

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURS ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin d'étude

*En vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie
mécanique*

THEME

**Conception et réalisation d'un extensomètre utilisé
en mécanique de la rupture**

Proposé et dirigé par :

Y. BELKACEMI

B. GUERGUEB

Etudié par :

A. MELLAL

2011-2012

ملخص

الهدف من هذا المشروع هو دراسة تصميم و صناعة جهاز قياس التمدد يستعمل في ميكانيك الانكسار. وقد تم هذا التصميم و الدراسة بواسطة برنامج السوليدواركس. هذا الجهاز صنع و بعد ذلك استعمل في تجربة التمدد على قطع تجريبية نوع س ت.

كلمات مفتاحية: جهاز قياس التمدد, السوليدواركس, قطع تجريبية نوع س ت.

Résumé

L'objectif de ce projet est l'étude de la conception et la réalisation d'un extensomètre utilisé dans la mécanique de la rupture. La conception et l'étude sont faites par le logiciel SolidWorks. L'extensomètre est fabriqué puis utilisé dans un essai de traction sur des éprouvettes CT.

Mots clés : extensomètre, SolidWorks, essai de traction, éprouvette CT

Abstract

The objective of this project is the study of the design and the realization of an extensometer used in the breaking process. The design and the study are made by the SolidWorks software. The extensometer is manufactured then used in a tensile test on test-pieces CT.

Key words: extensometer, SolidWorks, tensile test, test-pieces CT.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A mes chers parents

A mon frère Mohamed

A mes sœurs

A ma famille et tous mes amis

Remerciements

Je remercie en premier lieu ALLAH le tout puissant de m'avoir donné la santé et le pouvoir d'accomplir ce modeste travail.

Mes remerciements vont à M. Y.BELKACEMI et M. B.GUERGUEB d'avoir acceptés de m'encadrer, de leurs précieux conseils et de leurs disponibilités.

Je tien aussi, à remercier les membres du jury de me faire l'honneur de lire et évaluer ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à monsieur H. Zahana, chef de l'entreprise USI-PRECIS, qui a participé à la réalisation du prototype.

Je remercie également monsieur I. Belhadef, responsable du laboratoire de génie mécanique de m'avoir permis d'effectuer ce travail dans des bonnes conditions.

Merci à tous les enseignants qui ont contribués à ma formation tout au long de mes études

Je remercie aussi toutes les personnes qui ont pu m'aider un jour.

Table des matières

DEDICACES

REMERCIEMENTS

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

I.1. Introduction	3
I-2 Modes fondamentaux de rupture	3
I-3 Approche Locale	4
I-3-1 Champ de contrainte et de déplacement au voisinage du front de fissure	4
I.3.2 facteurs d'intensité des contraintes	7
I.3.2.1 calcul des facteurs d'intensité des contraintes	7
I-4- critères de ruine	8
I-5 conclusion	8

CHAPITRE II : NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

II.1. Introduction	9
II.2. principe de fonctionnement des jauges de déformation	9
II.2.1. Changement de résistance provoqué par la déformation	10
I.2.2. Changement de résistance provoqué par l'effet parasite thermique	12
II.3. Caractéristiques des jauges de déformation	13
II.3.1 Matériaux des jauges	13
II.3.2. Principaux types de jauges	14
II.4. Circuit de conditionnement	16
II.4.1 circuit de base, le pont de Wheatstone	16
II.4.2. Principe de la compensation en température	18
II.4.3. disposition des jauges	19

CHAPITRE III: ESSAI FONDE SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

III.1 Introduction	22
III.2. Eprouvettes	22
III.2.1. Dimensions	22
II.2.2. conditions de réalisation	25
III.2.3. Fissuration par fatigue	26
III.3. Dispositif d'essai	27
III.4. Détermination de K_{IC}	27
III.5. Conclusion	29

CHAPITRE IV: CONCEPTION DE L `EXTENSOMETRE

IV.1. Introduction	30
IV.2. Extensomètre (généralités)	30
IV. 2.1. Définition	30
IV.2.2. Types	30
IV.3. Proposition de modèle	31
IV. 3.1. Le modèle proposé	31
IV.3.2. Comparaison	33
IV. 4. Modèle mathématique	33
IV.5. Conception du l'extensomètre	36
IV.5.1. Logiciel de simulation SolidWorks	36
IV.5.2. Informations sur le modèle choisi	37
IV.5.3. L'étude conceptuelle	38
IV.6. Réalisation de l'extensomètre	43
IV.6.1. Dimensionnement des lames	43
IV.6.2. Fabrication et montage	44
IV.7. Conclusion	45

Chapitre V : Etude expérimentale

V.1. Introduction	46
V.2. Description de la Machine d'essai de traction à utiliser	46
V.3. L'éprouvette	48
V.3 .1. La réalisation	48

V.3 .2. Préparation de l'éprouvette	49
V.3 .3. Dimensions de l'éprouvette	50
V.4. Etalonnage du l'extensomètre	50
V.4 .1. Premier test d'étalonnage	51
V.4 .2. Deuxième test d'étalonnage	53
V.5. Essai de traction	53
V.5 .1. Dispositif d'essai	53
V.5 .2. Principe de l'essai	55
V.5.3. Résultat et interprétation	56
V.5 .3.1 . Courbe charge déplacement	56
V.5 .3. 2. Interprétation des résultats	62
V.6. Conclusion	63

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Liste des figures

Figure. I.1 : Mode fondamentaux de la rupture.....	4
Figure. I.2 : Champ de contraintes au voisinage du front de la fissure.....	5
Figure. II.1 : Représentation des principaux éléments d'une jauge de déformation..	9
Figure. II.2 : Contrainte uni-axiale.....	11
Figure. II.3 : Déformation apparente en fonction de la température des différents alliages.....	12
Figure. II.4 : Principe de la jauge de compensation.....	13
Figure. II.5 : Jauge à fil tramé.....	15
Figure. II.6 : Exemples de jauges a trame pelliculaire.....	15
Figure. II.7: Pont de Wheatstone.....	17
Figure. II.8 : Montage en demi-pont.....	19
Figure. II.9 : Mesure de traction ou de compression à l'aide d'un plein pont.....	19
Figure. II.10 : Mesure de la flexion à l'aide d'un demi-pont.....	20
Figure. II.1 : Mesure de flexion à l'aide d'un pont complet.....	21
Figure. III.1 : Eprouvette compacte de traction (CT)	22
Figure. III.2 : Eprouvette de flexion a trois points d'appui (F3P)	23
Figure. III.3 : Détails des entailles	24
Figure. III.4 : Variation de K_C avec l'épaisseur de l'éprouvette	25
Figure. III.5 : Mesure de l'écartement des lèvres à l'aide d'un extensomètre.....	27
Figure. III.6 : Principaux types de courbes charges-déplacement.....	28

Figure. IV.1 : Extensomètre a agrafe.....	31
Figure. IV.2 : Extensomètre avec deux lames.....	32
Figure. IV.3 : Extensomètre avec lame pliée.....	32
Figure. IV.4 : Schéma représentatif d'un extensomètre à lames.....	34
Figure. IV.5 : Schéma illustrant la flexion de la lame.....	34
Figure. IV.6 : Contrainte normale en flexion.....	35
Figure. IV.7 : Dimensions de la lame étudiée.....	38
Figure. IV.8 : Distribution des contraintes.....	39
Figure. IV.9 : Taux de déformation.....	39
Figure. IV.10 : Distribution des contraintes.....	40
Figure. IV.11 : Taux de déformation.....	40
Figure. IV.12 : Distribution des contraintes.....	41
Figure. IV.13 : Taux de déformation.....	41
Figure. IV.14 : Distribution des contraintes.....	42
Figure. IV.15 : Taux de déformation.....	42
Figure. IV. 16 : L'extensomètre réalisé.....	45
Figure. V.1 : Anneau dynamométrique.....	47
Figure. V.2 : Machine d'essai de traction proposée.....	47
Figure. V.3 : Eprouvette CT.....	49
Figure. V.4 : Mécanismes pour la fixation de l'extensomètre.....	49
Figure. V.5 : Eprouvette CT préparée.....	50
Figure. V.6 : Schéma d'étalonnage du l'extensomètre.....	51
Figure. V.7 : Courbe d'étalonnage des petites courbures.....	52

Figure. V.8 : Courbe d'étalonnage des grandes courbures.....	53
Figure. V.9 : Essai de traction sur éprouvette (CT).....	54
Figure. V.10 : Dispositifs de fixation.....	54
Figure. V.11 : Distribution des contraintes à la charge maximale	55
Figure. V.12 : Appareillage utilisé pour la mesure des déformations.....	56
Figure. V.12 : Courbe charge-déplacement pratique.....	57
Figure. V.14 : Distribution des déplacements pour $F= 1800 \text{ N}$	58
Figure. V.15 : Distribution des déplacements pour $F= 2800 \text{ N}$	58
Figure. V.16 : Distribution des déplacements pour $F= 3800 \text{ N}$	59
Figure. V.17 : Distribution des déplacements pour $F= 4800 \text{ N}$	59
Figure. V.18 : Distribution déplacements pour $F= 5800 \text{ N}$	60
Figure. V.19 : Courbe charge-déplacement théorique.....	61
Figure. V.20 : Disposition des deux figures.....	62

Liste des tableaux

Tableau. II.1 : Facteur de jauge pour différents matériaux.....	11
Tableau. II.2 : Alliages métalliques des jauges résistives.....	14
Tableau. III.1 : Détails des entailles.....	24
Tableau. III.2 : Résistance à la rupture de quelque alliages d`aluminium.....	26
Tableau. IV.1 : Caractéristiques mécaniques de l`acier inoxydable.....	38
Tableau. V.1 : Désignation des composantes de la machine d`essai de traction.....	48
Tableau. V.2 : Caractéristiques mécaniques de l`alliage d`aluminium 7022.....	48
Tableau. V.3 : Valeurs des déformations obtenues.....	51
Tableau. V.4 : Valeurs des déformations obtenues.....	53
Tableau. V.5 : Valeurs de déformations obtenues.....	56
Tab V.6 : Valeurs de déplacements.....	57
Tab V.7 : Valeurs des déplacements obtenus par simulation.....	60

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le choix d'un métal pour un certain but d'utilisation s'effectue sur la base de ses propriétés physico-chimiques, mécaniques et technologiques.

Si la connaissance des matériaux d'après leur nature, leurs caractéristiques et leurs comportements en service, constitue la base de toute technique en construction mécanique, par contre l'essai des métaux est le noyau indispensable pour pouvoir déterminer quantitativement leurs caractéristiques.

Afin d'obtenir des résultats reproductibles à la suite de mesures répétées et afin de pouvoir conclure à la validité des essais en tout temps et en tout lieu, pour que les contrôles puissent être considérés comme fiables, on procède à des essais mécaniques fondamentaux de telle sorte que les éprouvettes spécialement utilisées soient sollicitées par une contrainte mécanique simple.

Dans l'étude des structures fissurées plusieurs types d'éprouvettes sont utilisés pour la détermination des propriétés des matériaux employés en mécanique de la rupture.

Les essais faits sur ces éprouvettes nécessitent des instruments de mesure, parmi lesquelles on trouve l'extensomètre.

Les extensomètres se basent sur une méthode expérimentale de mesure appelée l'extensométrie, Le but de l'extensométrie est de mesurer le champ de déformation et de permettre l'acquisition de cette mesure pour l'exploiter.

Le présent travail de mémoire d'ingénieur consiste en la conception et la réalisation d'un extensomètre utilisé dans les essais de mécanique de la rupture.

Ainsi le travail se présente comme suit:

On s'intéresse dans le premier chapitre au rappel des principes de base de la mécanique linéaire de la rupture.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des notions d'extensométrie par jauges à résistance électrique.

INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre est axé sur la présentation d'essais fondés sur la mécanique linéaire de la rupture faits sur des éprouvettes normalisées.

En quatrième et cinquième chapitres, nous proposons un modèle d'extensomètre qui s'adapte avec nos essais en faisant la conception et la réalisation de celui-ci ainsi que les moyens de fixation et des éprouvettes CT pour des test préliminaires. La conception est faite à l'aide du logiciel SolidWorks et la réalisation est faite dans l'atelier de notre département avec la collaboration de l'entreprise USI-PRECIS.

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

I-1 Introduction

On admet volontiers qu'un réservoir sous pression finit par se rompre lorsqu'on augmente suffisamment la pression, au-delà de celle pour laquelle les contraintes dans les matériaux restent dans le domaine élastique. Or, des ruptures brutales ont été observées, sans raison apparente immédiate, à des pressions nettement plus basses, lorsque de tels accidents ont été étudiés de manières détaillées, il a été constaté qu'il existait en général préalablement à la rupture un défaut, générateur localement de concentration de contraintes [1].

La mécanique de la rupture peut être définie comme la science de l'étude du comportement d'une structure fissurée.

Les fissures peuvent être considérées comme des défauts formés durant une étape de fabrication ou se produire durant le fonctionnement.

Selon la nature du matériau et les conditions d'exploitation on distingue deux types de rupture

- 1- la rupture ductile : est caractérisée par une zone de déformation plastique non négligeable avant et durant la propagation de la fissure (mécanique non linéaire de la rupture).
- 2- La rupture fragile : est caractérisée par l'absence de déformation plastique significative (mécanique linéaire de la rupture [2]). C'est le cas de notre étude.

I-2 Modes fondamentaux de rupture

Hypothèses :

- le matériau est supposé homogène et isotrope
- le chargement est supposé quasi statique
- on se restreint au problème plan bidimensionnel

Considérons une fissure dans un milieu plan. Selon la direction de la sollicitation par rapport à celle de la fissure on distingue, trois cinématiques remarquables du déplacement relatif des lèvres de la fissure [3] représentant les

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

trois modes fondamentaux de rupture. Elles sont représentées dans le repère orthonormé $(\vec{x}_1, \vec{x}_2, \vec{x}_3)$ (fig. I.1).

Mode I : ou mode d'ouverture [fig. I.1.a], il est caractérisé par une sollicitation de traction perpendiculaire au plan de la fissure, ce mode est le plus dangereux.

Mode II : ou mode de cisaillement plan [fig. I.1.b], il est caractérisé par une sollicitation de cisaillement dans le plan de la fissure dont l'action est Perpendiculaire au front de la fissure.

Mode III : ou mode de cisaillement anti plan [fig. I.1.c], il est caractérisé par une sollicitation de cisaillement parallèle au plan de la fissure dont l'action est parallèle au front de la fissure.

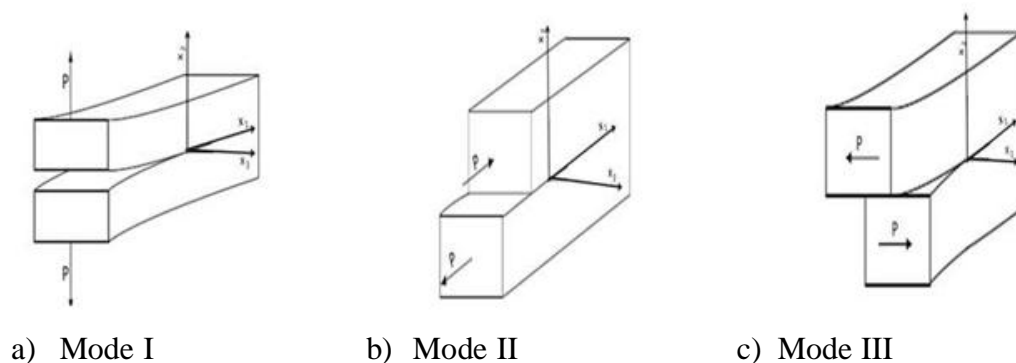


Fig.I.1 modes fondamentaux de la rupture

I-3 Approche Locale

Cette approche consiste à déterminer les paramètres de la mécanique de la rupture à l'aide des champs de contraintes et de déplacements locaux à la pointe de la fissure. Pour définir ces champs en pointe de fissure, on introduit la notion de facteurs d'intensité des contraintes.

I-3-1 Champ de contrainte et de déplacement au voisinage du front de fissure

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

Les champs de contrainte et de déplacement proche du front de la fissure sont des paramètres nécessaires à connaître. Ces champs gouvernent le processus de la rupture qui a lieu à la pointe de la fissure. Pour cela nous allons faire une étude des contraintes et déplacements au voisinage de la pointe de fissure dans le cas des trois modes de rupture.

Ces contraintes ont été calculées par Westergaard à l'aide de la fonction d'Airy [4] et par Irwin à l'aide de la théorie de l'élasticité [5]. Elles sont exprimées par les relations (1.1), avec les notations de la (fig.I.2).

