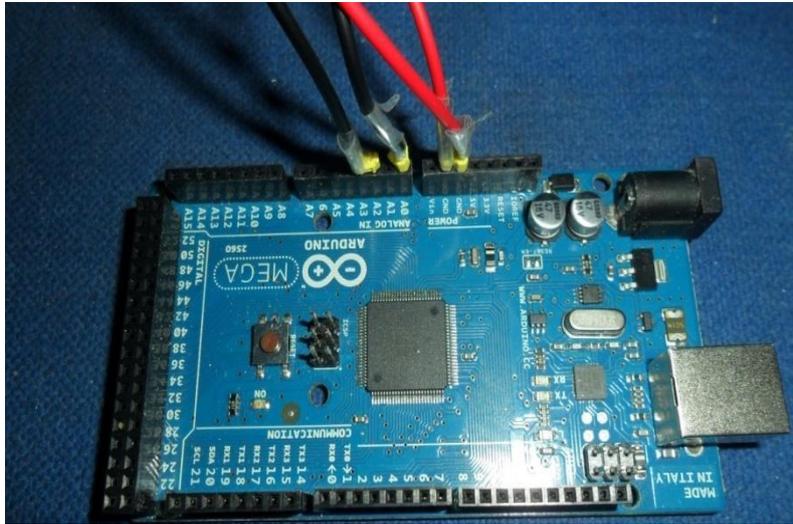


Figure V.14 : carte d'acquisition arduino

V.6.1 Description de la carte arduino

La carte arduino « MEGA 2560 » est dotée de : 16 entrées analogiques, 54 entrées /sorties numériques ; d'un port USB pour le transport des données vers l'ordinateur et son alimentation.

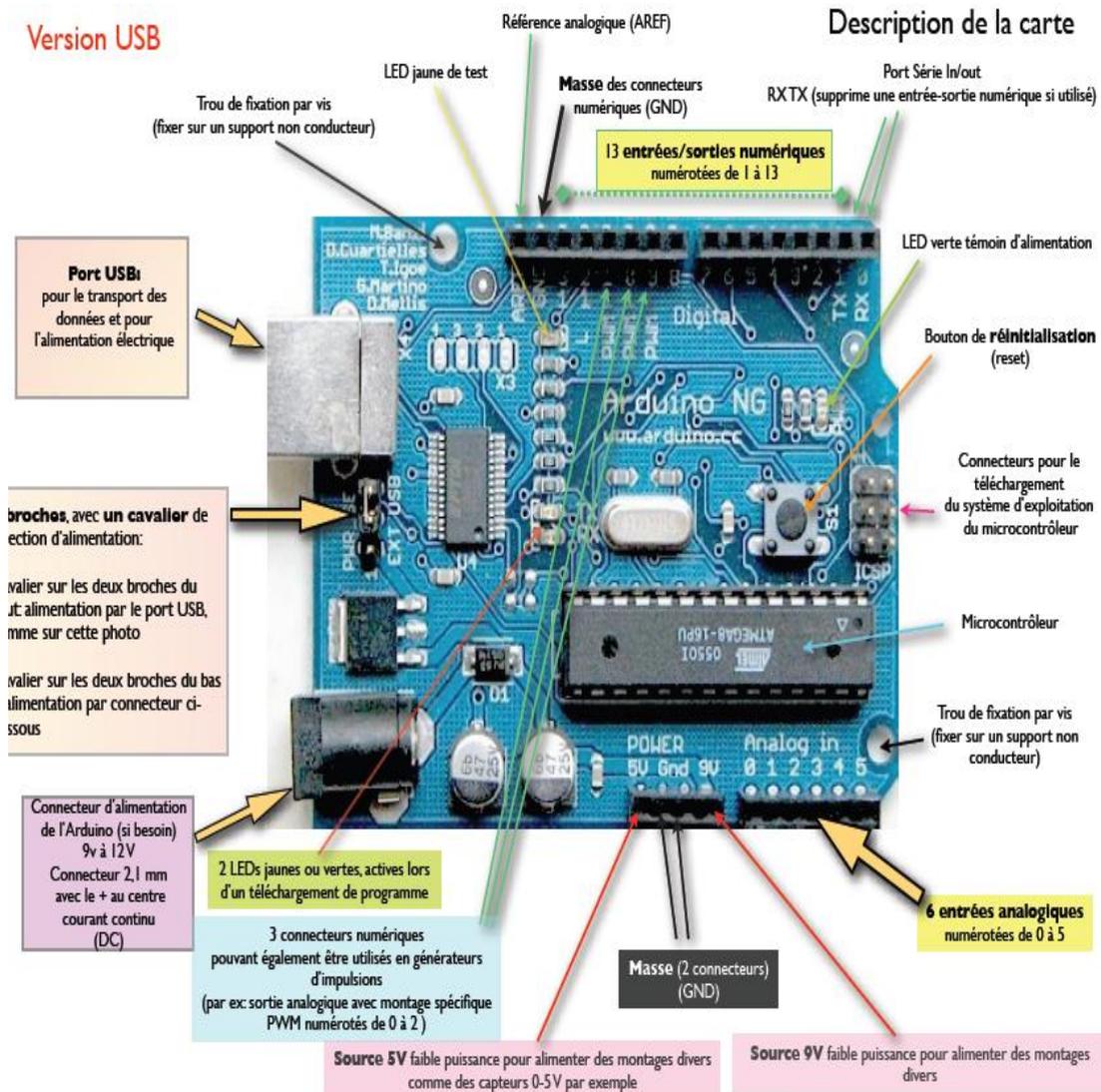


Figure V.15 : Description de la carte d'acquisition Arduino [17]

V.7 Étalonnage du capteur de force et déformation

V.7.1 étalonnage du capteur de déformation

L'étalonnage de notre capteur était une partie particulièrement délicate, il a fallu penser à comment retrouver la valeur de la déformation équivalente au signal récupéré.

L'étalonnage du capteur est réalisé avec un pied à coulisse, on règle la course du pied à coulisse à une valeur donnée, puis on récupère le signal équivalent à cet allongement.

Les valeurs de l'étalonnage de notre capteur sont données dans le tableau en dessous.

Signal mV	Allongement L (mm)	L-L ₀
0	30.3	0
47	31.5	1.2
70	32	1.7
116	33	2.7

Tableau V.1 : Étalonnage du capteur de déformation

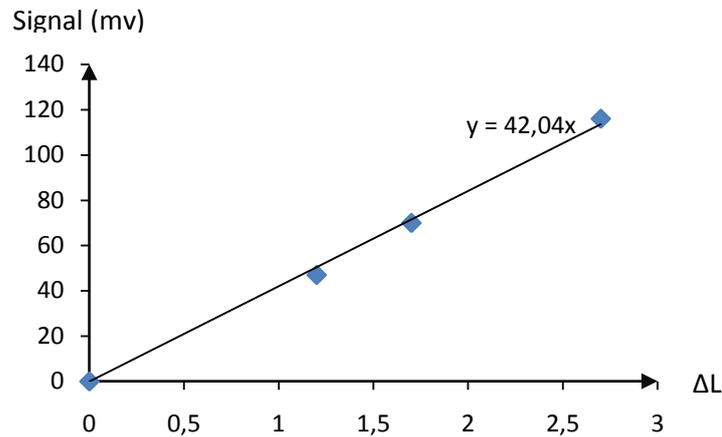


Figure V.16 : Courbe d'étalonnage du capteur de déformation

Nous obtenons ainsi un facteur d'étalonnage du capteur de déformation par le calcul de la pente de la droite du signal en fonction de ΔL, qui vaut 42.04, On a introduit ce facteur par la suite dans notre programme écrit en MATLAB, afin de tracer la courbe de traction en temps réel.

V.7.1 Étalonnage du capteur de force

Pour le capteur de force, nous avons pu l'étalonner sans aucune difficulté particulière, puisque la machine de traction dispose d'un manomètre qui indique la force en KN, qui nous permet de lire directement le signal équivalent à chaque valeur fixée préalablement de la force. Le tableau (V.2) nous permet le tracé de la droite d'étalonnage de ce capteur de force.

signal	Force
100	10
150	15
200	20

Tableau V.2 : Valeur de l'étalonnage du capteur de force

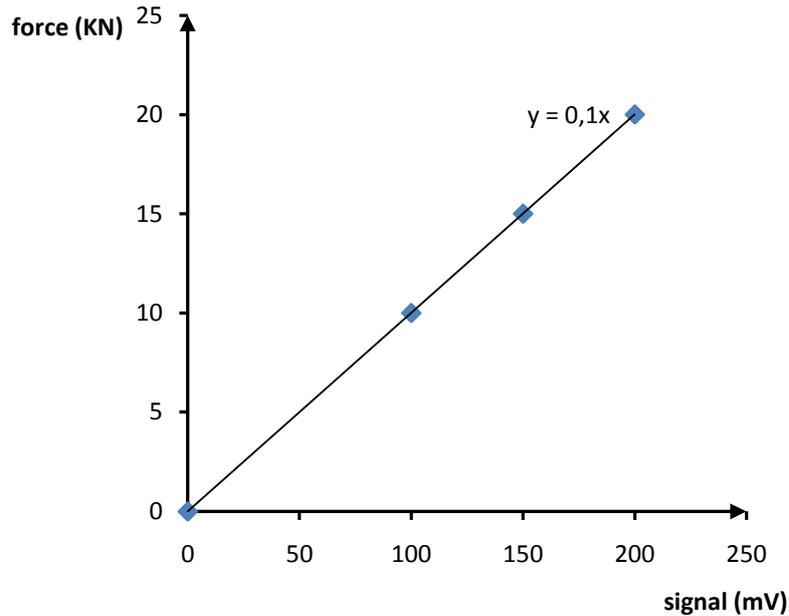


Figure V.17 : courbe d'étalonnage du capteur de force

Le facteur d'étalonnage du capteur de force est donc égal à 0.1.

V.8 Description des éprouvettes plates

Le choix d'usinage des éprouvettes plates, ou lieu des éprouvettes cylindriques, est uniquement due au fait que, les têtes d'amarrage des éprouvettes cylindriques de notre machine ont un problème de fixation sur la machine. On ne pouvait pas se permettre un glissement des éprouvettes lors de nos essais de traction. En effet le dispositif d'amarrage est composé d'une paire de mordaches ou d'un autre système de fixation adapté à la forme de l'éprouvette (p.ex. : pour éprouvette avec tête filetée ou tête à épaulement). Afin d'éviter tous moments de flexion, il est important que les fixations soient bien orientées et alignées suivant l'axe de traction. Ceci n'est pas toujours facile à réaliser, mais est particulièrement critique lorsqu'on doit mesurer des matériaux fragiles, tels que les céramiques, qui ne peuvent pas s'adapter.



Figure V.18 : Éprouvette plate



Figure V.19 : Têtes d'amarrages

Nos éprouvettes ont été découpées dans une barre en acier disponible au hall de technologie d'Oued Aissi d'indication XC60, sous forme d'un bloc de même dimension que nos éprouvettes, de profondeur égal à 50 mm. On a par la suite, découpé au robot fil au niveau de l'entreprise étatique ENEL, des éprouvettes de 4 mm d'épaisseur présentées dans la (figure V.20).

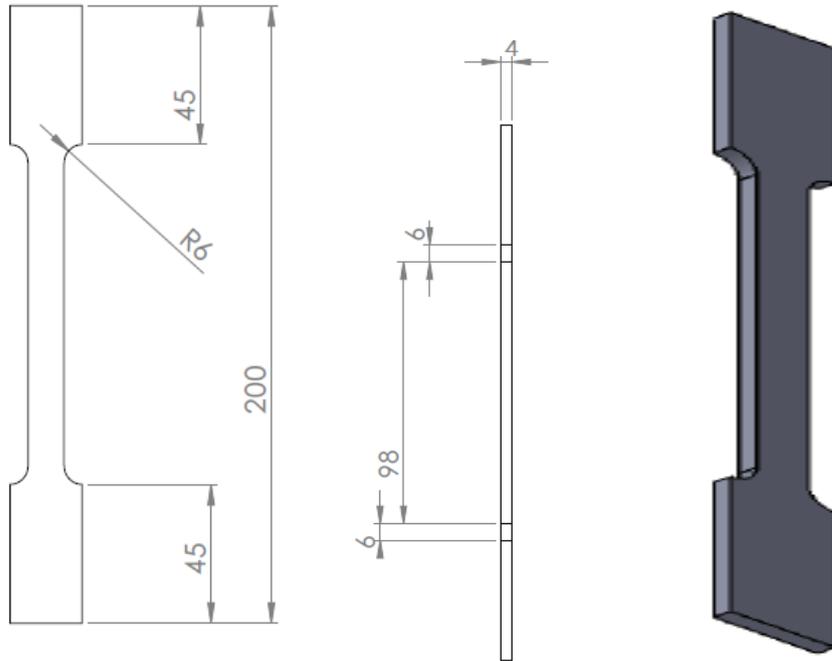


Figure V.20 : Eprouvettes plates

Nous avons aussi soumis quelques éprouvettes à un essai de traction et vérifié la dureté et la composition en soufre, carbone et manganèse afin de pouvoir comparer nos résultats à ceux fournis par l'entreprise ENEL.

- La dureté de l'acier XC60 est de : 195H,
- de composition soufre-carbone et manganèse : C=0.43%, S= 0.025% et de Mn=1.05%

Les résultats de l'essai de traction sont donnés dans l'annexe.

V.9 Description de la machine de traction «OEHLGLASS»

Notre machine de traction «OEHLGLASS», est une machine de traction hydraulique dotée d'un vérin de traction de type (MP12) et d'un porte outil sensée recevoir la tête de serrage supérieur, de deux colonnes, d'une traverse mobile ainsi qu'une partie inférieure fixe qui reçoit la tête de serrage inférieure.

Le contrôle de la course du vérin se fait manuellement à l'aide d'une manivelle ou soupape de levage.

Pour l'indication de la force appliquée par la machine, cette dernière est équipée d'un dynamomètre calibré entre 0KN à 120KN, sans pour autant dépasser cette dernière valeur, pour préserver la machine de tout endommagement.

Le réglage de la force d'injection se fait manuellement au moyen de la soupape de limitation de force.



Figure V.21 : Machine de traction «OEHLGLASS»

A noter que sur cette machine, tout essai de traction ou de compression doit être réalisé avec une vitesse de déplacement entre 0.1 et 0.3 mm/min, pour que la force de pression ou de traction soit mesurée.

Les dimensions des éprouvettes que cette machine peut tolérer sont :

- Éprouvettes plates : Largeur max : 40mm
Épaisseur max : 8mm
- Éprouvettes rondes : diamètre de serrage : 8 à 10mm.

Il est aussi recommandé de n'utiliser que des pièces non trempées.

Élément	désignation
1	Presse hydraulique
2	Colonnes
3	Porte-outil filetage M 40 x 1.5
4	comparateur
5	tige
6	Soupape de guidage
7	interrupteur
8	Soupape de levage
9	Vitesse de levage
10	Soupape de limitation de force et levier de blocage
11	Traverse
12	Partie inférieur
13	Indicateur de force

Tableau V.3 : éléments de la machine de traction « EOHLGASS »

V.9.1 Les caractéristiques techniques de la machine

Production hydraulique de force d'essai,

-Force d'essai : 0 à 120 KN

-Pression max du système : 250bar

-Course max : 150mm

-Vitesse de déplacement : 0 à 425mm/min

Pompe hydraulique

-débit max : 1cm³/tour

-puissance absorbée : 0.55kw

Plage de mesure

-force : 0 à 120KN

-déplacement : 0 à 150mm

V.10 Description de l'essai de traction

Le montage des éprouvettes sur la machine de traction est une partie très importante afin de garantir des résultats satisfaisants. Cependant la machine de traction présente un mauvais alignement de nos éprouvettes sur la machine et à priori un léger glissement entre les mâchoires.

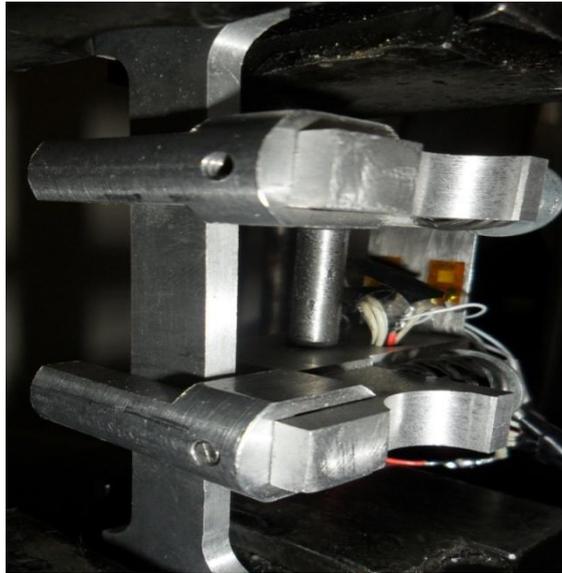


Figure V.22 : Emplacement de l'éprouvette et de l'extensomètre sur la machine de traction

Une fois l'éprouvette et le capteur bien installés, le capteur de force et de déformation branchés sur la chaîne d'acquisition, et la sortie de chaque capteur de la chaîne d'acquisition relié à la carte d'acquisition Arduino, on relit en fin la sortie de cette carte au PC. L'interface permet l'acquisition et la visualisation des courbes, en temps réel, sur notre PC.

On peut en fin commencer notre essai de traction, en lançant le programme écrit avec MATLAB définis dans l'annexe B.

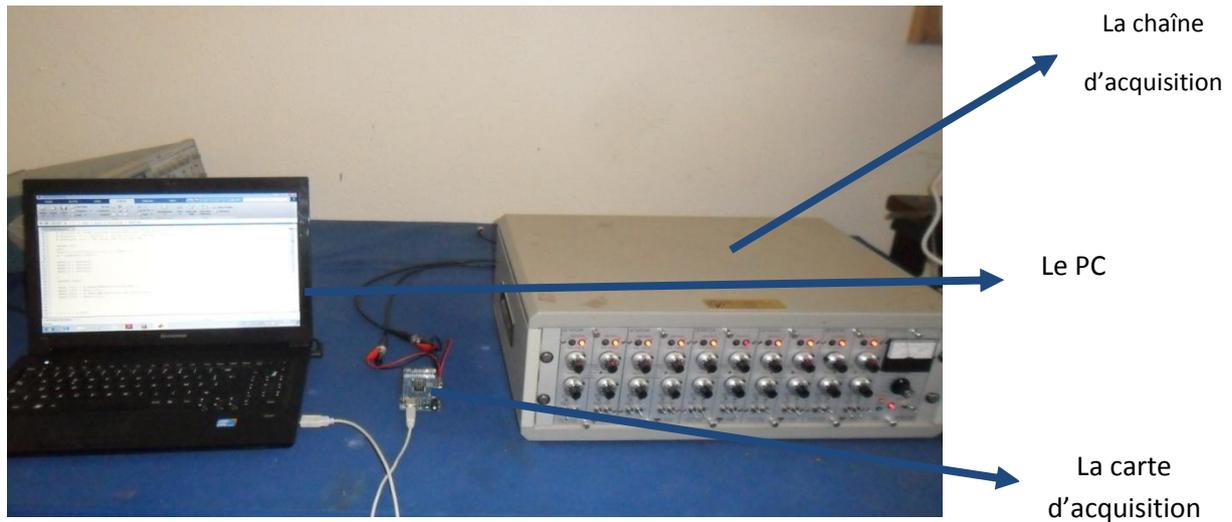


Figure V.23 : Acquisition de données sur ordinateur



Figure V.24 : Le montage du capteur sur la machine de traction

On a réalisé plusieurs essais sur plusieurs éprouvettes les courbes n'étaient pas nettes, le problème est lié à des fluctuations, les tracées des courbes n'étaient pas semblables à des courbes de traction. On a donc utilisé plusieurs éprouvettes, seul deux d'entre elles ont donné des résultats proches de ceux attendus, malheureusement on ne dispose pas d'assez de temps ni d'assez d'éprouvettes pour refaire les essais et vérifier la source des fluctuations.