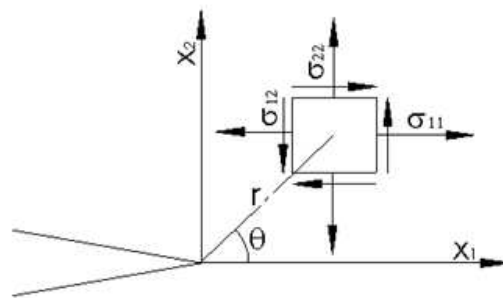


Fig. I.2 Champ de contraintes au voisinage du front de la fissure

La figure (fig. I.2) schématise les contraintes sur un élément centré sur un point M repéré par les coordonnées polaires r , θ par rapport à l'extrémité d'une fissure sollicitée en mode d'ouverture ou mode I.

Pour le Mode I, les contraintes et déplacements au voisinage du front de fissure s'écrivent

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\end{aligned}\tag{1.1}$$

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

Et

$$u_x = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[(1 - 2\nu) + \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.2)$$

$$u_y = \frac{K_I}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2(1 - \nu) + \cos^2 \frac{3\theta}{2} \right]$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_y]$ selon l'axe (oy) est :

$$[u_y] = u_y(r, \pi) - u_y(r, -\pi) = \frac{4K_I}{\mu} (1 - \nu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (1.3)$$

On remarque qu'à la pointe de la fissure, les contraintes sont singulières en $r^{(-1/2)}$ et que le déplacement d'ouverture tend vers 0 comme $r^{(1/2)}$.

Pour le Mode II, les contraintes et déplacements au voisinage du front de fissure s'écrivent :

$$\begin{aligned} \sigma_{xx} &= -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \right] \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2} \\ \sigma_{xy} &= \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left[1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right] \end{aligned} \quad (1.4)$$

Et

$$u_x = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left[2(1 - \nu) + \cos^2 \frac{3\theta}{2} \right] \quad (1.5)$$

$$u_y = \frac{K_{II}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left[-(1 - 2\nu) + \sin^2 \frac{3\theta}{2} \right]$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_x]$ selon l'axe (ox) est:

$$[u_x] = u_x(r, \pi) - u_x(r, -\pi) = \frac{4K_{II}}{\mu} (1 - \nu) \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \quad (1.6)$$

Enfin pour le mode III, les contraintes et déplacements s'écrivent comme suit :

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

$$\begin{aligned}\sigma_{xz} &= -\frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{yz} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \\ \sigma_{xx} &= \sigma_{yy} = \sigma_{zz} = \sigma_{xy} = 0\end{aligned}\tag{1.7}$$

Et

$$\begin{aligned}u_z &= \frac{K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \\ u_x &= u_y = 0\end{aligned}\tag{1.8}$$

La discontinuité ou saut de déplacement $[u_z]$ selon l'axe (oz) est:

$$[u_z] = u_z(r, \pi) - u_z(r, -\pi) = \frac{4K_{III}}{\mu} \sqrt{\frac{r}{2\pi}}\tag{1.9}$$

Avec

ν : Coefficient de Poisson

μ : Module de cisaillement, tel que

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}\tag{1.10}$$

I.3.2 facteurs d'intensité des contraintes

Les facteurs K_I, K_{II}, K_{III} sont appelées les facteurs d'intensité de contraintes et sont exprimées en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Ces paramètres dépendent uniquement des conditions de chargement et de la géométrie et ils caractérisent la singularité du champ de contraintes.

I.3.2.1 calcul des facteurs d'intensité des contraintes

Les facteurs d'intensité des contraintes peuvent être déterminés si l'on connaît les expressions des composantes non nulles des contraintes et déplacement. Ces calculs peuvent être menés dans le cas analytique en utilisant la méthode de Westergaard [3]. Dans les modèles numériques, il est plus judicieux d'utiliser les sauts de déplacement $[u_i]$ comme par exemple les approximations dues à Blanford [6] en utilisant deux points de collocations. Dans notre cas, nous optons pour le calcul utilisant les sauts de déplacement.

I GENERALITES SUR LA MECANIQUE DE LA RUPTURE

$$\begin{aligned}K_I &= \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yy} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{E}{8(1-\theta^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_y] \\K_{II} &= \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xy} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{E}{8(1-\theta^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_x] \\K_{III} &= \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{yz} \sqrt{2\pi r}) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{E}{8(1-\theta^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} [u_z]\end{aligned} \quad (1.11)$$

I-4- critères de ruine

Il existe aussi une valeur critique K_{IC} du facteur d'intensité de contrainte telle que la fissure ne se propage de façon instable que lorsque :

$$K_I \geq K_{IC} \quad (1.12)$$

K_{IC} caractérise la résistance du matériau à la propagation plane des fissures en mode I. Sa valeur est indépendante de la géométrie du détail et des conditions de chargement.

Ce concept n'est valable que dans le cas d'un matériau isotrope ayant un comportement élastique parfaitement plastique. Par ailleurs, la concentration de contrainte en fond d'entaille crée une plastification locale. Il est nécessaire que la taille de cette zone plastique reste petite par rapport à la longueur de la fissure et aux dimensions de la structure de façon de ne pas perturber la distribution élastique des contraintes. Dans ce cas, la zone plastique, entièrement entourée de matériau de comportement élastique, se comporte elle-même de cette façon qui peut par conséquent se caractériser par le facteur d'intensité de contrainte K_I .

La mécanique linéaire élastique de la rupture est donc d'autant plus applicable que la zone plastifiée est petite, ce qui impose aux pièces d'avoir des dimensions très supérieures à la taille de cette zone [5].

I-5 conclusion

Le facteur d'intensité de contrainte critique est obtenu expérimentalement.

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

II.1. Introduction

L'origine des jauges à résistance électrique trouve sa source dans une série d'expériences conduites par William Thomson (Lord Kelvin) au sujet des propriétés électromécaniques des métaux. Une de ses découvertes (1856) était que la résistance électrique de certains fils varie lorsqu'ils sont étirés. Depuis, ce phénomène a été quantifié comme étant le facteur de jauge.

Le développement des premières jauges en Amérique du nord remonte aux années 1930. Elles furent fabriquées par Simmons et Ruge dans laboratoire du MIT. Ces premières jauges consistaient en un fil enroulé d'un support de papier. En 1952, les anglais Sanders et Roe introduisirent les jauges à trame pelliculaire qui sont fabriquées par un procédé de photogravure. Depuis lors, c'est devenu la technique expérimentale d'analyse de contrainte la plus populaire. [8]

II.2. principe de fonctionnement des jauges de déformation

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 est collé à la pièce par l'entremise d'un support d'isolation [Fig. II.1]. Lorsque la pièce est soumise au chargement, sa déformation est transmise à travers la colle et le support à la jauge. Un chargement proportionnel à la résistance en résulte, [8].

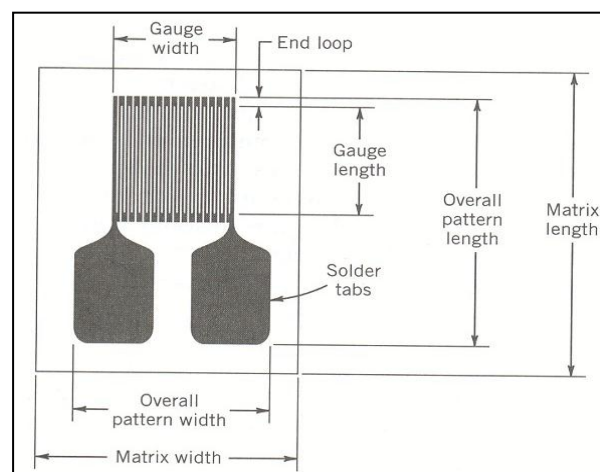


Fig. II.1 Représentation des principaux éléments d'une jauge de déformation.

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

II.2.1. Changement de résistance provoqué par la déformation

La résistance d'un fil conducteur est:

$$R = \rho_c \cdot \frac{l_c}{S_c} \quad (2-1)$$

Où :

ρ_c : Résistivité ($\Omega \cdot m$)

l_c : Longueur du conducteur (m)

S_c : Section du conducteur (m^2)

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

$$dR = \frac{l_c}{S_c} \cdot d\rho_c + \frac{\rho_c}{S_c} \cdot dl_c - \rho_c \cdot \frac{l_c}{S_c^2} \cdot dS_c \quad (2-2)$$

On terme de résistance unitaire, on obtient :

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho_c}{\rho_c} + \frac{dl_c}{l_c} - \frac{dS_c}{S_c} \quad (2-3)$$

La section circulaire unitaire est définie par :

$$\frac{dS_c}{S_c} = -2\nu \frac{dl_c}{l_c} \quad (2-4)$$

D'où :

$$\frac{dR}{R} = (1 + 2\nu) \cdot \frac{dl_c}{l_c} + \frac{d\rho_c}{\rho_c} \quad (2-5)$$

Si, en première approximation, on admet que la résistivité ρ_c est constante, On peut alors exprimer la variation relative de la résistance par :

$$\frac{dR}{R} = K \cdot \frac{dl_c}{l_c} \quad (2-6)$$

$$\text{Avec : } k = 1 + c + 2\nu(1 - c) \quad (2-7)$$

Ou c représente la constante de Bridgeman

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

K représente la sensibilité d'un appareil piézorésistant, dépend principalement du constituant de la jauge. sa valeur exacte est déterminé par le fabricant au cours d'un essai standardisé [TAB. II.I] ; elle est inscrite sur chaque boîte de jauges.

La majorité des jauges à grille de mesure métallique ont un facteur K voisin de 2. Une fabrication de jauges avec un facteur K d'une valeur exactement égale à 2 n'est malheureusement pas possible, [9].

Des procédures d'essais standardisées sont utilisées par les fabricants pour établir le facteur de jauge ; dans ces procédures, la jauge doit être soumise à des déformations variant de 0 à 1000 ($\mu\text{m}/\text{m}$) dans un champ de contrainte uni-axiale et uniforme [Fig. II.2]. La jauge doit être collée sur une pièce faite d'un matériau dont le coefficient de Poisson est de $0,285 \pm 1\%$ (acier laminé à froid),[7].

Pour l'utilisateur, il peut se produire deux situations dans un essai réel :

- 1) La contrainte est uni-axiale, avec $\nu = \nu_0$ alors $\varepsilon_{mesuré} = \varepsilon$
- 2) L'état de contrainte est quelconque ou bien $\nu \neq \nu_0$ dans ce cas $\varepsilon_{mesuré} \neq \varepsilon$

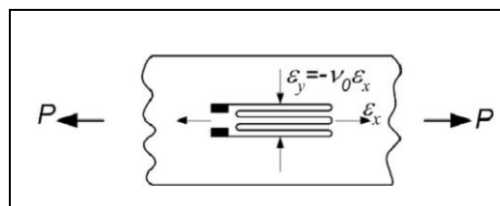


Fig. II.2 Contrainte uni-axiale, [7].

Tab. II.1 Facteur de jauge pour différents matériaux, [10].

<i>matériau</i>	<i>facteur de jauge</i>
acier	2
platine tungstène	4,1
élinvar ou isoélastic, fer chrome molybdène	3,5
nichrome	2,5
constantan (nickel chrome)	2,1
karma (nickel chrome cuivre fer)	2,1
manganin cuivre nickel manganèse	0,5
semi-conducteurs	100 à 200

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

II.2.2. Changement de résistance provoqué par l'effet parasite thermique

Lorsqu'une jauge est collée sur une structure subit une différence de température en l'absence de déformation mécanique, il se produit trois phénomènes [11]:

- Variation de la résistance de la jauge ($B_G \Delta T$)
- Dilatation de la structure (a_S)
- Dilatation de la grille (a_G)

*Variation de résistance de la grille :

$$\frac{dR}{R} = B_G \Delta T \quad (2-8)$$

Où B_G est le coefficient thermique de la grille

*Différence de dilatation structure-grille :

$$(a_S - a_G).$$

La résultante de ces effets est donc une courbe de déformation apparente [Fig. II.3]:

$$\varepsilon_{app} = \left[\frac{B_G}{K} - (a_S - a_G) \right] \cdot \Delta T \quad (2-9)$$

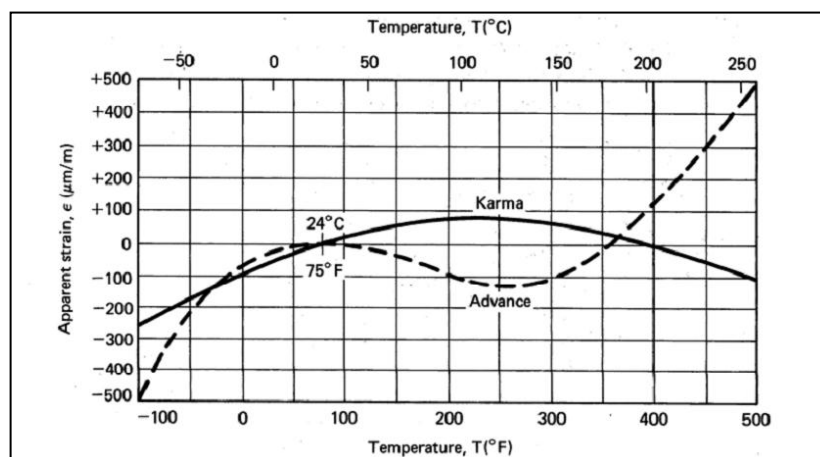


Fig. II.3 Déformation apparente en fonction de la température des différents alliages, [7].

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

Lorsqu'il en est autrement, on utilise le procédé de la jauge de compensation. Une jauge identique à celle qui servira aux mesures de déformations est collée sur un échantillon du même matériau que la structure [Fig. II.4]. Montée sur une branche adjacente du pont, elle doit annuler tous les effets thermiques, sous condition de subir les mêmes variations de température que la jauge active. Ce procédé a longtemps été le seul utilisé, [12].

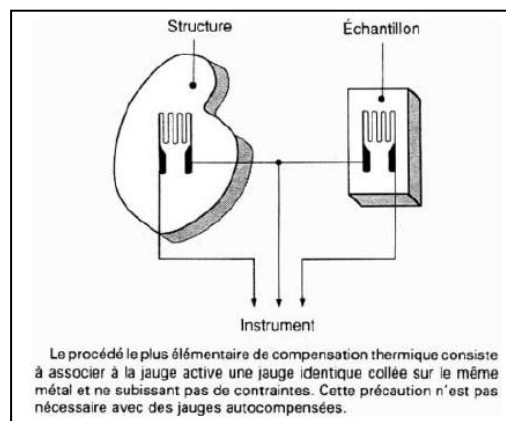


Fig. II.4 Principe de la jauge de compensation, [12].

Quel que soit le procédé adopté, il vaut mieux utiliser des jauges auto-compensées, c'est-à-dire à courbe pratiquement horizontale. Le but de l'auto-compensation est d'éliminer, autant que possible, les effets thermiques des jauges, y compris la dilatation propre du métal de la pièce étudiée, [12].

Par un traitement spécial, il est possible de réaliser des jauges auto-compensées pour un nombre de matériaux avec différents coefficients de dilatation thermique. Cette compensation n'est possible qu'entre certaines limites de température. La dérive apparente de ces jauges à l'intérieur de la plage de température compensée se situe entre -50 et $+50$ ($\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$). Cette dérive est très acceptable pour l'analyse expérimentale des contraintes, [7].

II.3. Caractéristiques des jauges de déformation

II.3.1 Matériaux des jauges

Les jauges doivent présenter deux caractéristiques importantes :

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

- Le signal électrique ($\Delta R/R$) doit être autant que possible une fonction linéaire de la déformation.
- Il n'y a pas d'hystérésis entre le chargement et le déchargement.

On trouve sur le marché les matériaux suivants.

Tab. II.2 Alliages métalliques des jauges résistives, [10].

Matériau	Composition
Advance ou Constantan	45 Ni, 55 Cu
Karma	74 Ni, 20 Cr, 3 Al, 3 Fe
Isoélastique	36 Ni, 8 Cr, 0.5 Mo, 55.5 Fe
Nichrome V	80 Ni, 20 Cr
Platine - Tungstène	92 Pt, 8 W 70
Armour D	70 Fe, 20 Cr, 10 Al

Le constantan est le plus utilisé dans les applications courantes à cause des caractéristiques suivantes :

- Facteur de jauge K constant pour des très grandes déformations.
- Résistivité élevée, donc grande résistance pour des petites longueurs ce qui permet de fabriquer de très petites jauges.
- Très stable et peu affecté par les changements de température ce qui est le plus grand problème rencontré dans la mesure des déformations avec des jauges.

II.3.2. Principaux types de jauges

On trouve sur le marché quatre principaux types de jauges :

1) Jauges à fil tramé

Principe de fonctionnement : variation de la résistance électrique des alliages métalliques sous l'effet de la déformation

Elles sont caractérisées par:

- Un facteur de sensibilité plus important.
- Une auto-compensation difficile

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

- 10 à 12 cm de constantan de diamètre de 0,025 mm pour une résistance totale de 120Ω

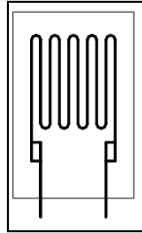


Fig. II.5 Jauge à fil tramé, [7].