V. 11 Les résultats des essais de traction

La figure V.25 présente la courbe de l'essai de traction de l'éprouvette 1 en acier, tracé en temps réel par le logiciel Matlab.

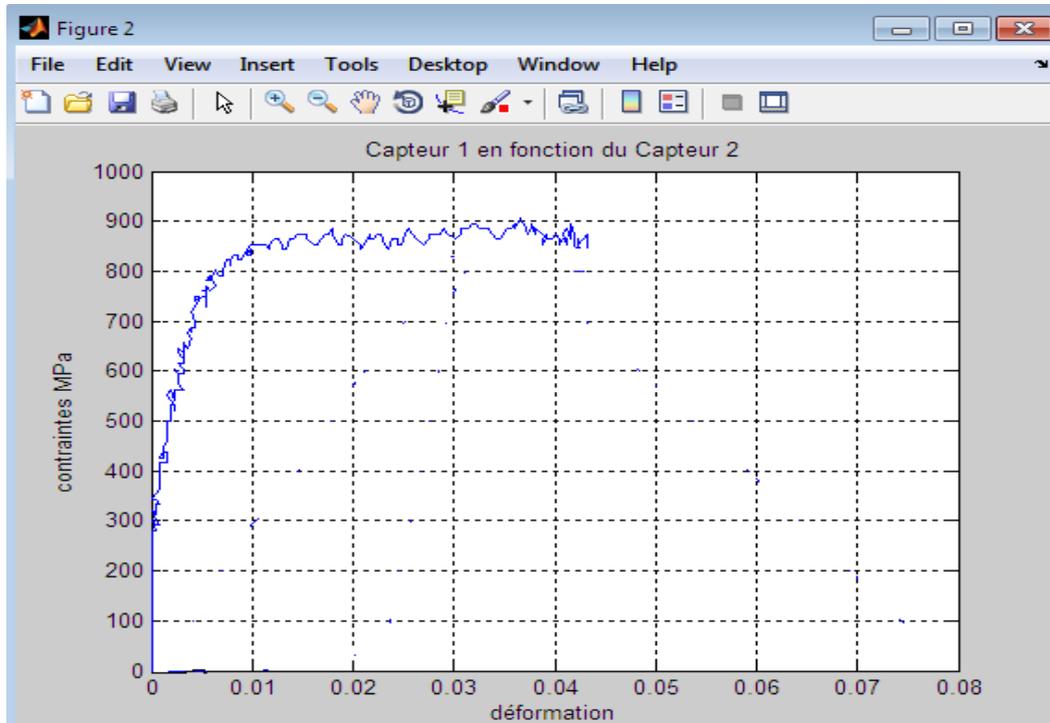


Figure V.25 : Courbe de traction de l'éprouvette 1

La pente de l'éprouvette 1 est tracée avec le logiciel Matlab grâce à la sélection des valeurs dans la partie linéaire de la courbe, qui sont enregistrées automatiquement dans L'Excel. La pente de cette droite correspond au module de Young de l'acier étudié. Il est égal pour cette éprouvette 130 GPa elle est illustré dans (figure V.26)

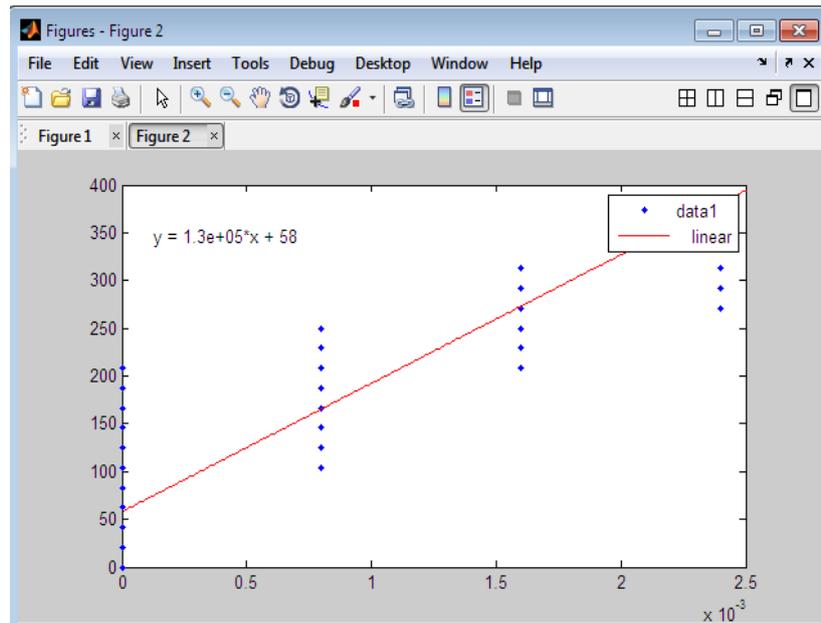


Figure V.26 : Module de Young de l'éprouvette

Pour l'éprouvette 2 sa courbe de traction pour une déformation inférieure à 0.1 est donnée dans la (figure V.27).

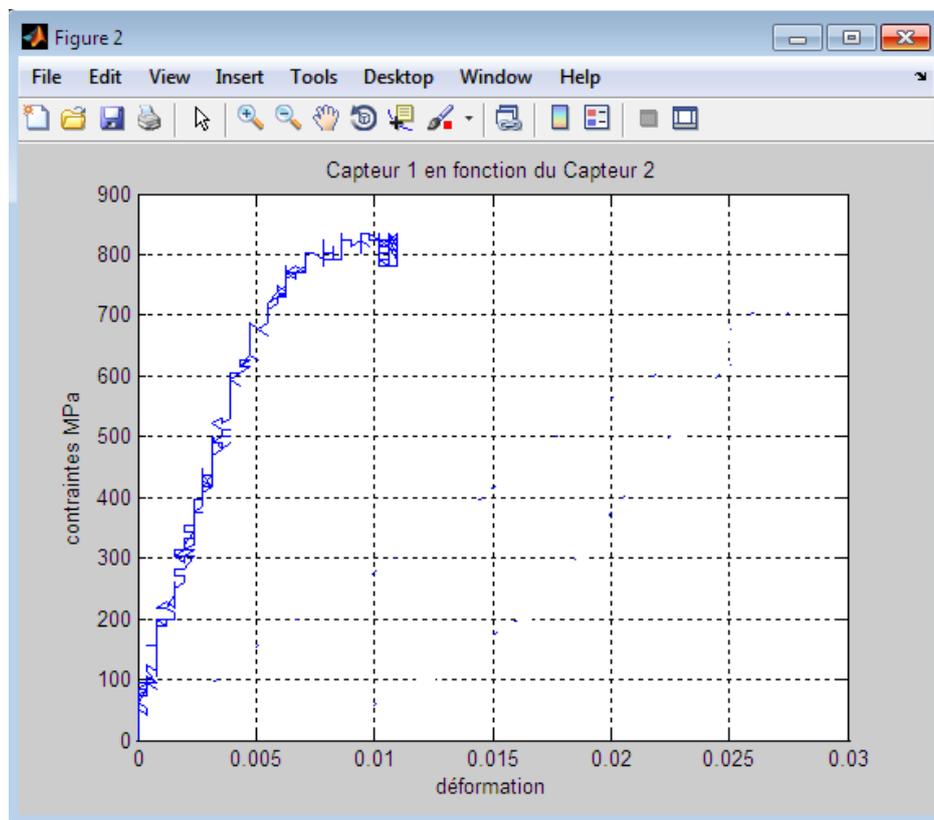


Figure V.27 : Courbe de traction de l'éprouvette 2

La pente de la droite de la courbe de l'éprouvette 2 est la suivante :

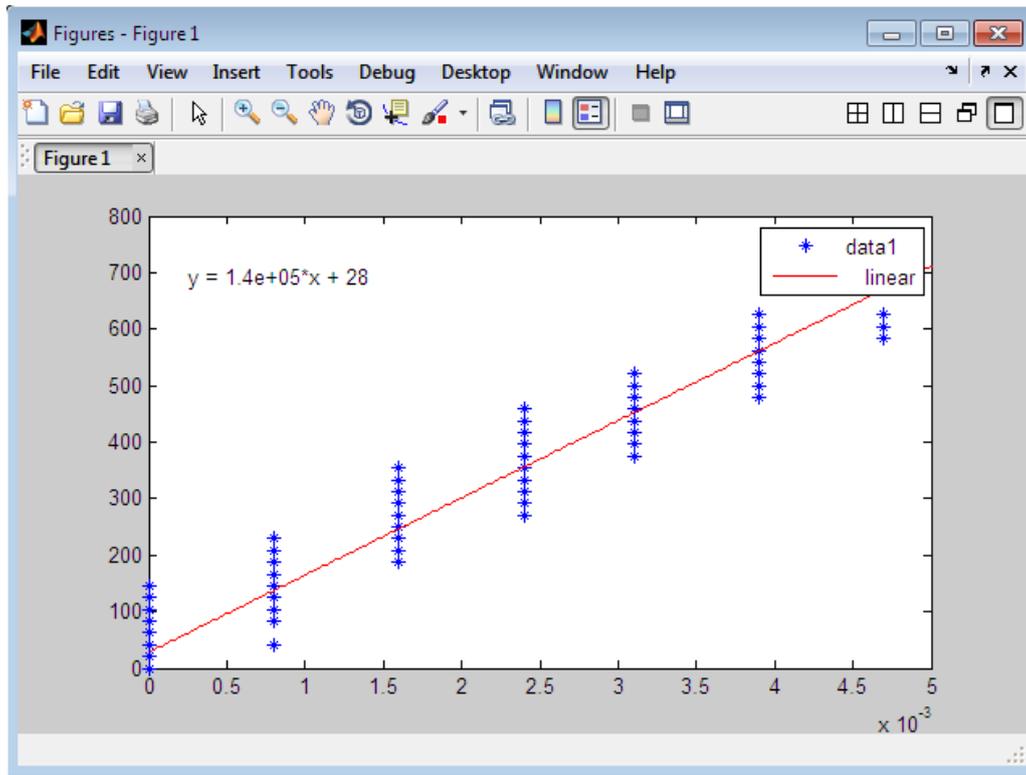


Figure V.28 : La pente de la droite de la courbe de traction de l'éprouvette 2

V.12 Analyses des résultats

Le tracé de nos courbes de tractions avec notre capteur est effectué uniquement dans la zone de la limite d'élasticité de nos éprouvettes afin d'éviter l'endommagement de notre extensomètre. Pour éviter ce désagrément, on a équipé notre capteur d'un limiteur de course qui ne dépasse pas 4 millimètres.

On a constaté lors de nos essais que l'acier utilisé est un acier très doux, son allongement est peu habituelle, une image d'illustration d'un exemple de l'allongement des éprouvettes en acier utilisées est donnée dans la (figure V.29).

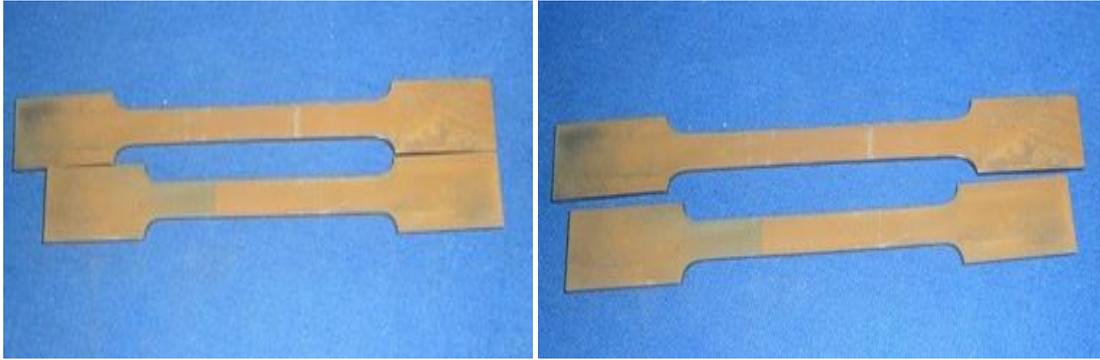


Figure V.29 : Images d'une éprouvette avant et après allongement

V.13 Conclusion

Les résultats obtenus, bien qu'ils soient un peu plus proche des valeurs souhaitées, il demeure que c'est un premier essai de conception de capteur pour ce genre de machine de traction. Il est clair que notre travail, nécessite une amélioration, afin d'avoir des résultats beaucoup plus concluants.

Ce que nous proposons comme perspectives, c'est de remplacer tout les fils et câbles utilisés par d'autres mieux adaptés à ce genre de manipulation (plus fins, moins encombrants...etc). Mais aussi au niveau de l'acquisition des données. Le programme utilisé avec Matlab, peut être remplacé par exemple avec le logiciel Labview qui est beaucoup plus performant pour ce genre d'acquisition afin de tracer les courbes de traction. La carte d'acquisition arduino. Beaucoup de paramètres restent à améliorer comme la résolution du capteur, la fabrication d'éprouvettes dans de bonnes conditions d'usinage afin de respecter la norme des éprouvettes, trouver une solution pour limiter le glissement des éprouvettes entre les mors de la machine de traction, sans oublier la mise en place des éprouvettes sur la machine au quelle il faut faire attention car elle est une étape cruciale pour avoir de bons résultats d'un essai de traction.

Conclusion Générale

La mesure des contraintes et des déformations dans l'essai de traction est particulièrement délicate. Elle nécessite beaucoup de précautions afin d'aboutir à des résultats optimaux. Ces précautions doivent être faites dans le choix de la machine de traction et des capteurs, dans la fabrication des éprouvettes et dans le choix du type de l'acquisition.

Nous disposons au niveau du laboratoire de RDM (résistance des matériaux) de notre département, d'une machine d'essai de traction ancienne qu'on a voulu équiper d'un capteur de force et d'un capteur de déplacement. Le but de cette initiative est d'exploiter le résultat de l'essai de traction en temps réel. Cet objectif est réalisé grâce à une carte d'acquisition appelé Arduino qui a permis de relier la sortie de la chaîne d'acquisition à cette carte Arduino, la sortie de cette carte est reliée à l'ordinateur. On a par la suite développé un programme de calcul avec le logiciel Matlab qui a permis de tracer la courbe de traction en temps réel et de sauvegarder les résultats de tous les essais dans un fichier Excel.

Le capteur de force est réalisé par des étudiants en master. On a donc réalisé uniquement le capteur de déplacement. Sa conception est faite avec le logiciel SolidWorks et sa réalisation dans les ateliers de mécanique. A cet effet, des éprouvettes plates de traction sont également réalisées.

Cette tentative a donné un résultat satisfaisant du fait que l'acquisition des données en temps réelle est une tâche difficile lors des essais, les tentatives ont été nombreuses mais on a réussi à réaliser des essais avec des résultats exploitables.

Toutefois, de nombreux points sont à améliorer. En premier lieu, le choix du bon câblage et soudage des fils électriques qui assurent la liaison entre les capteurs et le conditionneur pour ne pas perturber les mesures, en deuxième lieu la protection des jauges placées sur les capteurs doit être revue, afin de les protéger de l'humidité et des effets extérieurs.

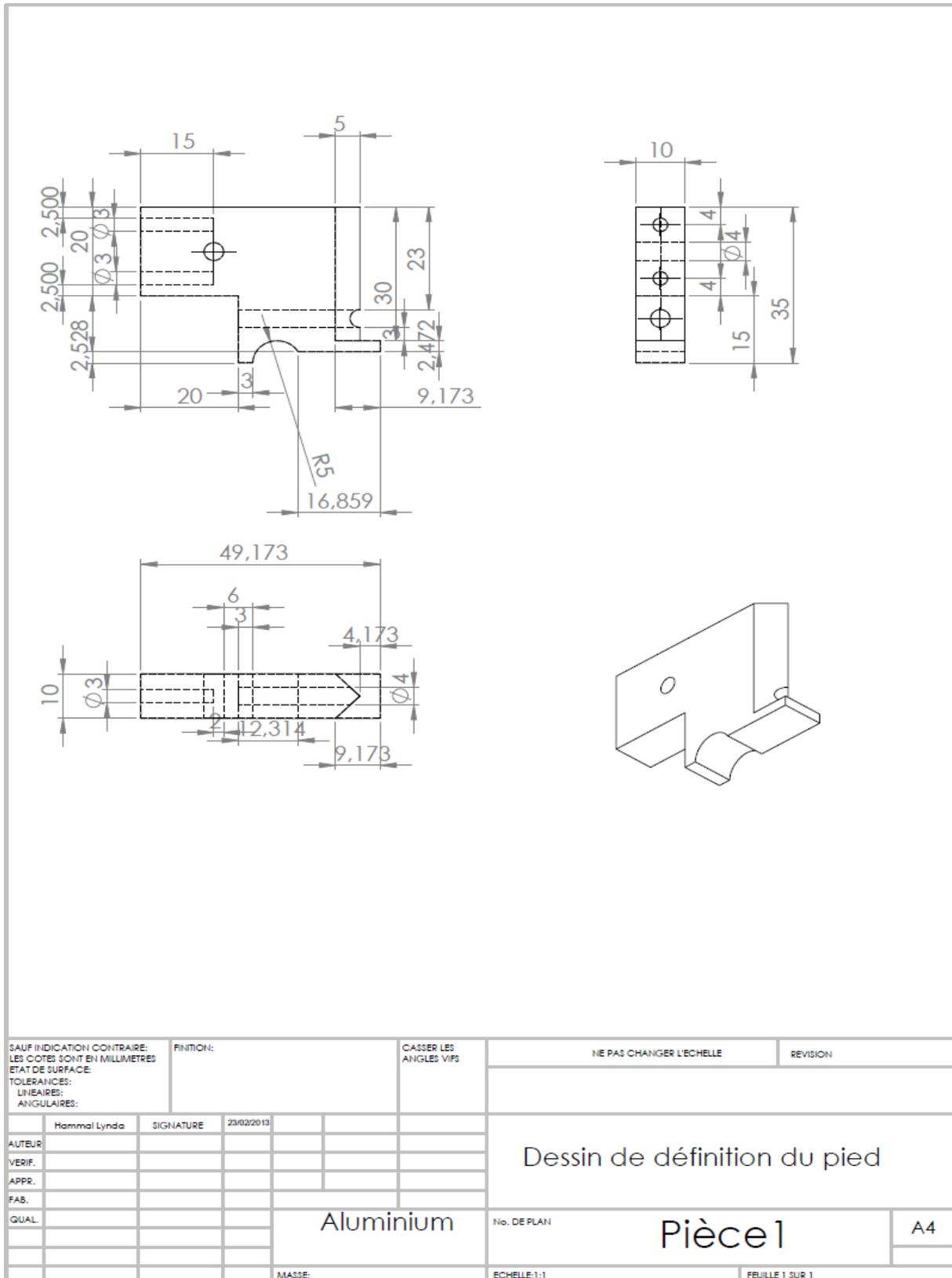
Enfin, le choix du logiciel utilisé peut être remplacé par un programme qui traite et analyse les signaux appelé Labview.