2) Jauges à trame pelliculaire

Actuellement, elles constituent la majorité des jauges que l'on retrouve sur le marché, elles ont le même principe de fonctionnement que les jauges à fil trame, elles sont caractérisées par [Fig. II.6] :

- Une grille très mince (0.004 mm)
- Fabrication par photogravure ce qui permet de fabriquer plusieurs géométrie.
- Diminution de l'effet transversale par boucles de raccordement épaisses.
- Bonne auto-compensation en température.
- Variété de résistances disponibles : 120, 350, 1000, 5000 Ω

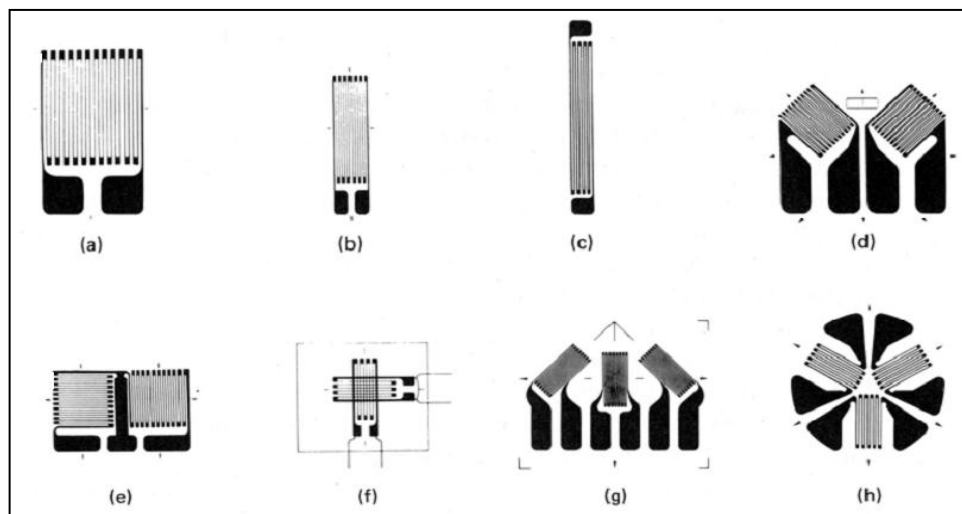


Fig. II.6 Exemples de jauges à trame pelliculaire.

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

3) Jauges à élément semi-conducteur

Principe de fonctionnement : effet piézorésistif d'un cristal de silicium. Bon pour les petites déformations.

Les jauges à élément semi-conducteur sont construites par un matériau de silicium dopé avec des impuretés, elles servent à mesurer les petites déformations avec une grande précision. Elles sont généralement caractérisées par :

- Le facteur de jauge K varie avec la température et la déformation
- Facteur de jauge très grand ($60 < K < 200$)
- Très fragile
- Sensibilité transversale très faible

4) Jauges soudables pur haute température

Principe de fonctionnement : variation de la résistance électrique des alliages métallique ou bien variation de la capacité par écartement des plaques d'un condensateur.

Elles sont généralement caractérisées par :

- Elles ne contiennent pas de matière organique donc elles sont utilisées pour les hautes températures (650°C).
- Dimensions importantes (50 mm et plus), pour surfaces planes seulement

II.4. Circuit de conditionnement

II.4.1 circuit de base, le pont de Wheatstone

Un **pont de Wheatstone** est un instrument de mesure inventé par Samuel Hunter Christie en 1833, puis amélioré et popularisé par Charles Wheatstone en 1843. Le pont de Wheatstone est le circuit le mieux adapté pour la mesure des petites variations de résistances électriques telles que rencontrées lors de l'utilisation de jauges de déformation

- **Analyse du circuit**

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

R_1 à R_4 : 4 résistances variables

V_e : Voltage d'entrée

V_s : Voltage de sortie

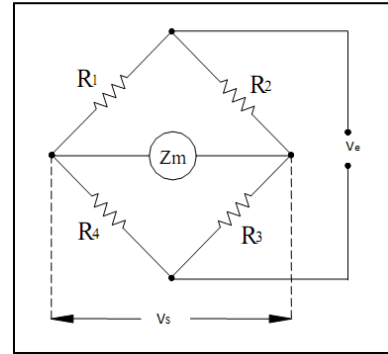


Fig. II.7 Pont de Wheatstone, [7].

$$V_s = 0 \text{ si } : R_1 \cdot R_3 = R_2 \cdot R_4$$

Si on donne aux résistances des variations ΔR_i , et si on écrit l'équation du voltage de sortie du pont en fonction des variations de résistance unitaire ($\delta_i = \frac{\Delta R_i}{R_i}$), le voltage de sortie s'exprime par la relation suivante :

$$V_s = \frac{r}{(r+1)^2} \cdot V_e \cdot \frac{(\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4)}{\left(1 + \frac{r}{(r+1)} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{Z_m} + N_L\right)} \quad (2-10)$$

Et

$$N_L = \frac{1}{(r+1)} [\delta_1 + \delta_2 + r \cdot (\delta_3 + \delta_4)] \quad (2-11)$$

$$r = \frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \quad (2-12)$$

Le terme N_L contribue à la non-linéarité de la réponse du pont en fonction de la déformation. Cependant, si on considère des $\delta_i < 0,01$, On peut alors négliger le terme N_L et l'on obtient :

$$V_s = \frac{r}{(r+1)^2} \cdot V_e \cdot \frac{(\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4)}{\left(1 + \frac{r}{(r+1)} \cdot \frac{(R_1 + R_2)}{Z_m}\right)} \quad (2-13)$$

Dans le cas très courants où l'on a 4 résistances de mêmes valeurs nominales ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4$) ou bien dans le cas où l'on assure que ($R_1/R_4 = R_2/R_3 = 1$) on obtient :

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot \frac{(\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4)}{\left(1 + \frac{R}{Z_m}\right)} \quad (2-14)$$

Vu que dans la plus plupart des cas l'impédance des instruments de lecture comme les voltmètres numériques, les amplificateurs et les systèmes d'acquisition de données, est très grande ($Z_m \gg R$), alors :

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot (\delta_1 - \delta_2 + \delta_3 - \delta_4) \quad (2-15)$$

L'examen de l'équation montre que :

- Certains termes δ_i peuvent être nuls suivant le nombre de jauges actives dans le pont.
- Pour la mesure des déformations, lorsque plusieurs jauges agissent simultanément, il est possible d'ajouter ou de retrancher leurs effets selon qu'elles soient placées dans une branche positive (δ_1 ou δ_3) ou négative (δ_2 ou δ_4).

II.4.2. Principe de la compensation en température

La température est un facteur influençant fortement la réponse d'une jauge. Il est parfois nécessaire de supprimer son effet, Un montage approprié permet de conserver la composante de déformation mécanique tout en supprimant la dilatation thermique [Fig. II.9].

Soit une jauge j_1 collée sur une structure S subissant une déformation mécanique ϵ_m et un changement de température ΔT . La variation de la résistance de la jauge sera :

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = \delta_1 = \delta_m + \delta_{th} \quad (2-16)$$

Soit une jauge j_2 du même lot collée sur un échantillon de même matériau que la structure S et subissant le même changement de température ΔT , si l'échantillon ne subit pas de déformation mécanique, alors le changement de résistance de la jauge témoin j_2 sera :

$$\frac{\Delta R_2}{R_2} = \delta_2 = \delta_{th} \quad (2-17)$$

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

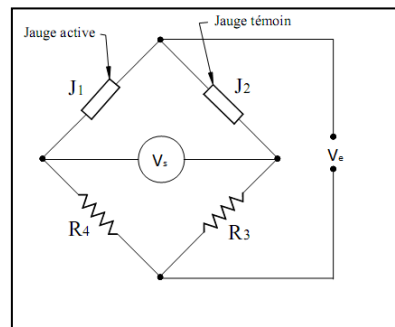


Fig. II.8 Montage en demi-pont, [7].

L'output théorique du pont s'exprime comme suit

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot (\delta_1 - \delta_2) = \frac{V_e}{4} \cdot (\delta_m + \delta_{th} - \delta_{th}) = \frac{V_e}{4} \cdot K \cdot \epsilon_m \quad (2-18)$$

En utilisant ce principe, on ne mesure que l'effet mécanique, il y a donc compensation de l'effet de température.

II.4.3. disposition des jauges

Il existe plusieurs arrangements possibles des jauges dans le pont de Wheatstone en vue de détecter une composante particulière de la déformation d'une structure, nous présentons dans ce qui suit, quelques cas parmi les plus courants.

➤ Traction-compression

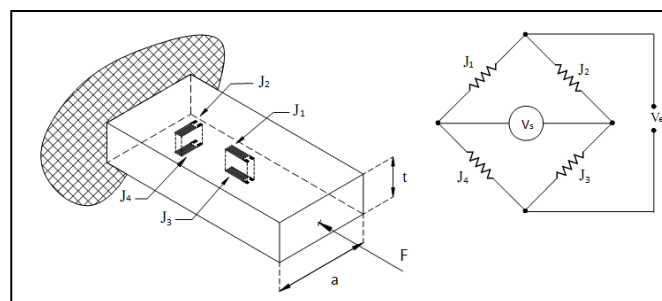


Fig. II.9 Mesure de traction ou de compression à l'aide d'un plein pont, [7].

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

Soit :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = \varepsilon_3 = \frac{F}{atE};$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_4 = -\nu\varepsilon$$

L'output théorique du pont s'exprime comme suit

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot K \cdot [2(1 + \nu)\varepsilon] \quad (2-19)$$

➤ Flexion (demi-pont)

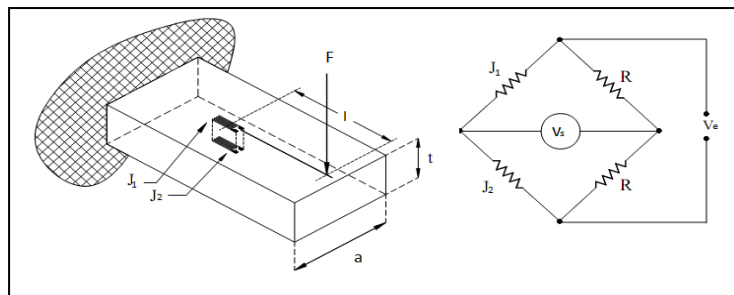


Fig. II.10 Mesure de la flexion à l'aide d'un demi-pont, [7].

Soit :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2$$

$$\varepsilon = \frac{F.l.t}{2.E.J}; \quad J = a \cdot \frac{t^3}{12};$$

Output théorique du pont s'exprime comme suit

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot K \cdot (2\varepsilon) \quad (2-20)$$

➤ Flexion avec un pont complet

II NOTIONS D'EXTENSOMETRIE PAR JAUGES A RESISTANCE ELECTRIQUE

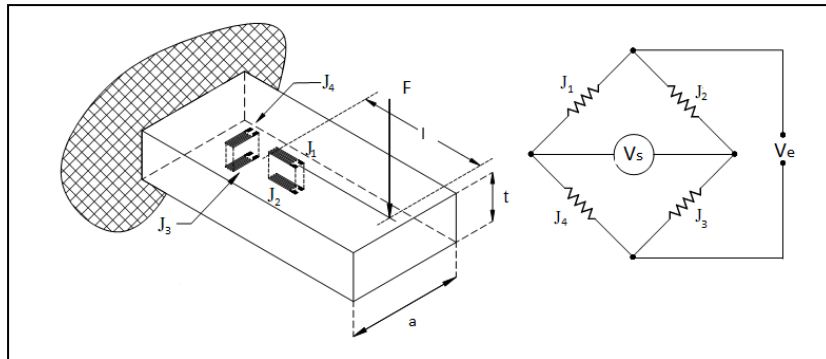


Fig. II.11 Mesure de flexion à l'aide d'un pont complet, [7].

Soit :

$$\varepsilon = \varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \frac{F.l.t}{2.E.J} ;$$

$$\varepsilon_3 = -\varepsilon_4 = \nu\varepsilon$$

Output théorique du pont s'exprime comme suit

$$V_s = \frac{V_e}{4} \cdot K \cdot [2\varepsilon(1 + \nu)] \tag{2-21}$$

On constate que l'output d'un pont complet est supérieur à celui d'un demi-pont, car la sensibilité du pont sera plus grande quand le nombre de jauges actives est grand.

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

III.1 Introduction

Dans les études des structures fissurées, l'éprouvette CT (compact traction en anglais) et la flexion trois points sont les procédés expérimentaux les plus largement utilisés pour l'étude du comportement en mécanique de la rupture.

Ces deux essais permettent de déterminer le K_{IC} qui est utilisé comme base de calcul pour le dimensionnement des structures fissurées.

III.2 Eprouvettes

De nombreux types d'éprouvettes furent essayées durant les années 60 avant que ne soient définies des éprouvettes normalisées, adoptées d'abord par L'ASTM, puis par L'AFNOR. Il s'agit de l'éprouvette de flexion en trois points et de l'éprouvette CT [5].

III.2.1 Dimensions

- L'éprouvette (CT).

Les dimensions relatives de cette éprouvette sont indiquées sur la figure III.1, il faut que $0,8 < W/B < 4$ (3-1)

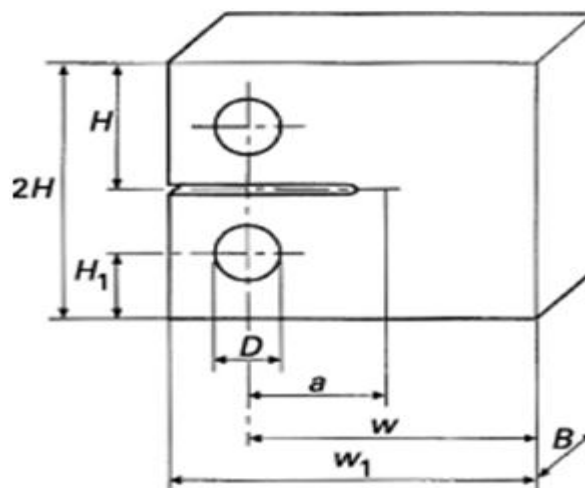


Fig. III.1 Eprouvette (CT) [13]

Tel que :

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

$$a=B$$

$$D=0.5 B$$

$$H=1.2 B \quad (3-2)$$

$$H_1=0.65 B$$

$$W=2 B$$

$$W_1=2.5 B$$

Connaissant la longueur a de la fissure et de la charge F appliquée, on calcule le facteur d'intensité de contrainte K_I par

$$K_I = \frac{F}{B^2\sqrt{W}} \left[29.6 \left(\frac{B}{W}\right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{B}{W}\right)^{3/2} + 655 \left(\frac{B}{W}\right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{B}{W}\right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{B}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (3-3)$$

Où B est l'épaisseur de l'éprouvette.

Les détails de l'entaille sont représentés dans la figure III.2.

➤ L'éprouvette de flexion a trois points (F3P).

Les dimensions relatives de cette éprouvette sont indiquées sur la figure III.2.

$$\text{Il faut que } 1 < W/B < 4 \quad (3-4)$$

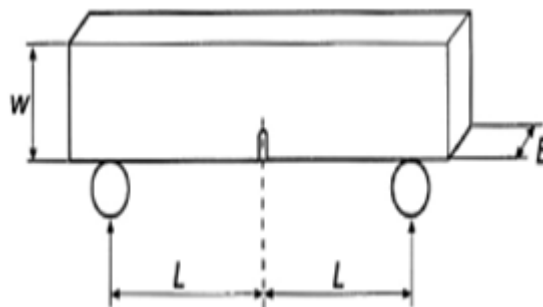


Fig. III.2 éprouvette de flexion a trois points d'appui (F3P) [13]

Avec :

$$w=2B \quad (3-5)$$

$$L=2w$$

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

Connaissant la longueur a de la fissure et la charge F , on calcule le facteur d'intensité de contrainte K_I par la formule :

$$K_I = \frac{F}{B^2\sqrt{W}} \left[11.58 \left(\frac{B}{W}\right)^{1/2} - 18.42 \left(\frac{B}{W}\right)^{3/2} + 87.18 \left(\frac{B}{W}\right)^{5/2} - 150.66 \left(\frac{B}{W}\right)^{7/2} + 154.80 \left(\frac{B}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (3-6)$$

S est la distance entre appuis, w la largeur de l'éprouvette, B son épaisseur.

La figure [III.3] et le tableau [III.1] donnent les détails des entailles.