Outre ces recommandations, qui sont à mon sens indispensables avant d'espérer obtenir des résultats corrects, d'autres perspectives peuvent être envisagées, par exemple en utilisant des formes et matériaux adaptés à la partie de fixation des éprouvettes.

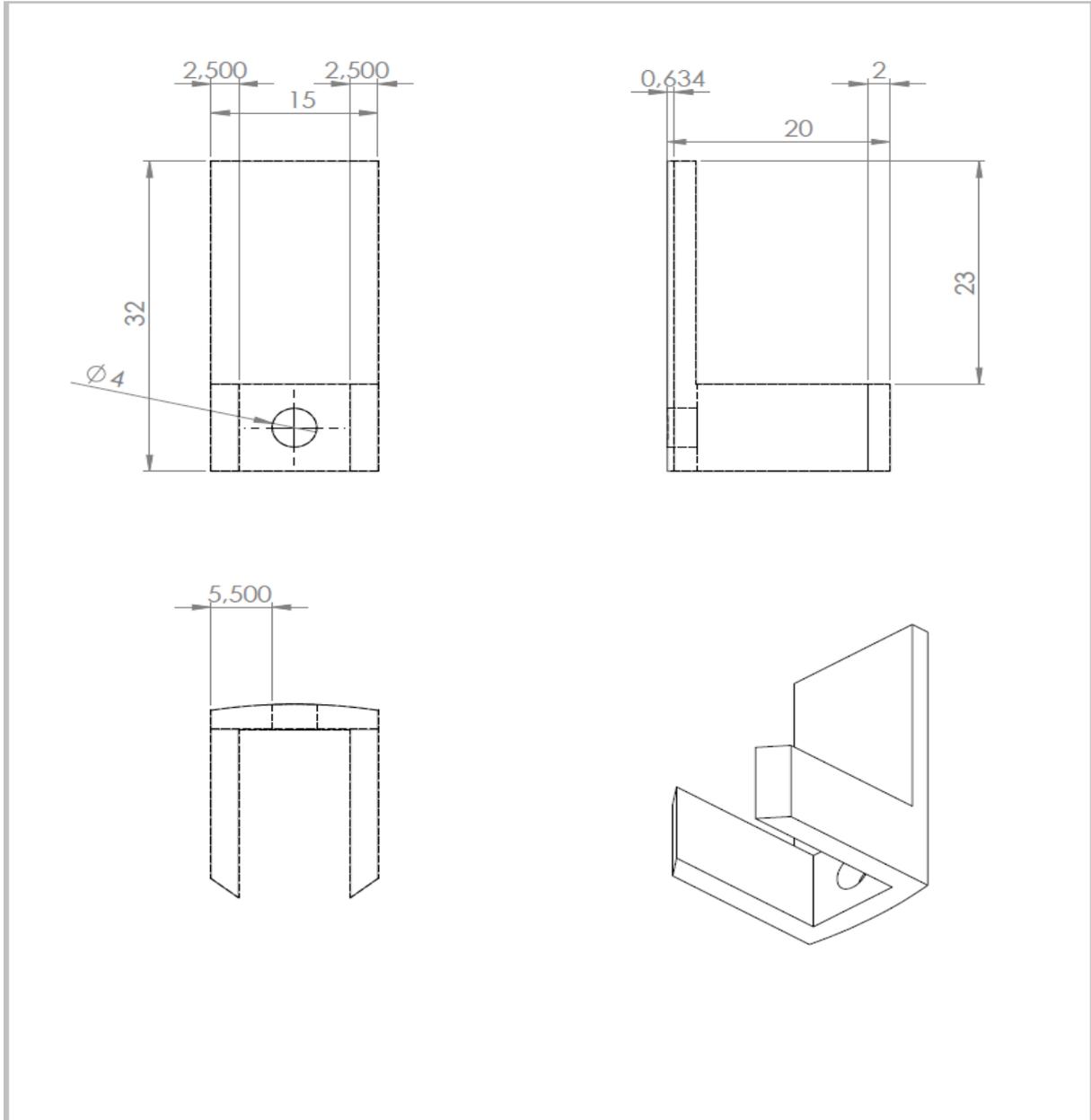
Cette étude a permis d'avoir une première approche sur ces capteurs et sur leurs fonctionnements. Un certain nombre d'erreurs à éviter peut déjà être souligné, ainsi que les précautions à prendre pour protéger les capteurs pour que d'autres étudiants puissent les exploiter. De plus, le programme écrit en langage Matlab doit être également revu, pour mettre plus en avant les performances des capteurs.