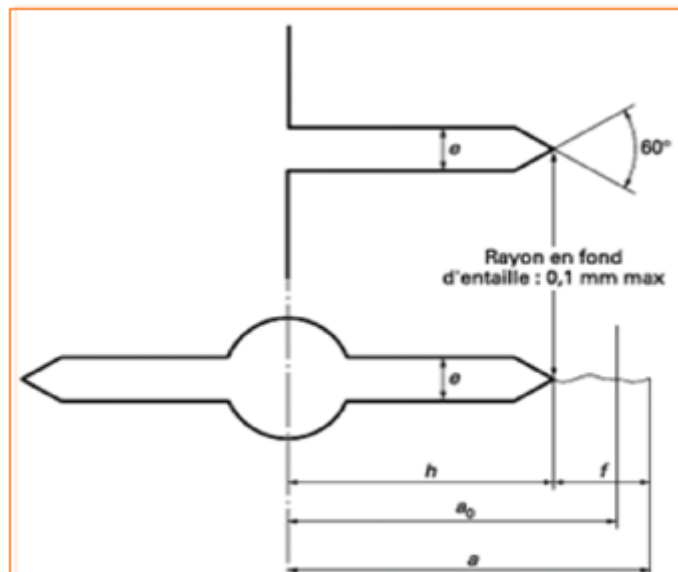


Fig. III.3 détails des entailles [13]

Tab. III.1 détails des entailles [13]

Types	Longueur utile de l'entaille h	Largeur d'entaille maximale e	Pré fissure minimale a_0
CT	$0.2 W \text{ min}$	$0,065 W$	$a_0 \geq 0.25W$ et $a_0 \geq h+e$
F3P	$0.15W \geq h \geq 0, 1W$	1 pour $W \leq 25$ $0,065W$ pour $W > 25$	$a_0 \geq 0.2W$ et $a_0 \geq h+e$

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

III.2.2 Conditions de réalisation

La nécessité de normalisation des éprouvettes provient de la variation de K_I avec l'épaisseur de celles-ci. En effet, ainsi qu'il a été vu au chapitre 2, K_C décroît lorsque l'épaisseur croît, jusqu'à ce que soient atteintes les conditions d'un état de déformations planes. La valeur atteinte dans ces conditions donne le facteur d'intensité de contrainte K_{IC} .

La figure [III.4] illustre cette variation de K_C avec l'épaisseur de l'éprouvette dans le cas d'un alliage d'aluminium (nuances américaines (7075-T6), [5]).

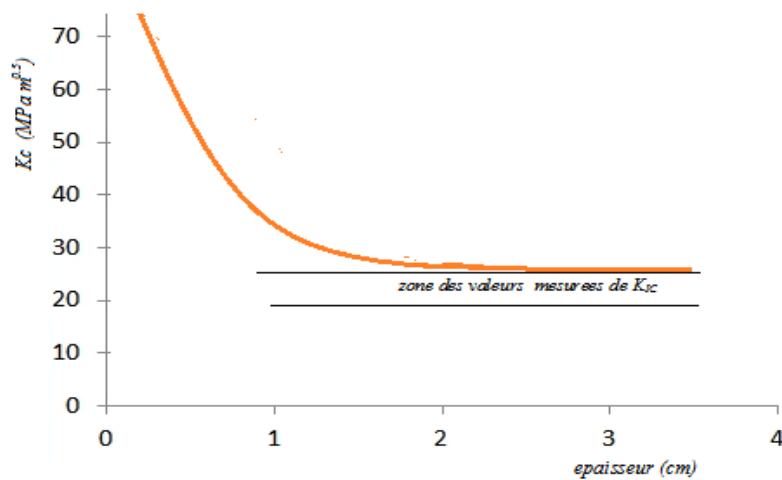


Fig. III.4 variation de K_C avec l'épaisseur de l'éprouvette [5].

Il s'en suit que pour les conditions de déformation planes soient réalisées l'éprouvette doit avoir une épaisseur suffisamment grande par rapport à la taille de la zone plastique en tête de fissure, laquelle est donnée par

$$r_p = \frac{1}{6\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3-7)$$

Ceci conduit à adopter les restrictions suivantes :

$$a, b \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3-8)$$

$$w \geq 5.0 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3-9)$$

On a alors :

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

$$\frac{b}{r_p} = 6 \pi \cdot 2.5 = 47. \quad (3-10)$$

C'est-à-dire que l'épaisseur de l'éprouvette est près de 50 fois plus grande que la taille de la zone plastique [5].

Le tableau [III.2] donne des valeurs de la résistance à la rupture (mesurée sur éprouvette CT) de quelque alliages d'aluminium de nuance américaine.

Tab. III.2 résistance à la rupture de quelque alliages d'aluminium [5]

désignation	Orientation de l'éprouvette	σ_e (MPa)	K_{Ic} MPa \sqrt{m}
2020-T 651	T-L	526	18
2024-T4	L-T	331	50
7075-T6	L-T	541	36
7075-T6	T-L	536	26
7075-T 7351	L-T	456	35.5
7075-T 7351	T-L	447	29
7079-T 6	T-L	516	24

III.2.3 Fissuration par fatigue

Afin de munir les éprouvettes d'une fissure la plus aiguë possible, la fissuration par fatigue est la méthode couramment employée. Les éprouvettes décrites au paragraphe sont donc fissurées par fatigue.

Les conditions de fissuration par fatigue ont un effet marqué sur les valeurs apparentes de K_{Ic} . En effet, au cours de cette fissuration, la zone plastifiée en tête de fissure évolue et y crée des contraintes résiduelles. C'est pourquoi la norme impose les conditions suivantes [13] :

- la fissure de fatigue doit être faite sur le métal traité.
- le rapport R de la contrainte minimale à la contrainte maximale des Cycles de fatigue doit être compris entre 0 et 0,1.

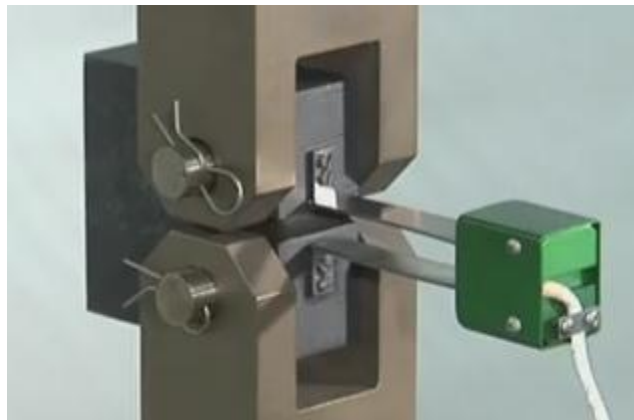
III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

- il faut que $0,45 < a_0/w < 0,7$ et la longueur de la fissuration par fatigue doit être supérieure à 2,3 mm ou à 2,5 % de la largeur w . Cela assure qu'au cours de l'essai de rupture le comportement d'une fissure longue soit bien déterminé, car la plastification peut entièrement englober les fissures courtes et fausser la mesure [5].

III.3 Dispositifs d'essai

Les éprouvettes précédemment décrites sont sollicités en flexion ou en traction. Dans les deux cas, on enregistre pendant l'essai la variation de la charge appliquée à l'éprouvette en fonction de l'écartement des lèvres de l'entaille. La charge est mesurée soit par jauges de contrainte (éprouvette de flexion), soit par un dynamomètre de traction (éprouvette compacte) [5].

L'écartement des lèvres est mesuré grâce à un extensomètre à lames sur lesquelles sont collées des jauges de contrainte figure [III.5]



FigIII.5 mesure de l'écartement des lèvres à l'aide d'un extensomètre

III.4 Détermination de K_{IC}

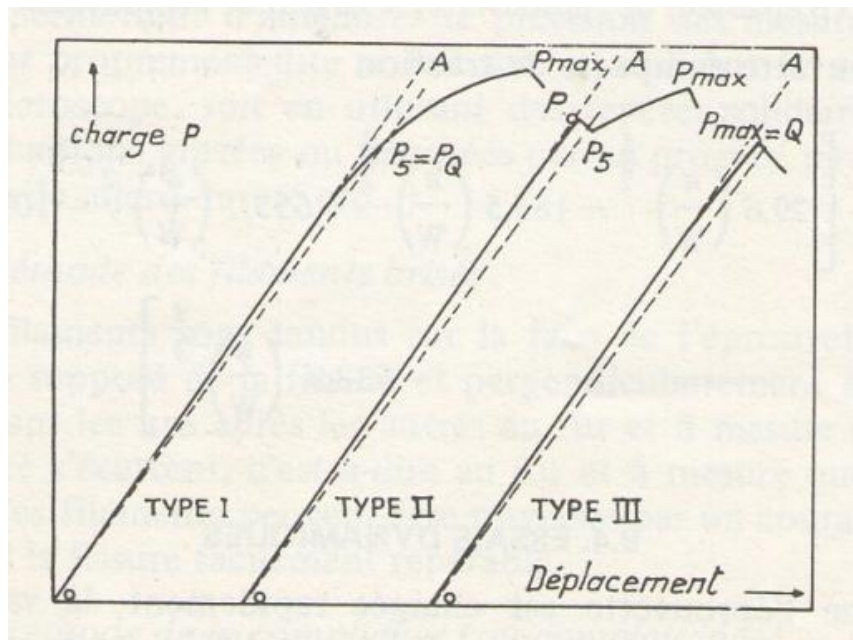
Les courbes charges-déplacement permettent facilement de calculer K_{IC} .

Le cas idéal de mesure de K_{IC} par cette méthode n'est malheureusement pratiquement jamais obtenu ; il correspondrait à un métal qui casserait brutalement sans déformation plastique apparente. Or, on s'est aperçu très rapidement que les courbes charge-déplacement ne présentent que rarement un point anguleux. On

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

observe souvent un éloignement continu de la courbe réelle à la droite idéale charge-déplacement. Cette non-linéarité est due principalement à une déformation plastique à l'extrémité de la fissure tend à se propager brutalement par à-coup d'intensité très faible [5].

Les principaux types de courbes charges-déplacement que l'on peut obtenir sont représentés sur la figure [III.6]



FigIII.6 principaux types de courbes charges-déplacement, [5].

On peut, en traçant une droite OP_5 dont la pente est inférieure de 5% à la pente de portion rectiligne OA , déterminer une valeur K_Q de K qui correspond à K_{IC} si certaines conditions sont observées.

Ces conditions sont

$$\text{Epaisseur } B, \text{ longueur de la fissure } a \geq 2.5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_e} \right)^2 \quad (3-11)$$

Et

$$\frac{P_{max}}{P_Q} < 1.1 \quad (3-12)$$

Si ces conditions sont satisfaisantes, K_Q est prise comme valeur de K_{IC} .

III ESSAIS BASES SUR LA MECANIQUE LINEAIRE DE LA RUPTURE

S'il n'en est pas ainsi, l'essai n'est pas valable et, bien que les résultats puissent être utilisés pour estimer la résistance à la rupture du matériau, ils ne représentent pas la valeur normalisée K_{IC} .

Après avoir calculé P_Q comme indiqué précédemment, le calcul de K_{IC} s'effectue à l'aide des relations

- éprouvette de flexion a trois points d'appui (F3P)

$$K_{IC} = \frac{P_C}{B^2\sqrt{W}} \left[11.58 \left(\frac{B}{W}\right)^{1/2} - 18.42 \left(\frac{B}{W}\right)^{3/2} + 87.18 \left(\frac{B}{W}\right)^{5/2} - 150.66 \left(\frac{B}{W}\right)^{7/2} + 154.80 \left(\frac{B}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (3-13)$$

- Epreuve compacte de traction (CT)

$$K_{IC} = \frac{F}{B^2\sqrt{W}} \left[29.6 \left(\frac{B}{W}\right)^{1/2} - 185.5 \left(\frac{B}{W}\right)^{3/2} + 655 \left(\frac{B}{W}\right)^{5/2} - 1017 \left(\frac{B}{W}\right)^{7/2} + 638.9 \left(\frac{B}{W}\right)^{9/2} \right] \quad (3-14)$$

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté d'une manière théorique, une technique expérimentale fondée sur la mécanique linéaire de la rupture. Le moyen expérimental pour trouver K_{Ic} est donné.

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

IV.1 Introduction

Ce présent chapitre traite l'étude et la conception du modèle d'un extensomètre pour mesurer l'écartement des deux lèvres dans un essai de traction sur une éprouvette CT (compact traction).

La conception a été faite à l'aide du logiciel de la CAO « SolidWorks ». Un modèle d'extensomètre est fabriqué afin qu'il s'adapte sur une éprouvette CT.

IV.2 Extensomètre (généralités)

IV.2.1 Définition

Un extensomètre est un appareil qui est utilisé pour mesurer des allongements. Il est utile aussi pour tracer des courbes contrainte-déformation. Son nom vient de "extension-mètre». Il a été inventé par le Dr Charles Huston qui l'a décrit dans un article paru dans le Journal de l'Institut Franklin en 1879.

IV.2.2 Types

Il existe deux types principaux d'extensomètres: avec contact et sans contact

➤ extensomètre avec Contact :

Les extensomètres de contact ont été utilisés pendant de nombreuses années et sont également subdivisés en deux catégories

- Les micro-extensomètres : Ces extensomètres à haute résolution ($0.5\mu\text{m}$) sont utilisés pour déterminer les modules d'élasticité.
- Extensomètres à grand allongement : Ces extensomètres sont utilisés pour mesurer les déformations des matériaux à une force donnée, à une contrainte donnée ou jusqu'à rupture. Leur course peut atteindre 1000mm.

➤ Extensomètre sans contact :

Pour certaines applications spéciales, les extensomètres sans contact commencent à apporter des avantages dans le cas où il est impossible d'utiliser un extensomètre avec contact. Ils sont également subdivisés en deux catégories

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

- Extensomètres Laser sans contact : Ces extensomètres mesurent la déformation des matériaux sans avoir de contact physique avec le matériau lui-même.
- Extensomètres vidéo : Cette technologie enregistre une vidéo de haute résolution pendant le test de traction ou de compression en utilisant une ou plusieurs caméras. Un algorithme spécial permet de suivre sur les images de manière automatique la variation entre une ou plusieurs paires de points appliqués et de calculer le déplacement à partir de ces valeurs.

IV.3 Proposition du modèle

Dans notre projet, le but est de concevoir un modèle d'extensomètre avec contact pour calculer l'écartement des lèvres d'une fissure sur des éprouvettes normalisées.

Le modèle sur la figure [Fig.IV.1] est appelé extensomètre à agrafe

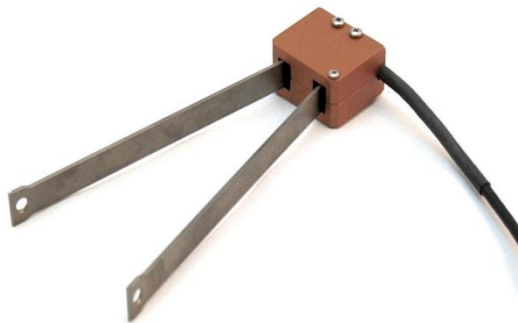


Fig. IV.1 Extensomètre a agrafe [14]

Généralement désigné sous le nom des mesures à agrafe, ses unités souples sont typiquement employées pour des études de mécanique de rupture [14].

Ce type d'extensomètre s'adapte très bien dans les essais de la mécanique de la rupture et dans notre cas dans la mesure d'écartement des lèvres d'une entaille sur des éprouvette CT (compact traction).

IV.3 .1 Le modèle proposé

Nous proposons un modèle simple pour la réalisation.

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

En premier lieu, le modèle proposé est [Fig. IV.2]

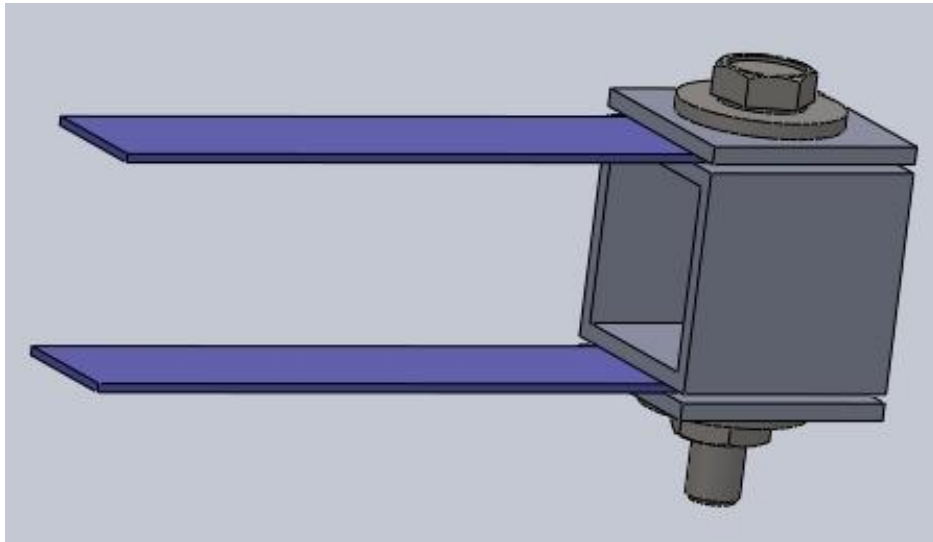


Fig. IV.2 extensomètre avec deux lames

Le modèle se compose de deux lames en acier inoxydable (sur lesquelles 2 jauges seront collées) encastrées dans un corps en acier à l'aide d'un couple vis-écrou, deux rondelles, et deux cales en acier.

Les jauges électriques sont collées sur les lames proches de l'encastrement. Après la fixation de l'extensomètre sur l'éprouvette qui subit une traction, les lames sont soumises à une flexion.

Un autre modèle a été proposé mais abandonné, se compose d'une seule lame pliée d'une façon à obtenir la forme donnée par la Figure [IV.3].

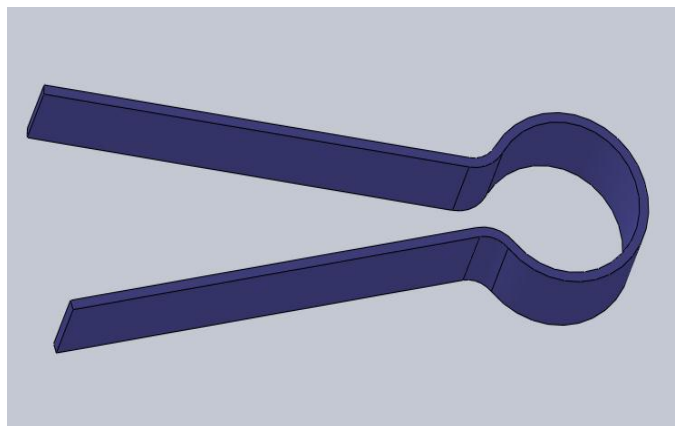


Fig. IV.3 extensomètre avec lame pliée

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

La lame est fabriquée à partir d'un acier dur. Les jauges peuvent être collées sur la partie arrondie de la lame.

IV.3.2 Comparaison

- la simplicité de la réalisation.

L'obtention d'une lame pliée de cette façon est un peu difficile à cause de l'absence d'un moyen pour la fabriquer. Cependant, le deuxième modèle est très simple à réaliser, car il se compose par des pièces simples à obtenir.

- La facilité de l'étude :

Pour faire l'étude du deuxième modèle on est obligé de passer sur la théorie des barres coudées. Néanmoins, pour le premier modèle on va traiter juste le cas de la flexion d'une poutre encastrée.

Le premier modèle a été adopté pour notre projet (extensomètre avec deux lames encastrées).

IV.4 Modèle mathématique

La figure [IV. 4] représente schématiquement un prototype d'un extensomètre qui utilise la propriété de flexion. Sous l'effet d'un déplacement dû à une force appliquée sur l'éprouvette.

Supposition

Par conséquent, l'extensomètre va être modélisé d'une façon à ce que les deux lames soient sollicitées en flexion. Le moment fléchissant le long de la lame s'exprime comme suit :

$$M(x) = -Fx \quad (4-1)$$

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

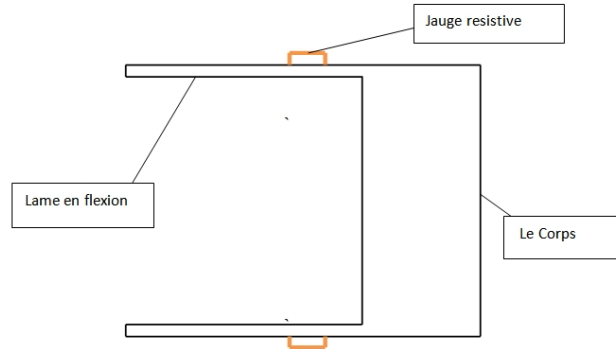


Fig. IV.4 schéma représentatif d'un extensomètre à lames

L'équation différentielle qui décrit la déflexion de la lame s'écrit par la relation

$$y''(x) = \frac{-1}{EI} M(x) = \frac{-1}{EI} (-Fx) \quad (4-2)$$

Afin de déterminer la déflexion maximale on procède à une première et deuxième intégration. La première dérivée du champ de déplacement s'écrit par

$$y'(x) = \frac{-1}{EI} \left(-\frac{Fx^2}{2} \right) + C_1 \quad (4-3)$$

Donc, le champ de déplacement s'exprime comme suit

$$y(x) = \frac{-1}{EI} \left(-F \cdot \frac{x^3}{6} \right) + C_1 x + C_2 \quad (4-4)$$

En introduisant les conditions aux limites dans cette équation, On obtient la déflexion maximale f

$$f = \frac{L^3}{3EI} \cdot F \quad (4-5)$$

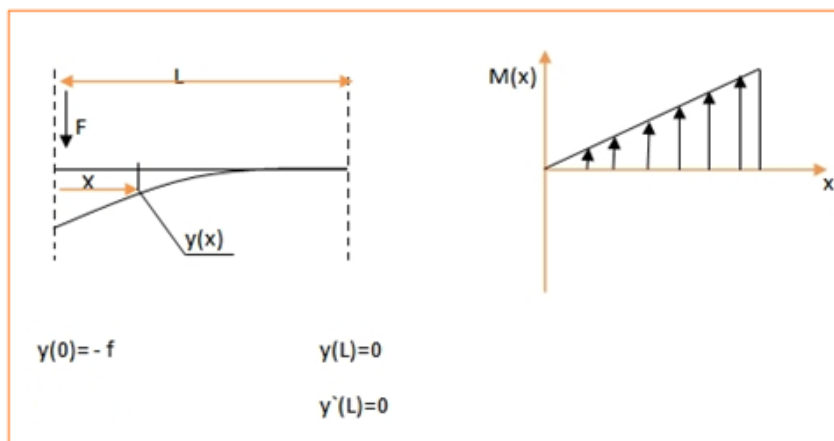


Fig. IV.5 Schéma illustrant la flexion de la lame.

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

Si on considère V_e le voltage d'excitation des jauges de contraintes dans le pont de Wheatstone et K le facteur de jauge respectivement. Par conséquent, le voltage de sortie V_s d'un pont complet est tiré par la relation

$$\frac{V_s}{V_e} = K\bar{\epsilon} \quad (4-6)$$

Tel que $\bar{\epsilon}$ est la déformation moyenne d'une seule jauge.

La déformation produite le long de la lame est une fonction de la distance, elle vaut

$$\epsilon(x) = \frac{t/2}{EI} M(x) = -\frac{Ft}{2EI} (x) \quad (4-7)$$

Ou

t : l'épaisseur de la lame.

D'après (3-5)

$$\epsilon(x) = -\frac{3t}{2L^3} f(x) \quad (4-8)$$

La déformation moyenne s'obtient par intégration de cette dernière

$$\bar{\epsilon} = -\frac{1}{L_g} \int_0^{L_g} \frac{3Eft}{2EJL^3} (x) dx = \bar{\epsilon} = \frac{3t\psi}{4L^3} f \quad (4-9)$$

$$\psi = -L_g \quad (4-10)$$

La contrainte normale produite le long de la poutre [Fig. IV.6] est donnée par

$$\sigma_M = \frac{M_f}{I} e \quad (4-11)$$

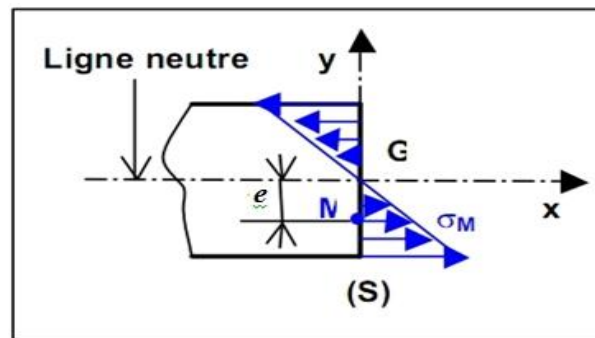


Fig. IV.6 contrainte normale en flexion [15]

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

D'après (3-1) et (3-5) on obtient finalement

$$\sigma_M = \frac{-3 E x e}{L^3} f \quad (4-12)$$

Discussion

- Il est apparent que la déformation et la contrainte évoluent d'une façon linéaire le long de la lame est augmenté linéairement de l'extrémité libre jusqu'à sa valeur maximale qui correspondante à $x = L$.
- On remarque que la déformation moyenne est une valeur constante. Et elle n'est dépendante que de la longueur de la jauge L_g .
- Pour une valeur de flèche fixée, La déformation évalué proportionnellement avec l'épaisseur de la lame et inversement proportionnelle avec sa longueur.

IV.5 Conception du l'extensomètre

IV.5.1. Logiciel de simulation SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de dessin et de conception assisté par ordinateur DAO et CAO. Il est considéré comme un outil essentiel dans le domaine de la conception mécanique, et nombreuses entreprises et bureaux d'études en mécanique de renommé l'utilisent. Il permet, avec ses diverses fonctionnalités, d'aborder des problèmes de dimensionnement complexe et de les résoudre dans des délais très courts, comparés aux méthodes conventionnelles. Il est apprécié par des ingénieurs de conception pour sa souplesse et son potentiel en constante progression grâce au programme de développement. SolidWorks est pourvu de plusieurs fonctionnalités dont on citera :

➤ **Création des formes volumiques**

L'interface DAO de SolidWorks permet la création de formes en 3D de la manière la plus facile et la plus rapide. Il fait appel à des fonctions comme la révolution, l'extrude, enlèvement de matière ou la symétrie pour obtenir des formes 3D à partir de dessin plan. Pour une même forme il peut y avoir différentes manières de procéder pour sa création.

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

➤ **Création d'assemblages**

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition des pièces. La mise en position des pièces est définie par un ensemble de contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme ainsi monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composants, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.)

➤ **Mise en plan**

Les mises en plan concernent à la fois les pièces (dessin de définition) ou les assemblages (dessin d'ensemble). Le logiciel 3D ne fait qu'une projection de l'objet. Les modifications éventuelles sont opérées sur l'objet représenté, et ne concernent pas directement le plan.

➤ **Conception, analyse et simulation**

SolidWorks était à la base un logiciel de modélisation 3D, mais avec le temps et le développement de l'outil numérique, il a été doté de plusieurs compléments dont on citera : CosmosWorks, MotionWorks, FlowWorks, SolidWorks-Piping,...etc.

IV.5.2. Informations sur le modèle choisi

Caractéristiques des lames :

Le matériau utilisé pour les lames est un acier inoxydable ayant les caractéristiques suivantes [IV.1]:

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

Tab. IV.1 Caractéristiques mécaniques de l'acier inoxydable.

Propriété	valeur	unité
Module d'élasticité E	$20 \cdot 10^{10}$	N/m^2
Limite d'élasticité σ_{\max}	$300 \cdot 10^6$	N/m^2
Coefficient de poisson ν	0.3	-
Masse volumique ρ	7900	Kg/m^3

IV .5.3 L'étude conceptuelle

Dans cette partie, on va étudier l'évolution de la déformation le long de la lame en fonction de différents paramètres qui la définissent.

Notre lame est un parallélépipède plein de masse m et de cote a, t, L.

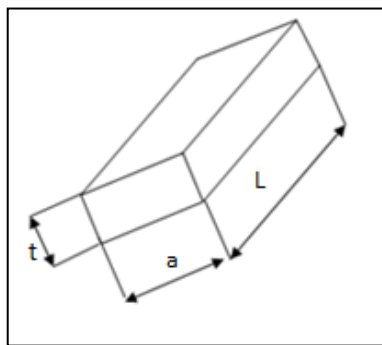


Fig. IV.7 dimensions de la lame étudiée

Nous varions chaque fois l'un de ces paramètres en gardant les autres fixés, et étudions comment évolue la déformation le long de la lame en fonction de la variation de ce paramètre.