Le capteur de déformation

a) Dessin de définition du pied

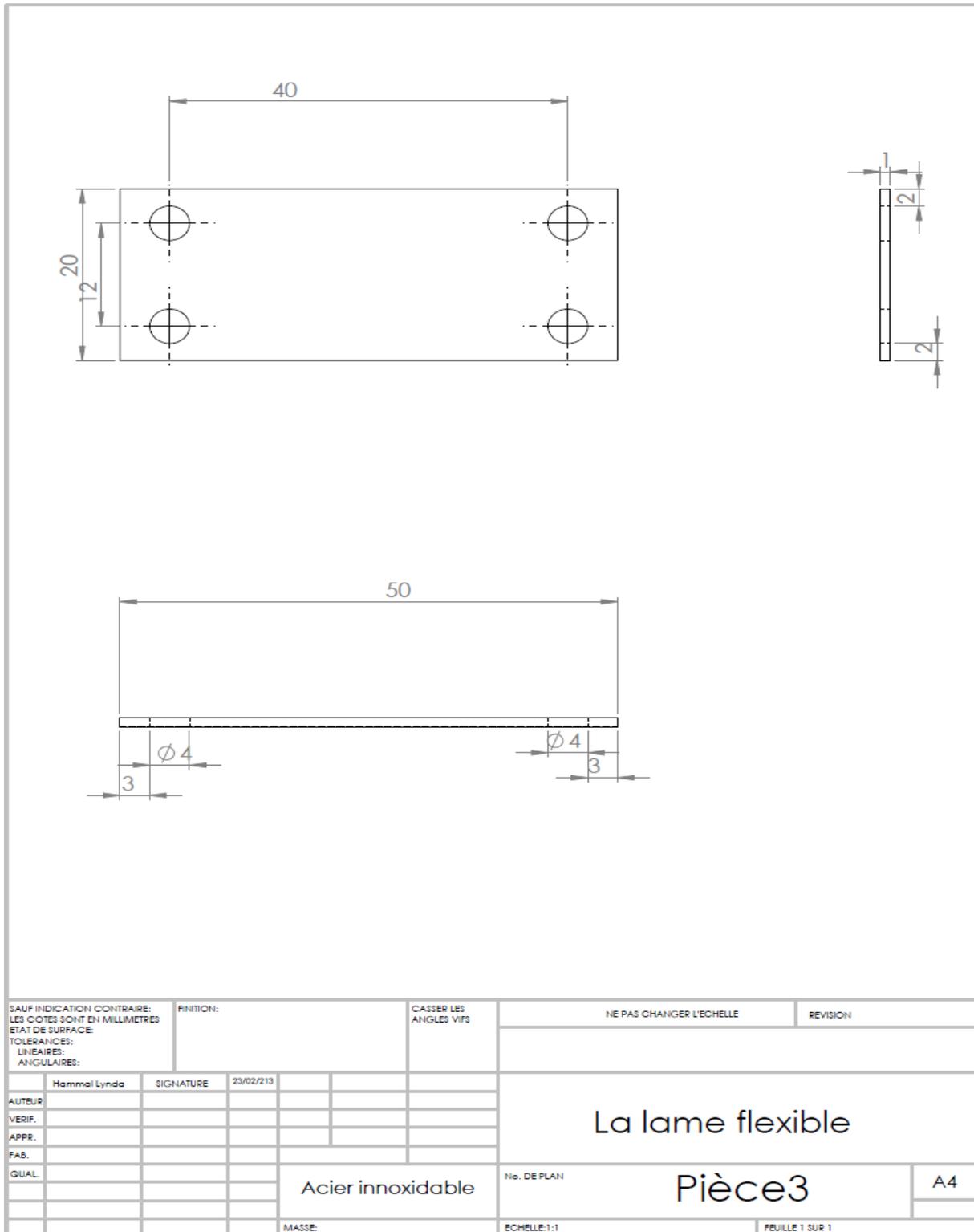


b) Dessin de définition du crochet

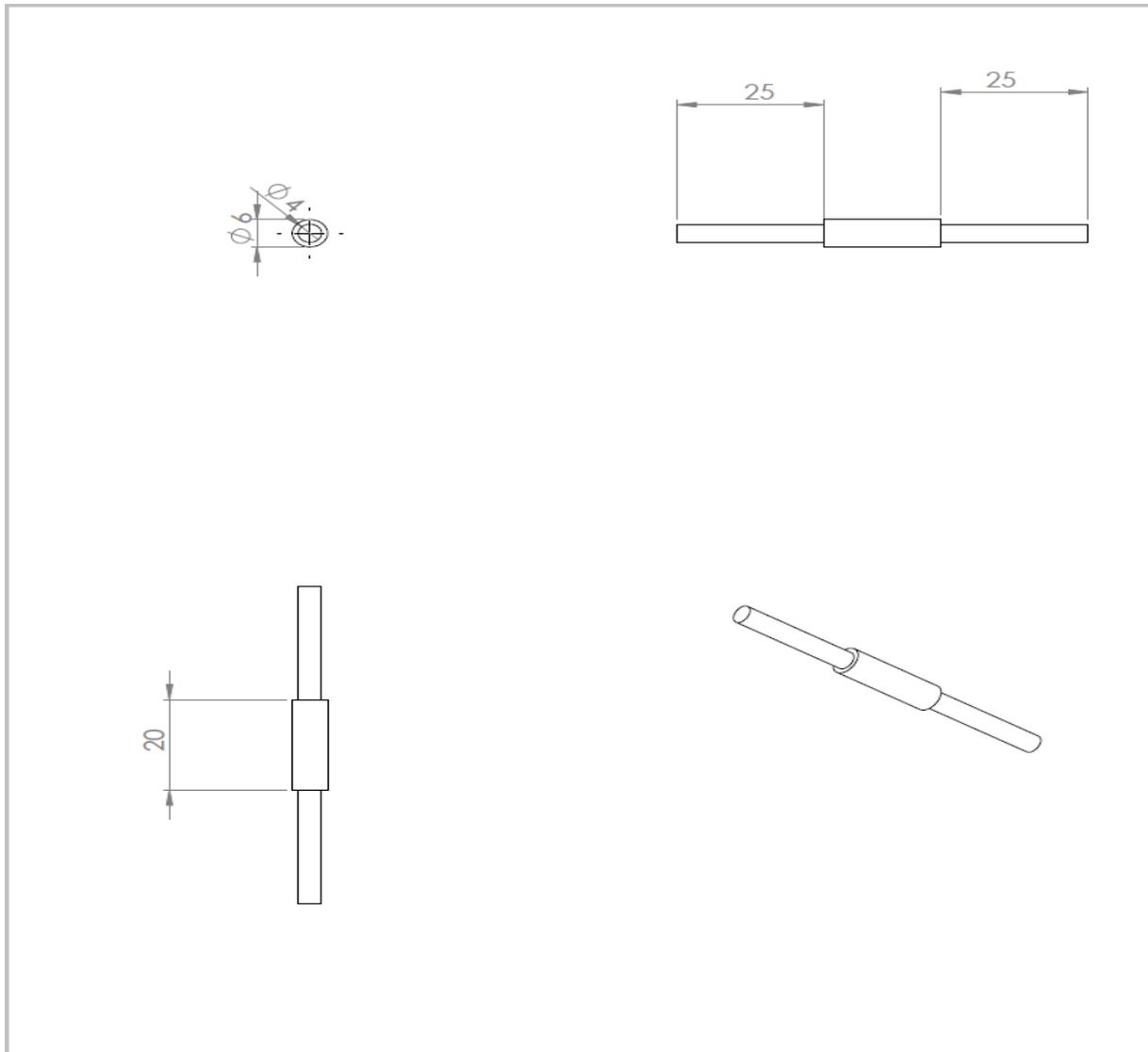


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		SIGNATURE		23/02/2011		TITRE:			
HAMMAL LTD						Dessin de définition			
AUTEUR						No. DE PLAN		A4	
VERIF.						crochet			
APPR.									
FAB.									
QUAL.									
				Aluminium					
				MASSE:		ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

c) Dessin de définition de la lame flexible

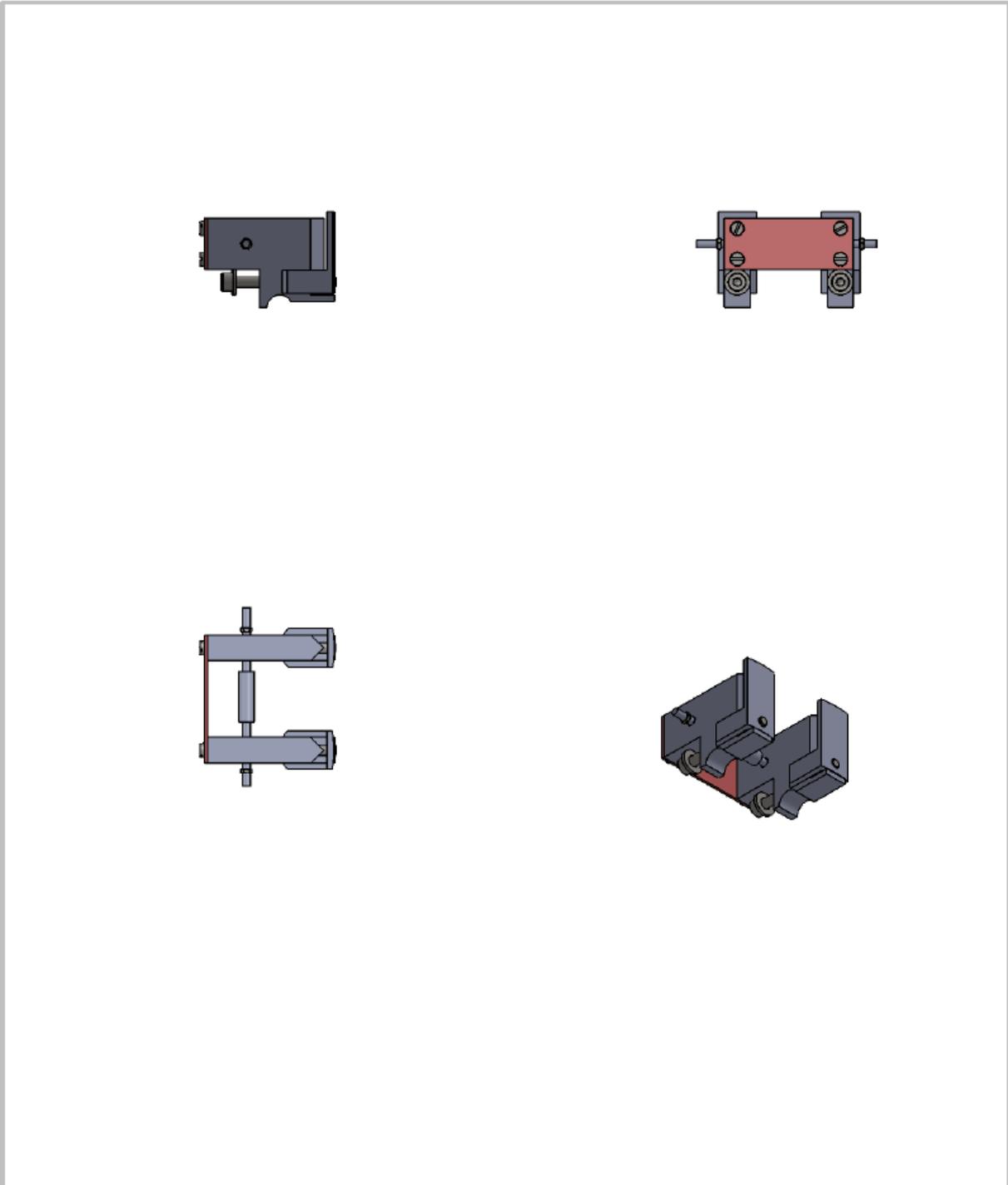


d) Tige comme délimiteur de course



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:									
AUTEUR	Hammal Lynda	SIGNATURE	23/02/2013	Tige					
VERIF.									
APPR.									
FAB.									
QUAL.									
				Alliage d'aluminium		No. DE PLAN		Pièce 4	
								A4	
				MASSE:		ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

e) Assemblage des pièces du capteur de déformation



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:									
AUTEUR Hammal Lynda		SIGNATURE		23/02/2013					
VERIF.								le capteur de déformation	
APPR.									
FAB.									
QUAL.				MATERIAU:		No. DE PLAN		Assemblage1	
								A4	
				MASSE:		ECHELLE:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

a) Programme Matlab pour l'acquisition des données en le tracé en temps réelle des courbes de traction

```
% Lecture de deux signaux analogique voie 0 et voie 3
% Brancher le + capteur 1 sur A0 et le + capteur 2 sur A3
% Brancher les - des deux capteurs sur GND

clear all;
clc;
%delete(instrfind({'Port'},{'COM3'}))
a = arduino('COM3');

xval_1 = zeros();
xval_2 = zeros();
xave_1 = zeros();
xave_2 = zeros();

pause(.001);

xval_1(1) = a.analogRead(3) * (1000/48);
xave_1(1) = xval_1(1);
xval_2(1) = a.analogRead(0) * (1 / (42.04*30.3));
xave_2(1) = xval_2(1);

for i = 2:3000

    xval_1(i) = a.analogRead(3) * (1000/48);
    xave_1(i) = (xval_1(i)+xval_1(i-1))/2;

    xval_2(i) = a.analogRead(0) * (1 / (42.04*30.3));
    xave_2(i) = (xval_2(i)+xval_2(i-1))/2;

%subplot(3,1,1)
%plot(xval_1, 'b');
%plot(xave_1, 'b');
%title('Capteur 1');
%subplot(3,1,2)
%plot(xval_2)
%plot(xave_2, 'b');
%title('Capteur 2')
%subplot(3,1,3)
plot(xave_2,xave_1, 'b');
title('Capteur 1 en fonction du Capteur 2')
axis([0,0.04,0,1200]);
```

```
grid
xlabel('déformation')
ylabel('contraintes MPa')
drawnow
pause(.001);
end
save Lind xave_1 xval_2
```

b) Les résultants des essais de traction

Déformation	contrainte
0	0
0,0008	41,6667
0,0008	83,3333
0,0008	104,1667
0,0008	125
0,0008	145,8333
0,0008	166,6667
0,0008	187,5
0,0008	208,3333
0,0016	229,1667
0,0016	229,1667
0,0016	250
0,0016	270,8333
0,0016	291,6667
0,0024	291,6667
0,0024	312,5
0,0024	312,5
0,0024	312,5
0,0024	291,6667
0,0016	312,5
0,0024	333,3333
0,0024	312,5
0,0016	312,5
0,0024	312,5
0,0024	333,3333
0,0024	333,3333
0,0024	354,1667
0,0024	354,1667
0,0024	375
0,0024	375
0,0024	375
0,0024	395,8333
0,0031	395,8333
0,0024	395,8333