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

➤ Variation de l'épaisseur t

- Pour une première valeur $t = 1 \text{ mm}$

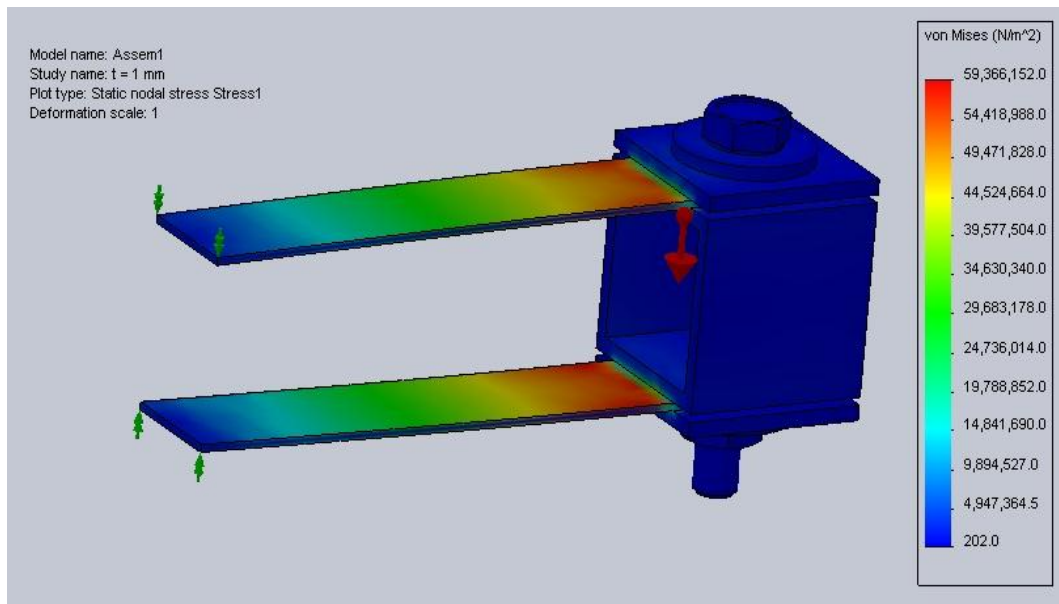


Fig. IV.8 Distribution des contraintes

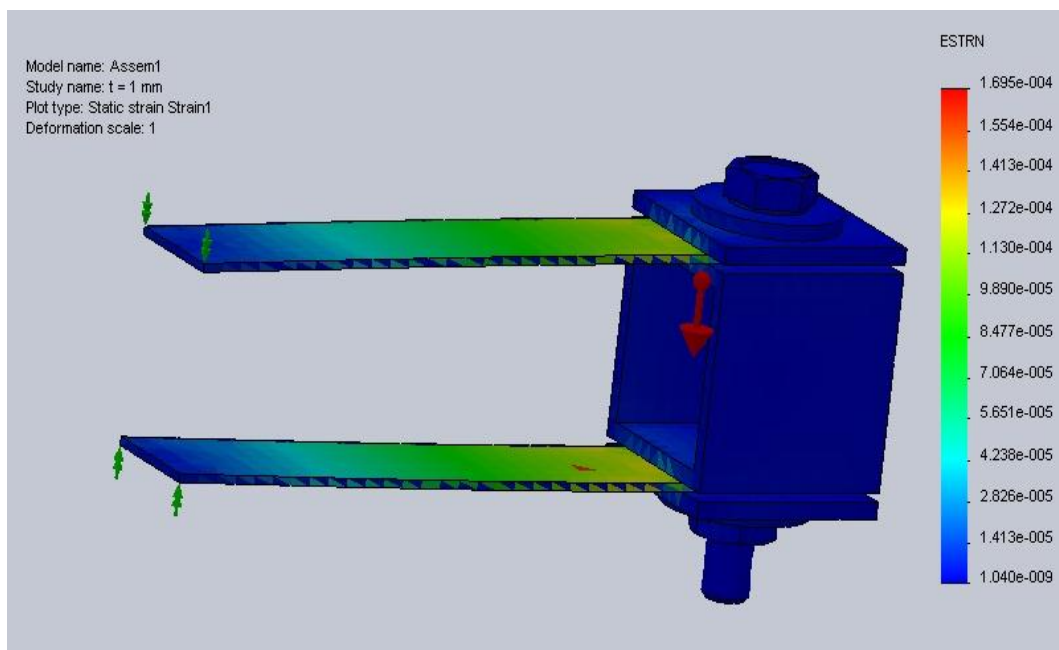


Fig. IV.9 Taux de déformation

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

- Pour une deuxième valeur $t= 1.5 \text{ mm}$

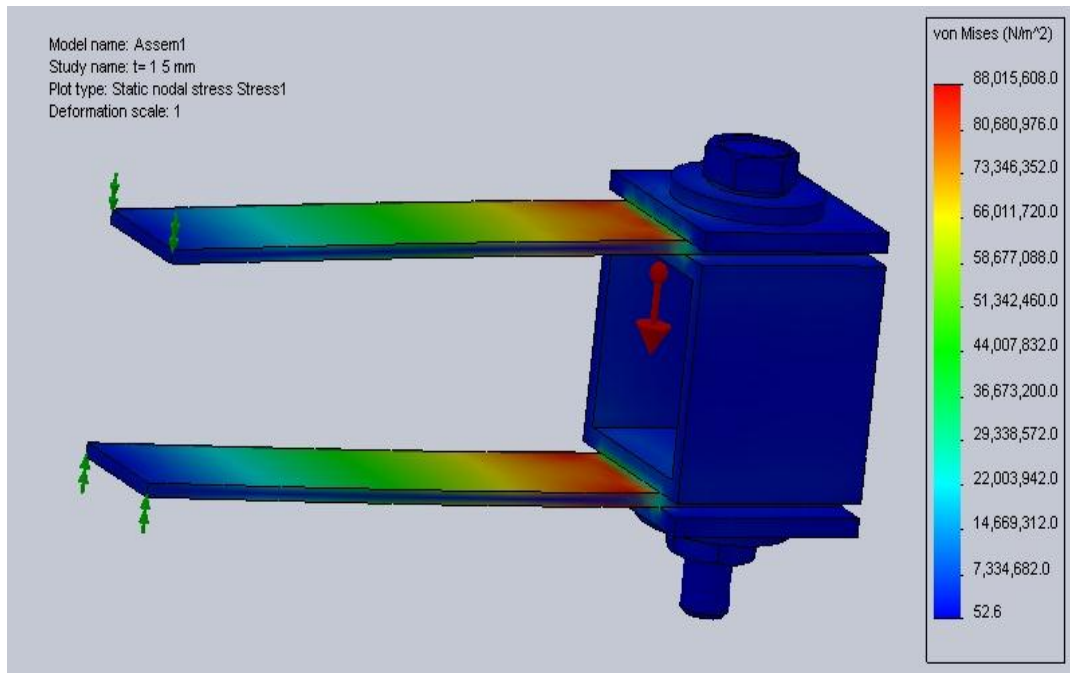


Fig. IV.10 Distribution des contraintes

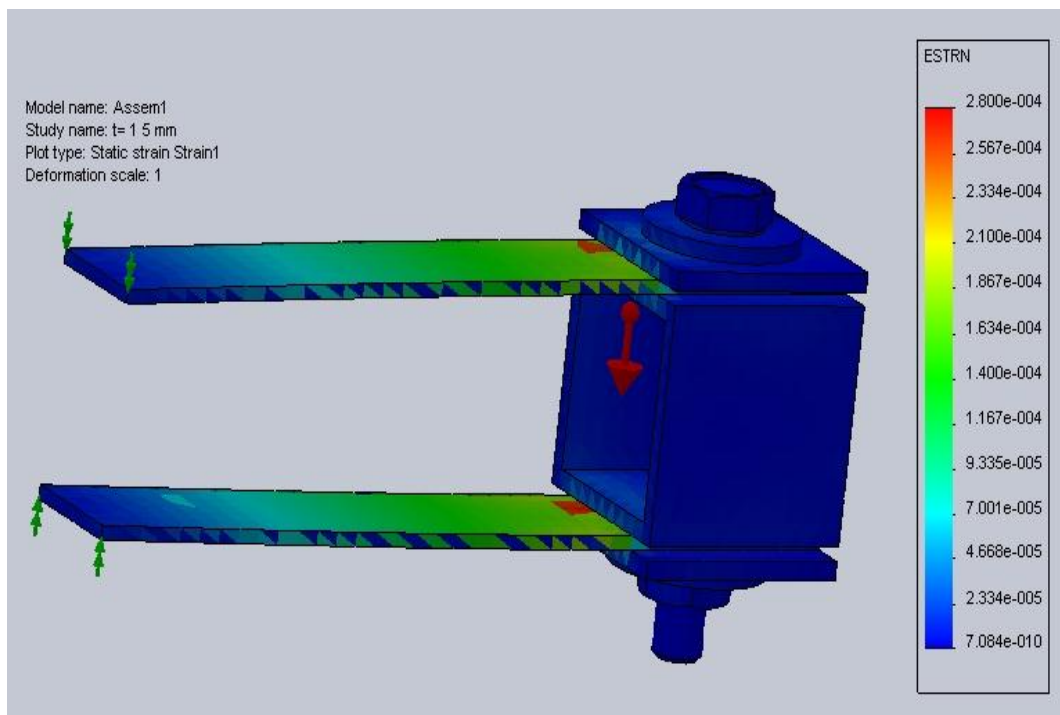


Fig. IV.11 Taux de déformation

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

➤ Variation de la longueur L

- Pour une première valeur $L = 70$ mm

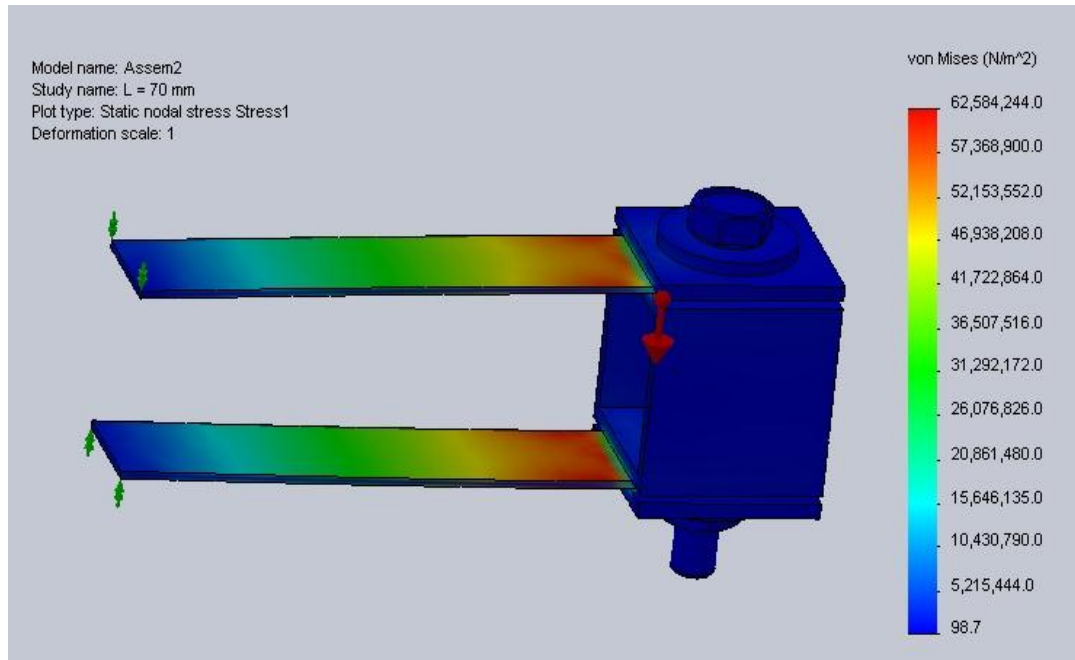


Fig. IV.12 Distribution des contraintes

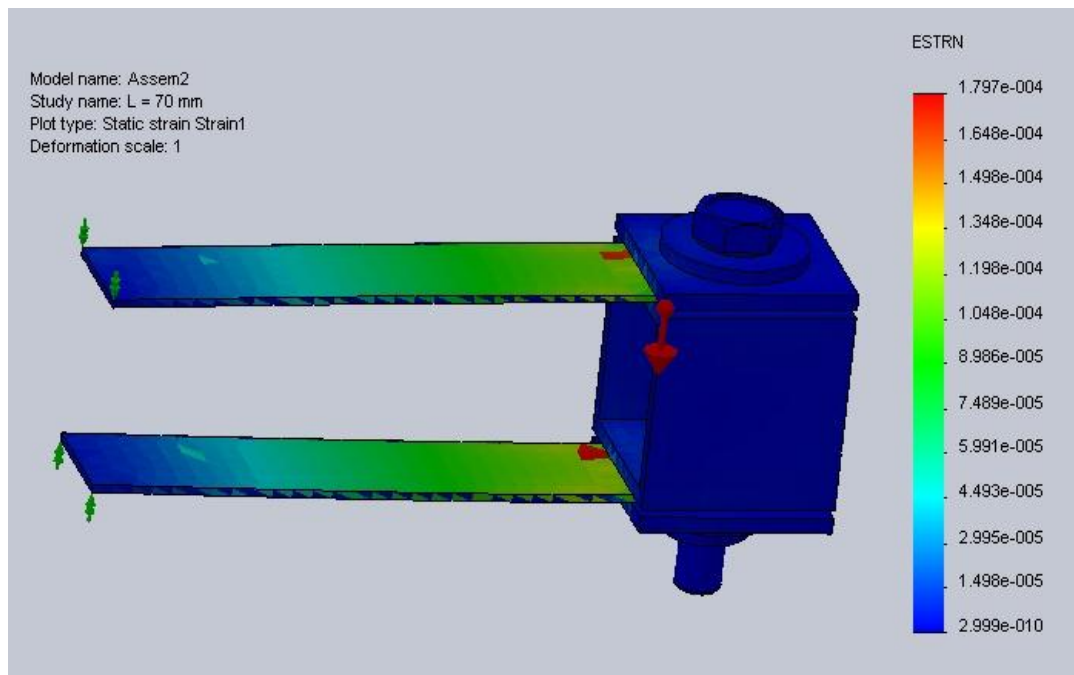


Fig. IV.13 Taux de déformation

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

- Pour une deuxième valeur $L=80\text{ mm}$

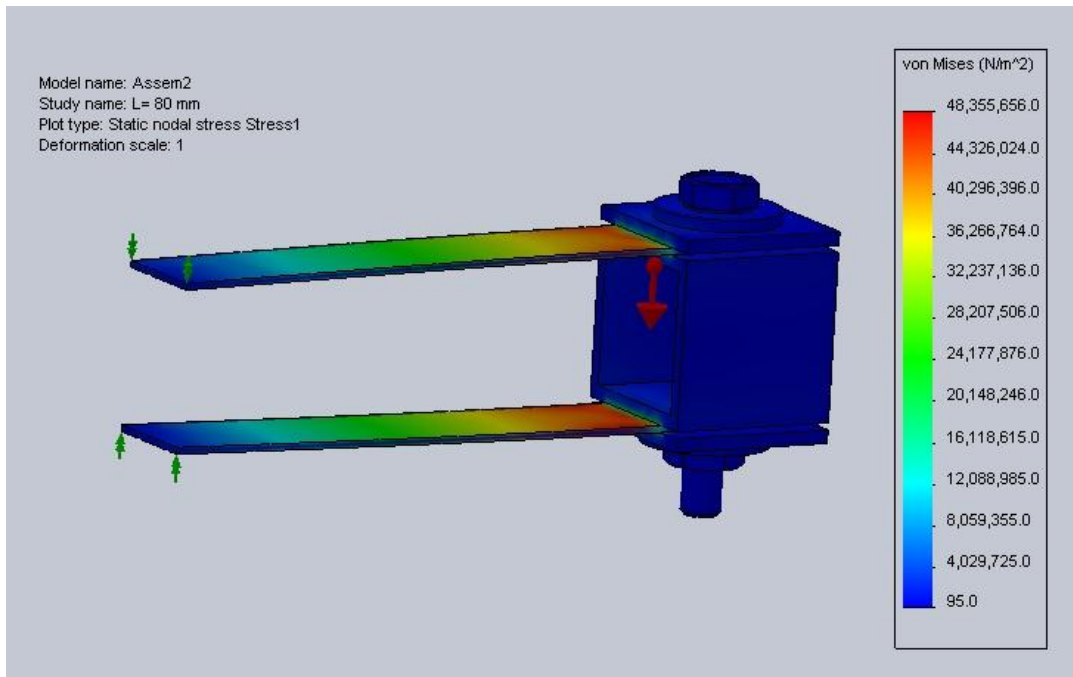


Fig. IV.14 Distribution des contraintes

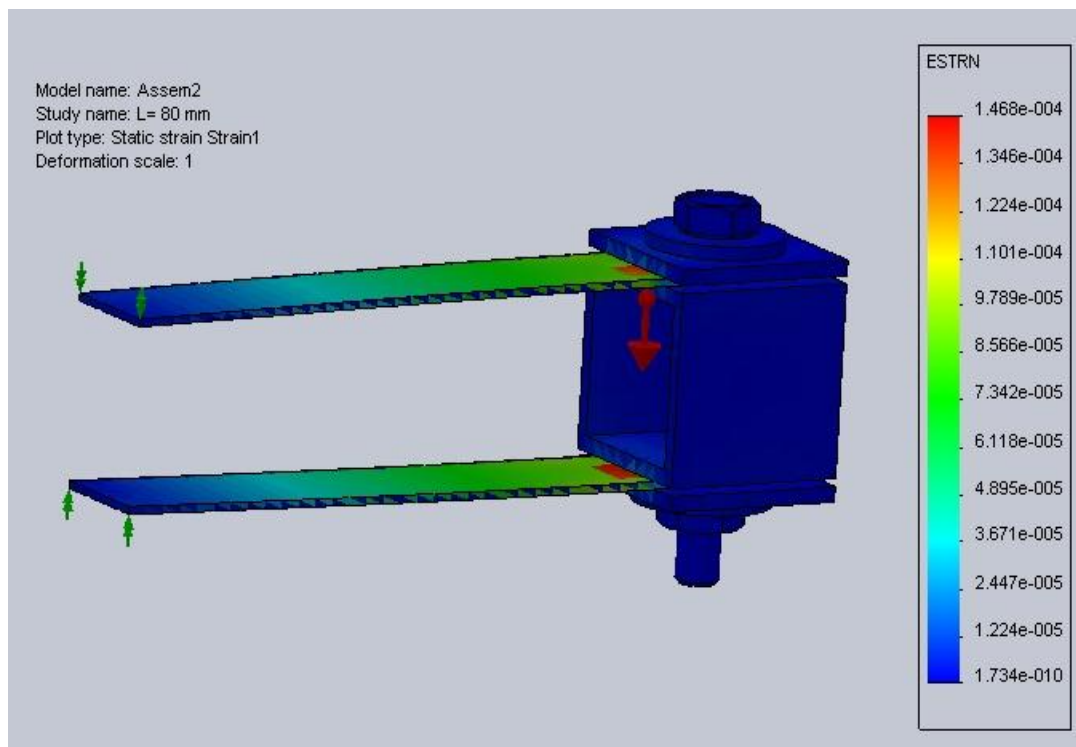


Fig. IV.15 Taux de déformation

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

Discussion

La simulation a été effectuée par le logiciel SolidWorks. En prenant une valeur de la déflexion $f=1$ mm.

Nous remarquons que les résultats de l'étude conceptuelle coïncident bien avec les résultats obtenus par le modèle mathématique.

IV.6 Réalisation de l'extensomètre

IV.6.1 Dimensionnement des lames

Pour des questions de fiabilité à long terme de notre extensomètre, la contrainte normale σ_{\max} dans la section droite la plus chargée doit rester inférieure à une contrainte limite admissible liée au matériau et fixée par le constructeur ou par des normes : R_{pe} [15].

Donc il faut dimensionner les lames tel que

$$\sigma_{\max} \leq R_{pe} \quad (4.13)$$

Avec $R_{pe} = \frac{R_e}{s}$ (4.14)

D'après (3.12) nous obtenons

$$\frac{-3 E x}{L^3} e f \leq \frac{R_e}{s} \quad (4.15)$$

Avec $x=L$

Paramètres de calcul

$$\begin{cases} e = 0.6\text{mm} \\ s = 1.5 \\ f = 2.5\text{mm} \end{cases}$$

Condition

$$L \geq 67.08 \text{ mm}$$

IV CONCEPTION DE L'EXTENSOMETRE

Donc les dimensions de notre lame sont :

$$\begin{cases} t = 1.2\text{mm} \\ L = 70\text{mm} \\ a = 15\text{mm} \end{cases}$$

IV.6.2 Fabrication et montage

La figure [IV. 16] illustre le prototype d'un extensomètre utilisé en mécanique de la rupture. Les paramètres de conception et les dimensions sont indiqués dans le dessin de définition de l'extensomètre [Annexe 1].

Les lames ont été réalisées à partir des tôles d'acier inoxydable de type austénitique d'épaisseur de 1.2 mm. Les lames sont munies des petites entailles pour la fixation sur l'éprouvette. Deux perçages sont réalisés pour les fixer sur le corps principal.

Un corps principal a été réalisé à partir d'un tube creux carré d'acier percé pour fixer les lames.

Deux cales ont été réalisées à partir d'un acier dur. Deux rondelles sont intercalées. Un couple vis écrous H6 permet l'assemblage.

Deux jauges (LY11-6/120A de HBM, [12]) de longueur $L_g = 3,2$ mm ont été installées ; l'une sur la face supérieure et l'autre sur la face inférieure des deux lames pour faire un montage en demi pont. Les deux sont disposées longitudinalement.

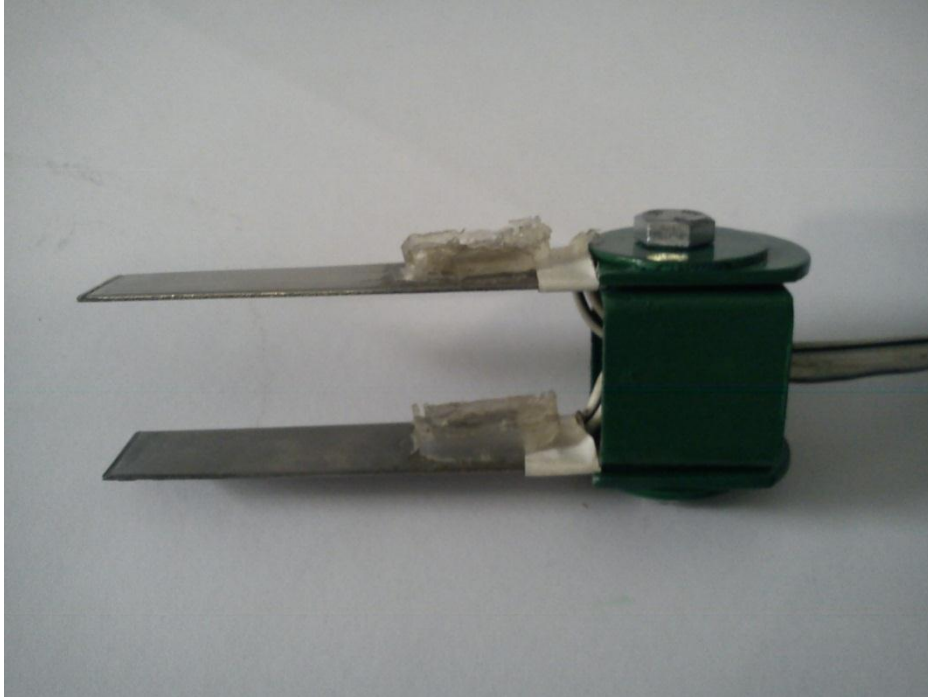


Fig. IV. 16 l'extensomètre réalisé

III.7. Conclusion

Un modèle d'extensomètre qui s'adapte bien avec l'essai CT a été conçu et réalisé. Le prototype utilise des jauges de déformation et permet de mesurer l'ouverture des déplacements. Le modèle a été conçu avec Solidworks. Les calculs analytiques et les résultats par la simulation sont concordants.

V-1 Introduction

Le but du chapitre est de vérifier la validité de notre modèle d'extensomètre. L'essai sur éprouvette CT est choisi. Nous comparons les résultats avec ceux obtenus par simulation SolidWorks. L'essai est fait sur la machine d'essai de traction dont dispose le département de génie mécanique.

Avant d'entamer l'étude expérimentale, nous devons s'assurer du bon fonctionnement de la machine et de l'appareillage nécessaire au déroulement des essais.

La lecture des résultats est obtenue à partir d'une courbe d'étalonnage obtenue suite à un test d'étalonnage fait sur notre extensomètre.

V.2. Description de la Machine d'essai de traction à utiliser

La machine est composée d'un bâti, d'un dispositif de mesure des efforts, dont la commande peut être faite manuellement ou par un moteur électrique.

La mesure de charge se fait à l'aide d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 2 Tonne. L'anneau dynamométrique est équipé d'un comparateur à cadran dont la petite division convient à une charge de 10 Kg [Fig. V.1]

Le moment du déplacement de la traverse est commandé par vis. La transmission du mouvement de rotation du moteur vers l'arbre de la machine se fait par chaîne mécanique et l'arbre transmet le mouvement à la vis par un système de roue à vis sans fin [Fig. V.2].



Fig. V.1 Anneau dynamométrique

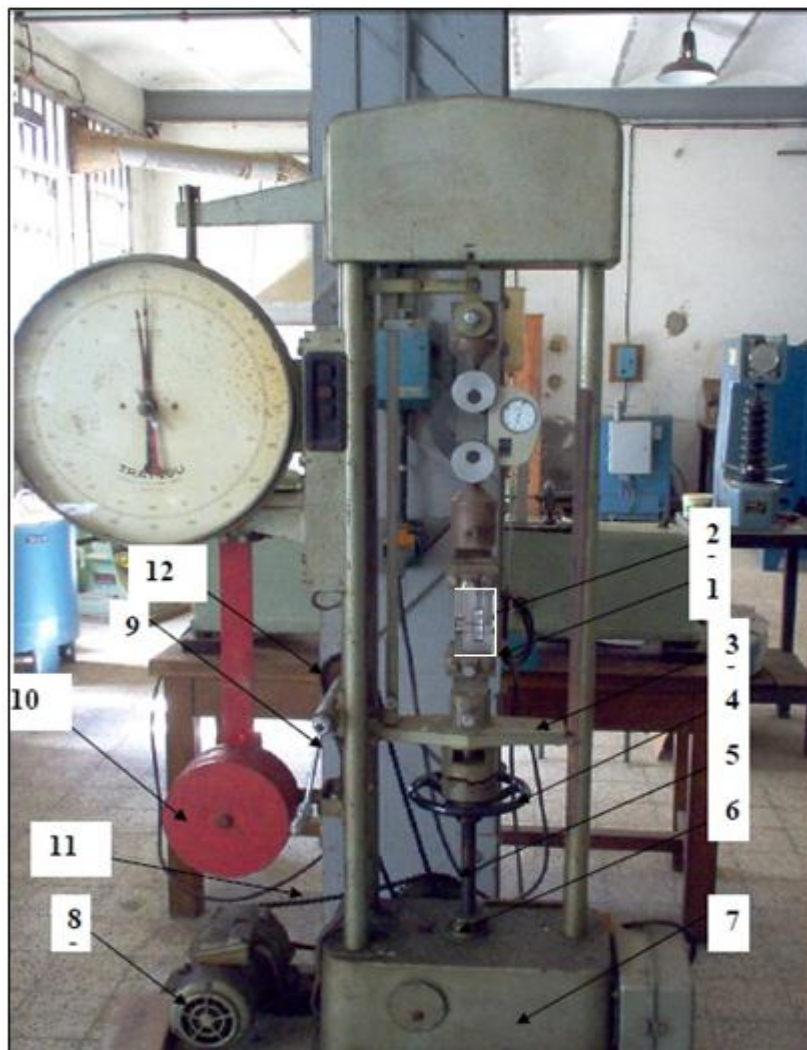


Fig. V.2 Machine d'essai de traction proposée

Tab V.1 Désignation des composantes de la machine d'essai de traction.

1. mors d'attache	5. vis de la machine	9. manivelle
2. éprouvette	6. écrou	10. pendule
3. traverse	7. bâti	11. chaîne de transmission moteur arbre
4. volant	8. moteur électrique	12. chaîne de transmission arbre manivelle

V.3 L'éprouvette

V.3.1 La réalisation

Comme nous ne disposons pas de moyen de fissuration par fatigue, et comme il n'est pas disponible dans le marché des alliages d'aluminium avec un facteur d'intensité de contrainte critique K_{Ic} connu, notre éprouvette est réalisée avec entaille sans fissure de fatigue à partir d'un alliage d'aluminium de nuance 7022 dont les caractéristiques sont données dans le tableau [V.2].

Tab V.2 Caractéristiques mécaniques de l'alliage d'aluminium 7022.

Propriété	valeur	unité
Module d'élasticité E	$7.2 \cdot 10^{10}$	N/m^2
Limite d'élasticité σ_{max}	$505 \cdot 10^6$	N/m^2
Coefficient de poisson ν	0.33	-
Masse volumique ρ	2810	Kg/m^3

L'éprouvette est fabriquée à partir d'un bloc d'aluminium de longueur 50mm, largeur 50mm et épaisseur de 20 mm.

L'éprouvette présente deux perçages obtenus à l'aide d'une forêt de diamètre de 10 mm sur une perceuse. Les deux perçages sont faits d'une manière très précis en assurant la co-axialité.

Vue la difficulté d'obtenir une entaille avec un bout en V, notre entaille est réaliser avec un bout arrondi [fig. V.3].



Fig. V.3 éprouvette CT

V.3.2 Préparation de l'éprouvette

Durant notre essai, l'extensomètre doit être fixé sur l'éprouvette. Cette fixation est assurée à l'aide des deux petits mécanismes [fig. V.4] fixées sur l'éprouvette par deux vis. La distance entre ces deux mécanismes assure la fixation [fig. V.5]. Le déplacement « pinçage » des deux lames est de 5mm.



Fig. V.4 mécanismes pour la fixation de l'extensomètre



Fig. V.5 éprouvette CT préparée

V.3.2 Dimensions de l'éprouvette

Les dimensions de l'éprouvette sont données dans [annexe 2].

L'absence de la fissure sur notre éprouvette ne pose pas un grand problème car le but de notre essai est la vérification de la validité de l'extensomètre et non pas le calcul des caractéristiques du matériau utilisé en terme de ténacité.

V.4. Etalonnage de l'extensomètre

Comme nous ne disposons pas d'un moyen d'étalonnage standardisé, nous avons utilisé un montage utilisant un palmer au 0.01 mm et un pont d'extensométrie pour mesurer les déformations. La procédure d'étalonnage consiste à fixer l'extensomètre et le palmer à l'aide des deux étaux comme l'illustre la figure [V.6]. Nous varions la valeur du pincement (le déplacement cumulé des deux lames) et lisons en même temps suite la valeur de la déformation correspondante



Fig. V.6 schéma d'étalonnage du l'extensomètre.

Dans cet essai, nous avons utilisé un montage en demi-pont construit à partir des deux jauges disposées longitudinalement sur les deux lames de l'extensomètre.

V.4 .1. Premier test d'étalonnage

Dans ce premier test nous nous intéressons au cas des petites courbures.

Une série de mesures permet de tracer la courbe d'étalonnage pour les petites courbures [fig. V.7] dans une plage des pincements varient entre 0.05 mm et 0.5 mm . Les valeurs obtenues sont données dans le tableau [V.3].

Tab V.3 valeurs des déformations obtenues.

Δ (mm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$\bar{\epsilon}(10^{-6})$	4	7	10	14	17	20	23	26	30	33

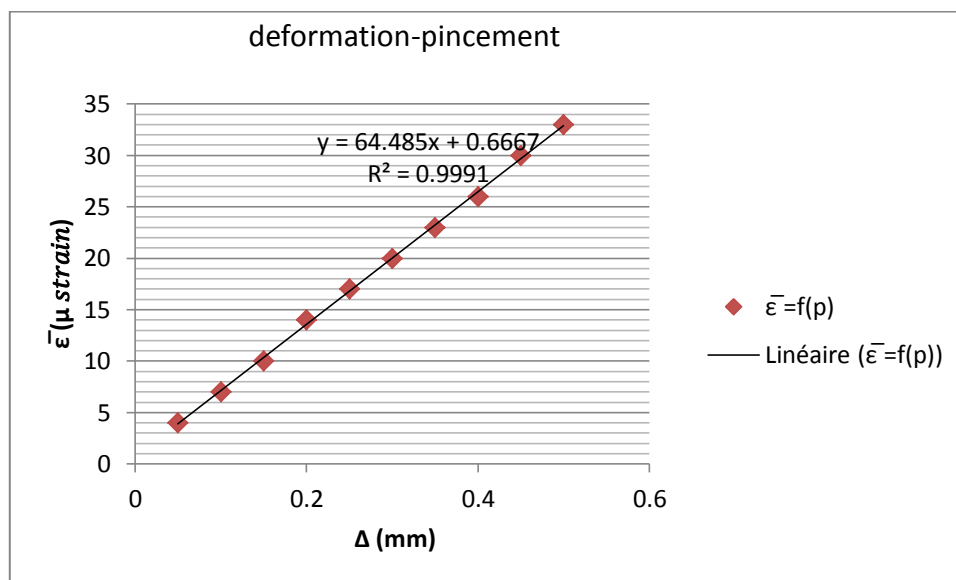


Fig. V.7 courbe d'étalonnage des petites courbures

➤ *Interprétation des résultats*

La courbe d'étalonnage $\bar{\epsilon}_{Lg} = f(a)$ à une allure linéaire. Ceci qui coïncide avec le résultat obtenu avec le modèle mathématique dont la pente est $\frac{3t\psi}{4L^3}$.

Pratiquement

$$P_{pr} = 6.44E-06$$

Théoriquement

$$P_{th} = 8.39 E-06$$

D'après l'analyse des résultats, nous constatons que le diagramme montre que la pente pratique est supérieure à celle trouvée théoriquement. Ceci peut résulter des raisons suivantes :

- disposition des jauges sur les deux lames,
- le mauvais équilibrage des résistances du pont de Wheatstone,
- lecture des valeurs du pont de Wheatstone,
- La mal caractérisation du matériau utilisé,
- Les defaults résultants d'usinages des pièces de notre extensomètre,
- disposition du montage d'étalonnage et l'incertitude liée au palmer utilisé.

V.4.2. Deuxième test d'étalonnage

Dans ce deuxième test, nous nous intéressons aux cas de pincement plus grands.

Nous imposons déplacement de 2.5 mm sur chaque lame (soit un pincement de 5mm). Nous libérons par la suite le déplacement.

Une série de mesures permet de tracer la courbe d'étalonnage de l'extensomètre [fig. V.8] dans une plage des pincements varie entre 0.05 mm et 0.5 mm . Les valeurs obtenues sont données dans le tableau V.4.

Tab V.4 valeurs des déformations obtenues.

Δ (mm)	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
$\bar{\epsilon}(10^{-6})$	15	26	35	44	52	61	70	79	88	96

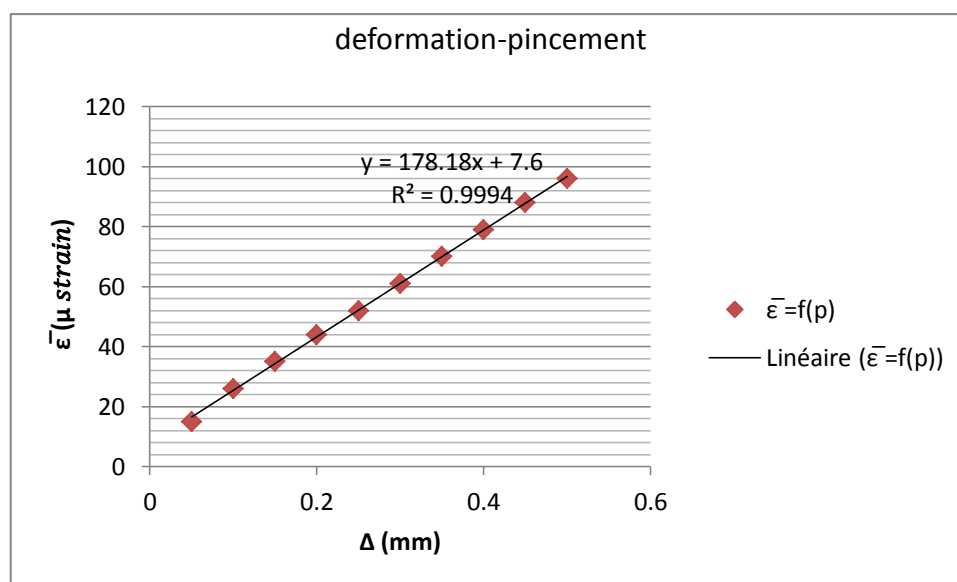


Fig. V.8 courbe d'étalonnage des grandes courbures

La courbe d'étalonnage est linéaire $\bar{\epsilon}_{Lg} = f(\Delta)$

V.5 Essai de traction

V.5.1 dispositif d'essai

L'essai est fait sur une éprouvette (CT) utilisant notre extensomètre comme un moyen de mesure [fig. V.9]. Avant d'entamer notre essai, il faut d'abord s'assurer du bon fonctionnement de la machine et de préparer toutes les conditions nécessaires pour le déroulement des essais pour lesquels nous avons conçu et réalisé les dispositifs pour la fixation de l'éprouvette sur la machine d'essai [fig. V.10].