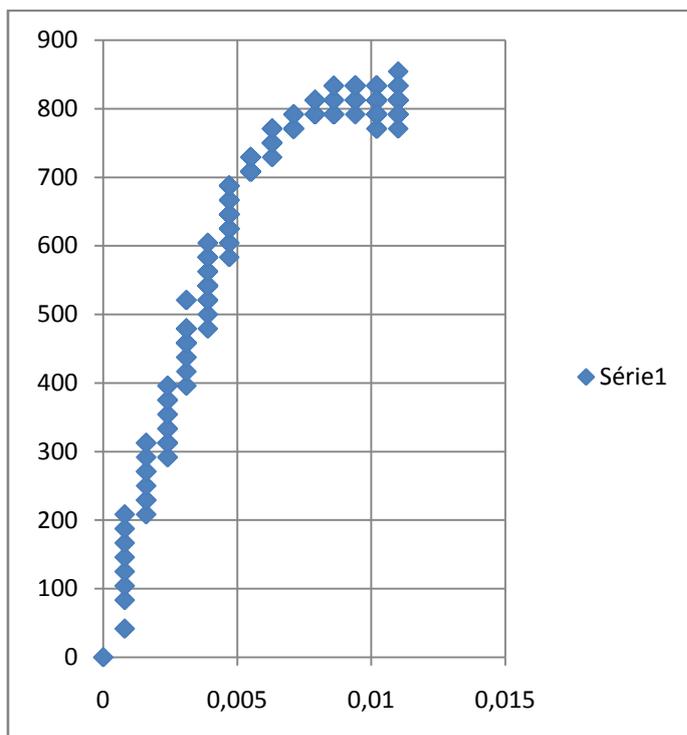
0,0031	416,6667
0,0031	437,5
0,0031	437,5
0,0031	458,3333
0,0031	458,3333
0,0031	479,1667
0,0031	479,1667
0,0031	479,1667
0,0031	479,1667
0,0031	458,3333
0,0031	458,3333
0,0031	458,3333
0,0031	458,3333
0,0031	458,3333
0,0031	479,1667
0,0039	479,1667
0,0039	500
0,0031	458,3333
0,0031	479,1667
0,0031	479,1667
0,0031	520,8333
0,0031	479,1667
0,0039	520,8333
0,0039	520,8333
0,0039	520,8333
0,0039	541,6667
0,0031	520,8333
0,0039	520,8333
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	541,6667
0,0039	562,5
0,0039	562,5
0,0039	562,5
0,0039	562,5
0,0039	583,3333
0,0039	583,3333
0,0039	583,3333
0,0039	583,3333
0,0039	583,3333

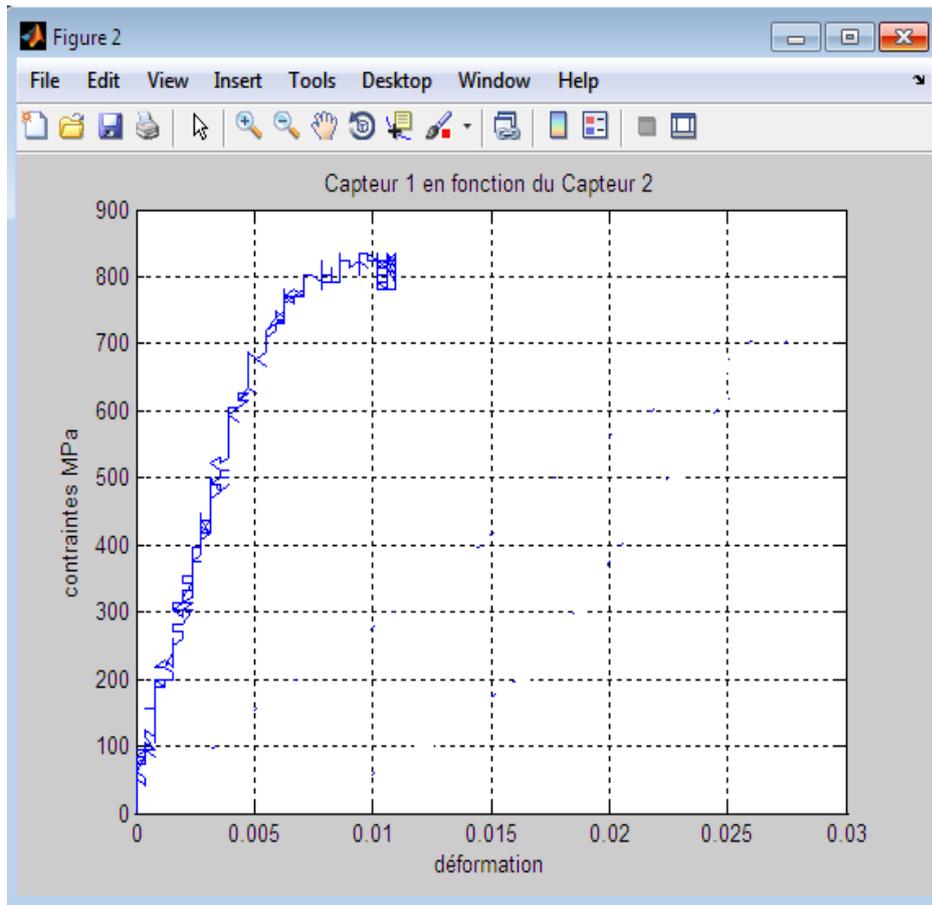
0,0039	583,3333
0,0047	583,3333
0,0039	583,3333
0,0039	604,1667
0,0039	604,1667
0,0047	604,1667
0,0047	604,1667
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	625
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	645,8333
0,0047	666,6667
0,0047	666,6667
0,0047	666,6667
0,0047	666,6667
0,0047	687,5
0,0047	687,5
0,0047	687,5
0,0047	687,5
0,0047	687,5
0,0047	687,5
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	708,3333
0,0055	729,1667
0,0063	729,1667

0,0055	729,1667
0,0055	729,1667
0,0055	729,1667
0,0063	750
0,0063	750
0,0063	750
0,0063	750
0,0063	750
0,0063	770,8333
0,0063	770,8333
0,0063	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	770,8333
0,0071	791,6667
0,0071	791,6667
0,0071	791,6667
0,0079	791,6667
0,0079	791,6667
0,0079	791,6667
0,0079	791,6667
0,0079	812,5
0,0079	812,5
0,0079	812,5
0,0079	812,5
0,0079	812,5
0,0086	812,5
0,0086	791,6667
0,0086	791,6667
0,0086	791,6667
0,0086	791,6667
0,0086	812,5
0,0086	812,5
0,0086	833,3333
0,0086	833,3333
0,0094	833,3333
0,0094	833,3333
0,0094	812,5

0,0094	812,5
0,0094	812,5
0,0094	812,5
0,0094	791,6667
0,0094	812,5
0,0094	812,5
0,0094	833,3333
0,0094	812,5
0,0102	812,5
0,0094	812,5
0,0094	833,3333
0,0094	833,3333
0,0102	833,3333
0,0102	812,5
0,0094	833,3333
0,0102	833,3333
0,0102	833,3333
0,0102	833,3333
0,0102	812,5
0,0102	812,5
0,0102	812,5
0,011	812,5
0,0102	812,5
0,0102	812,5
0,0102	812,5
0,0102	812,5
0,011	812,5
0,0102	812,5
0,0102	833,3333
0,0102	812,5
0,0102	833,3333
0,011	812,5
0,011	833,3333
0,0102	833,3333
0,011	812,5
0,011	812,5
0,011	854,1667
0,011	812,5
0,0102	833,3333
0,011	812,5
0,0102	833,3333
0,011	833,3333
0,011	791,6667
0,011	791,6667
0,0102	833,3333
0,0102	812,5

0,0102	791,6667
0,0102	791,6667
0,0102	791,6667
0,011	791,6667
0,0102	770,8333
0,0102	791,6667
0,0102	812,5
0,0102	791,6667
0,0102	770,8333
0,0102	791,6667
0,0102	791,6667
0,0102	791,6667





Les résultats de l'essai de traction de l'éprouvette 02

0	0
0	10,4167
0	10,4167
0	10,4167
0	10,4167
0	10,4167
0	10,4167
0	20,8333
0	20,8333
0	20,8333
0	31,25
0	31,25
0	20,8333
0	31,25
0	31,25
0	20,8333
0	31,25
0	31,25
0	20,8333
0	31,25
0	31,25
0	20,8333
0	31,25
0	41,6667

Annexe B Le programme écrit en Matlab et les résultats des essais

0 20,8333
0 20,8333
0 31,25
0 20,8333
0 20,8333
0 31,25
0 52,0833
0 62,5
0 62,5
0 62,5
0 62,5
0 52,0833
0 41,6667
0 52,0833
0 62,5
0 62,5
0 52,0833
0 41,6667
0 52,0833
0 72,9167
0 83,3333
0 72,9167
0 62,5
0 72,9167
0 72,9167
0 72,9167
0 72,9167
0 83,3333
0 93,75
0 83,3333
0 93,75
0 93,75
0 93,75
0 114,5833
0 125
0 104,1667
0 93,75
0 104,1667
0 104,1667
0 104,1667
0 114,5833
0 114,5833
0 104,1667
0 104,1667
0 114,5833
0 114,5833
0 114,5833

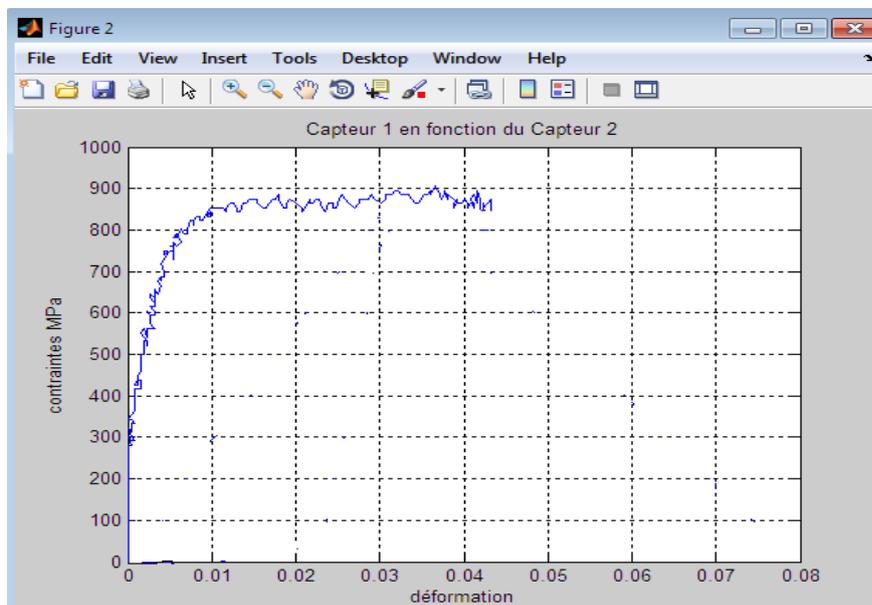
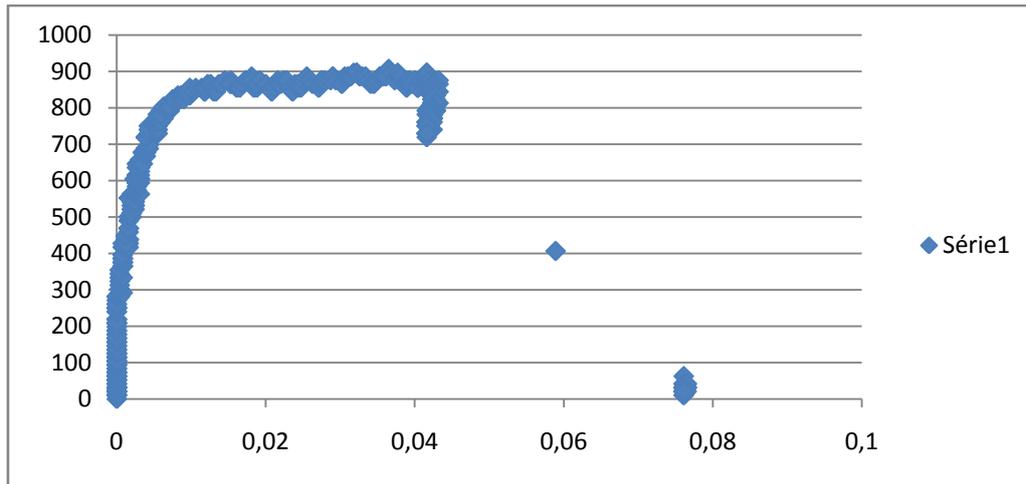
Annexe B Le programme écrit en Matlab et les résultats des essais

0 125
0 125
0 114,5833
0 104,1667
0 125
0 135,4167
0 125
0 135,4167
0 145,8333
0 145,8333
0 156,25
0 145,8333
0 135,4167
0 156,25
0 166,6667
0 166,6667
0 156,25
0 156,25
0 156,25
0 166,6667
0 187,5
0 177,0833
0 177,0833
0 187,5
0 177,0833
0 166,6667
0 187,5
0 208,3333
0 208,3333
0 208,3333
0 208,3333
0 218,75
0 218,75
0 208,3333
0 218,75
0 218,75
0 208,3333
0 197,9167
0 208,3333
0 250
0 250
0 239,5833
0 250
0 250
0 250
0 239,5833

0	250
0	270,8333
0	260,4167
0	260,4167
0	281,25
0	281,25
0	281,25
0,0004	281,25
0,0004	281,25
0,0004	291,6667
0,0008	291,6667
0,0004	302,0833
0,0004	312,5
0,0004	322,9167
0,0004	333,3333
0,0008	333,3333
0,0004	343,75
0,0004	354,1667
0,0008	364,5833
0,0008	364,5833
0,0008	375
0,0008	375
0,0008	364,5833
0,0008	364,5833
0,0008	375
0,0008	375
0,0008	385,4167
0,0008	385,4167
0,0008	385,4167
0,0008	395,8333
0,0008	385,4167
0,0008	395,8333
0,0008	416,6667
0,0012	416,6667
0,0016	416,6667
0,0016	437,5
0,0016	437,5
0,0016	427,0833
0,0016	437,5
0,0012	437,5
0,0008	427,0833
0,0012	427,0833
0,0012	447,9167
0,0012	447,9167
0,0016	458,3333
0,0016	468,75

0,0016	468,75
0,0016	468,75
0,0016	489,5833
0,0016	500
0,002	500
0,002	520,8333
0,002	510,4167
0,002	510,4167
0,002	531,25
0,0024	531,25
0,0024	520,8333
0,0024	531,25
0,002	541,6667
0,0016	552,0833
0,002	562,5
0,0024	541,6667
0,0024	541,6667
0,0024	562,5
0,0024	562,5
0,0024	562,5
0,0027	562,5
0,0031	562,5
0,0027	572,9167
0,0027	583,3333
0,0027	593,75
0,0024	604,1667
0,0027	593,75
0,0031	593,75
0,0031	604,1667
0,0031	604,1667
0,0027	614,5833
0,0027	614,5833
0,0031	614,5833
0,0031	635,4167
0,0027	645,8333
0,0027	635,4167
0,0031	625
0,0031	635,4167
0,0031	635,4167
0,0031	645,8333
0,0031	656,25
0,0035	645,8333
0,0039	666,6667
0,0035	677,0833
0,0035	677,0833
0,0039	687,5

0,0039	687,5
0,0039	677,0833
0,0039	677,0833
0,0039	687,5
0,0043	687,5
0,0043	697,9167
0,0039	718,75
0,0039	718,75
0,0039	718,75
0,0039	718,75
0,0043	729,1667
0,0047	739,5833
0,0047	739,5833
0,0047	739,5833
0,0047	750
0,0043	750
0,0043	739,5833
0,0051	750
0,0055	750
0,0055	729,1667
0,0055	739,5833
0,0055	760,4167
0,0051	760,4167
0,0051	760,4167
0,0055	760,4167
0,0055	770,8333
0,0059	760,4167
0,0063	770,8333
0,0059	791,6667
0,0055	781,25
0,0059	781,25
0,0063	802,0833
0,0063	802,0833
0,0067	791,6667
0,0071	791,6667
0,0071	791,6667
0,0071	802,0833
0,0071	802,0833
0,0071	802,0833



Références bibliographiques

- [1] JEAN-claude Charmet. «Mécanique du solide et matériaux – Elasticité-Plasticité-Rupture», ESPCI , Laboratoire d'hydrodynamique et mécanique physique.
- [2] MARC BERY «Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux », 2006-2007.
- [3] CLAUDIU BADULESCU «Calcul précis des déformations planes par la méthode de la grille, application à l'étude d'un multicristal d'aluminium, Université BLAISE PASCAL - Clermont 8 janvier 2010.
- [4] C.BADULES, J.D.MATHIAS et M.GREDIAC «Calcul direct de champs de déformations avec la méthode de la grille : Principe et applications ».
- [5] MARIE LINE ZANI- Demange, d'après Henri Gérenton «LDS test& measurement», France, Décembre 2008, (www.mesures.com)
- [6] T.BEN MBAREK. L.ROBERT «Utilisation d'une méthode optique sans contact pour décrire le comportement mécanique de composites bois/plastique ».
- [7] Cyril Bréque , Fabrice Brémand et Jean-cristophe Duprén«Application des méthodes optiques de mesure aux matériau biologique», laboratoire de mécanique des solides, université de Poitiers .
- [8] Romain Vilain « Conception et essai d'un capteur de déformation dans la glace», université LAVAL, QUEBEC, Canada 2010
- [9] BEN DJABALLAH.L «Calcul numérique du module de Young d'un matériau homogène et isotrope basé sur la théorie des poutres», Université Mentouri coustantine , 2010.
- [10] J.LUC Le GOËR, J.AVRIL « Capteurs à jauges extensométrique», publier 1992.
- [11] D.Mansion «La technologie des capteurs de déformation», Paris 1984.
- [12] G.ASCH « les capteurs en instrumentation industrielle », Edition DUNUD, cinquième édition (1999)
- [13] Fabrice BRÉMAND« mesures en mécanique par méthodes optiques ». Technique de l'ingénieur, R1850, 2011.
- [14] D.BELLET-J.J.BARREAU « Cours d'élasticité ». Éditions Cepadues 1990.
- [15] Denis Dartus « Elasticité linéaire ». CEPADUES-EDITIONS janvier 1995.

[16] Dominique François, André Pineau et André Zaoui « Comportement mécanique des matériaux ». Éditions HERMES 1995.

[17] Jean-Noël Montagné, « Livret Arduino Initiation à la mise en œuvre matérielle et logicielle de l'Arduino », Centre de Ressources Art Sensitif, novembre 2006, sous licence CC

[18] Patrick Poulichet « Cours sur l'électronique de conditionnement du capteur » Novembre 2006