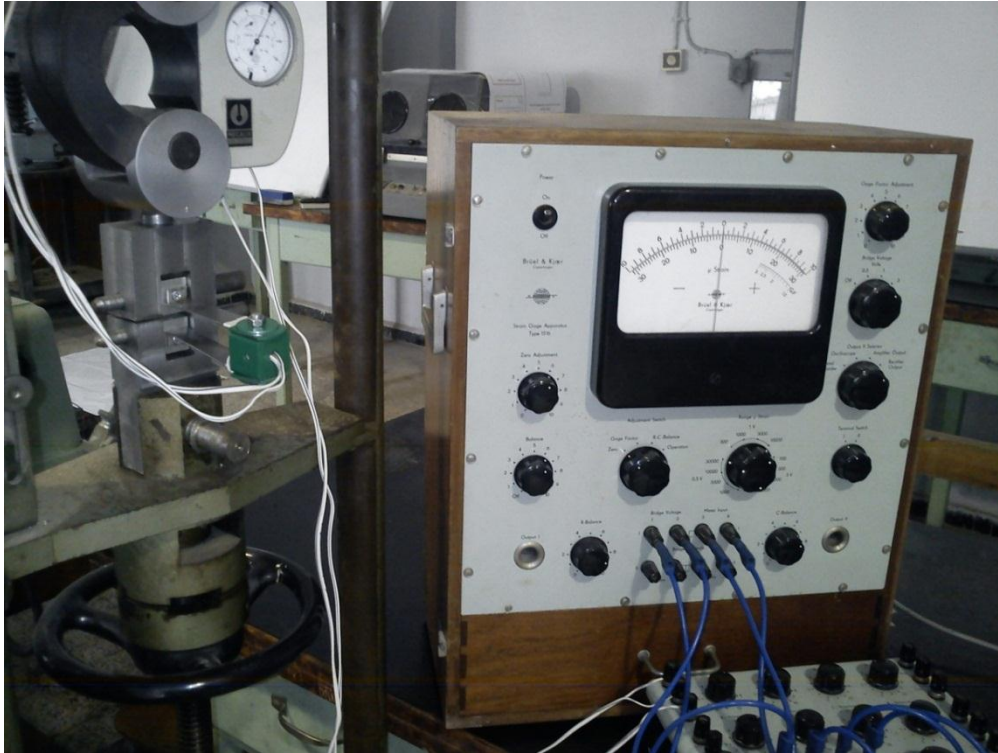


Fig. V.9 Essai de traction sur éprouvette (CT)



Fig. V.10 dispositifs de fixation de l'éprouvette :

V.5.2 Principe de l'essai

L'essai consiste à tracer la courbe charge-déplacement dans lequel la charge ne doit pas dépasser 6 KN, ce qui assure de rester dans le domaine élastique [fig. V.11].

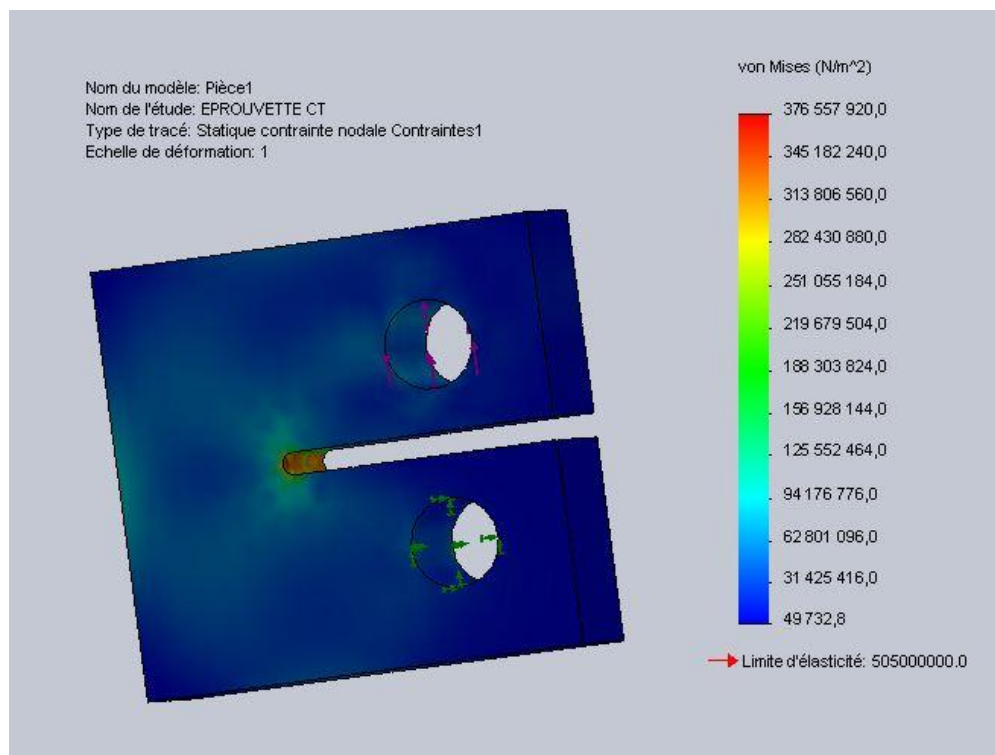


Fig. V.11 distribution des contraintes à la charge maximale

La courbe charge-déplacement n'est pas un résultat direct de l'essai, cependant ; on l'obtient à partir d'un tableau charge-déformation (résultat direct) en utilisant une courbe d'étalonnage.

Dans cet essai, la mesure de la charge se fait à l'aide d'un anneau dynamométrique d'une capacité de 2 tonnes [Fig. V.1]. Les valeurs du déplacement sont obtenues à partir des valeurs des déformations utilisant la courbe d'étalonnage.

Pour la mesure des déformations, nous réalisons un montage utilisant notre extensomètre et un pont de Wheatstone [Fig. V.12].

Pour l'alimentation du pont, on a le choix entre trois voltages d'entrée [0.3V, 1V, 3V]. Afin que la lecture des résultats soit lisible, on a la possibilité de manipuler différents calibres



Fig. V.12 Appareillage utilisé pour la mesure des déformations.

V.4.3 Résultat et interprétation

V.4.3.1 Courbe charge déplacement

Dans notre essai la charge doit être comprise entre 1000 et 6000 N. Une phase de pré-serrage est imposée. Sur l'anneau dynamométrique on lit une valeur de 20 Kg. Donc la charge réelle durant l'essai va varier entre 800 et 5800 N.

Une série de mesures effectuées permet de donner le tableau [V.3] suivant

Tab V.5 valeurs de déformations obtenues

F (N)	800	1800	2800	3800	4800	5800
$\bar{\epsilon}(10^{-6})$	11	18	27	37	46	55

En utilisant la courbe la courbe d'étalonnage [fig. V.8], nous transformons les déformations obtenues dans l'essai de traction tableau [V.5] en déplacements. On obtient le tableau [V.6]

Tab V.6 valeurs de déplacements

$\bar{\epsilon}(10^{-6})$	11	18	27	37	46	55
Δ (mm)	0.02	0.07	0.11	0.17	0.22	0.27
F (N)	800	1800	2800	3800	4800	5800

D'après le tableau en trace la courbe charge-déplacement [fig. V.13]

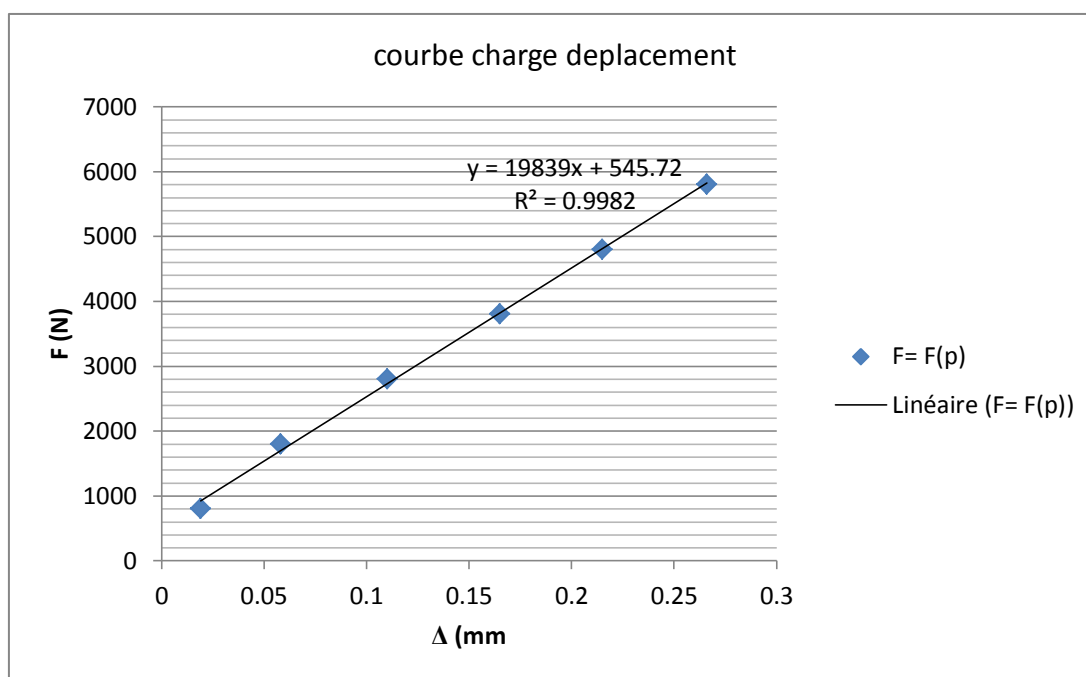


Fig. V.12 courbe charge-déplacement pratique

D'après le diagramme, nous constatons que la courbe charge-déplacement à une allure linéaire dans le domaine élastique du matériau de notre éprouvette, ce qui coïncide bien avec la théorie [fig. III.6].

Pour vérifier la validité de notre résultat ainsi que la validité de l'extensomètre utilisé, nous comparons les résultats obtenus pratiquement par des résultats théoriques obtenus avec une simulation SolidWorks.

La simulation a été effectuée sur une éprouvette CT. On impose une fixation sur l'un des deux perçages en appliquant une force F sur l'autre, comme illustré sur les figures suivantes.

➤ Pour $F = 1800 \text{ N}$

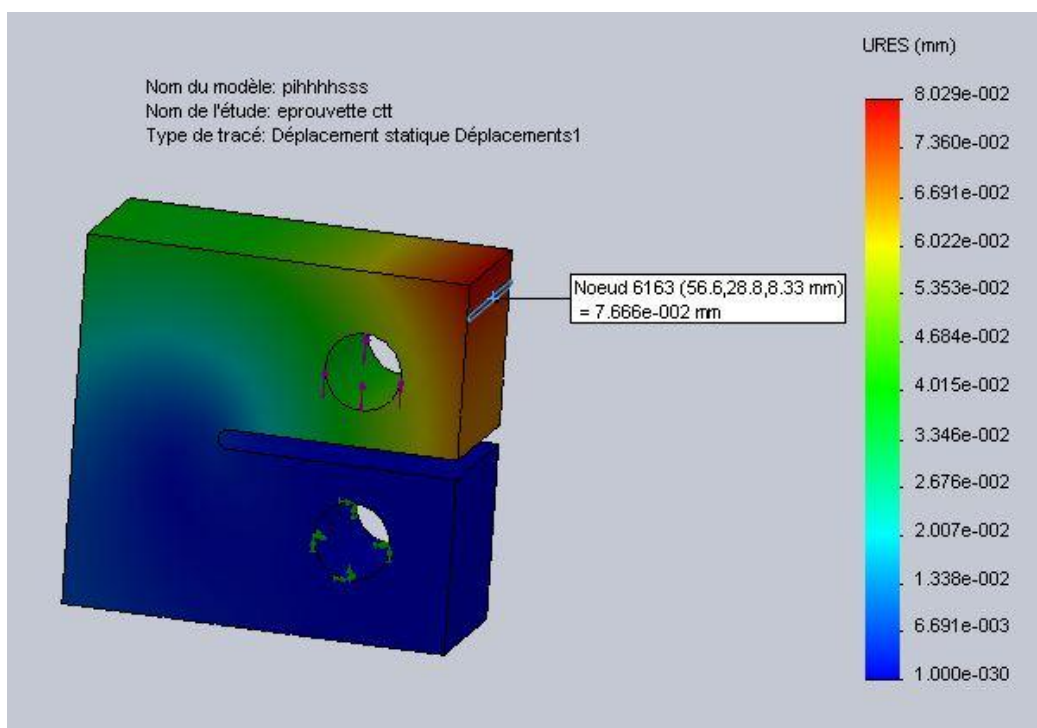


Fig. V.14 distribution des déplacements pour $F= 1800 \text{ N}$

➤ Pour $F = 2800 \text{ N}$

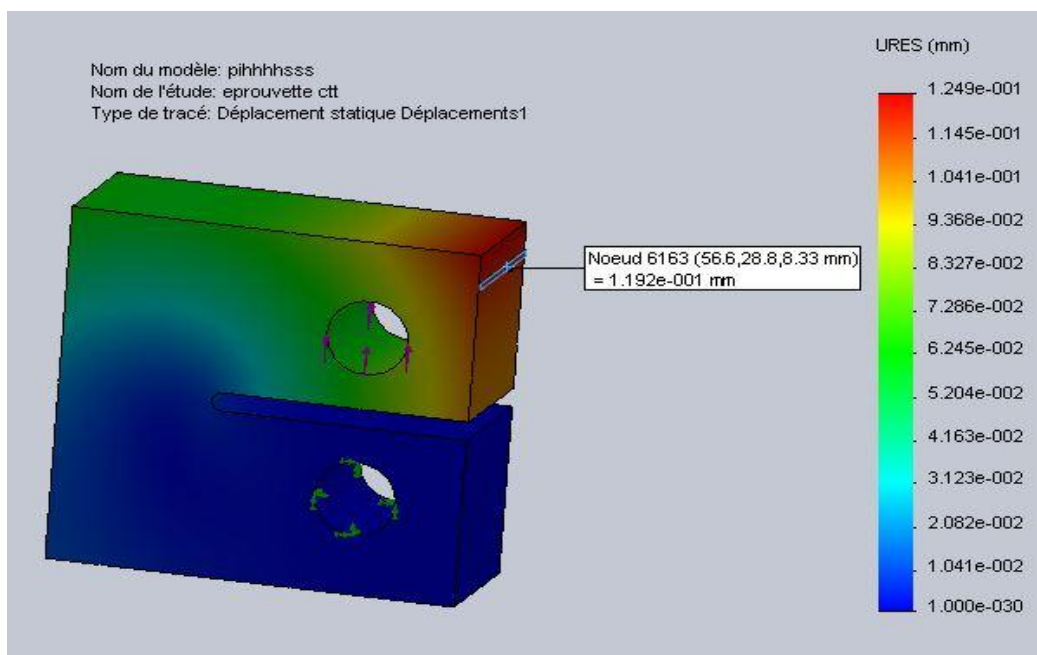


Fig. V.15 distribution des déplacements pour $F= 2800 \text{ N}$

➤ Pour $F = 3800 \text{ N}$

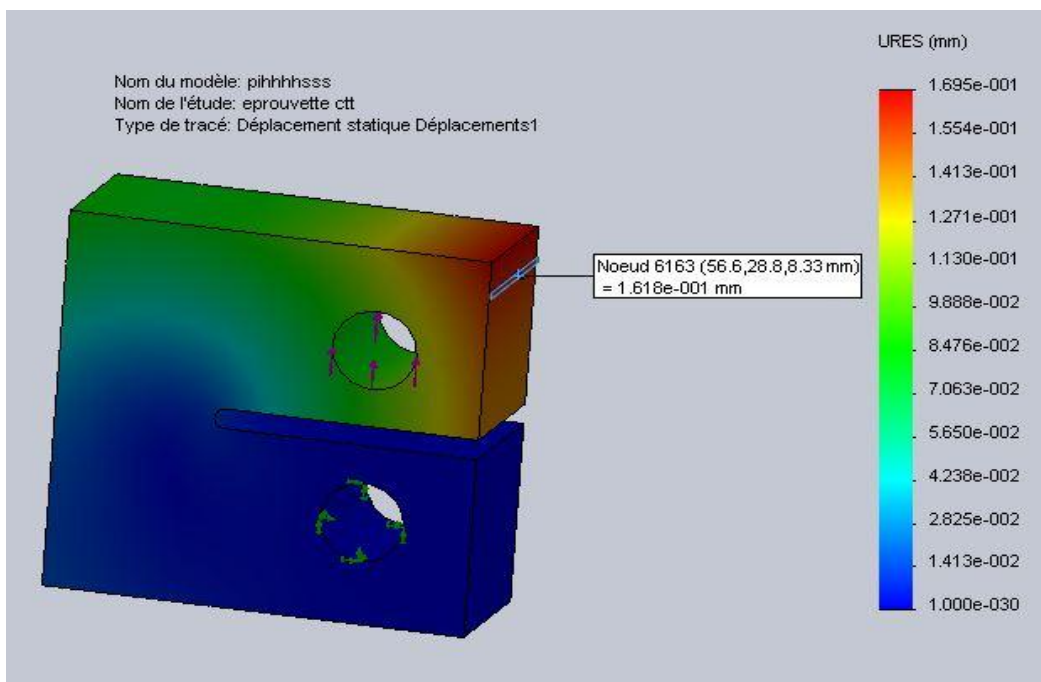


Fig. V.16 distribution des déplacements pour $F = 3800 \text{ N}$

➤ Pour $F = 4800 \text{ N}$

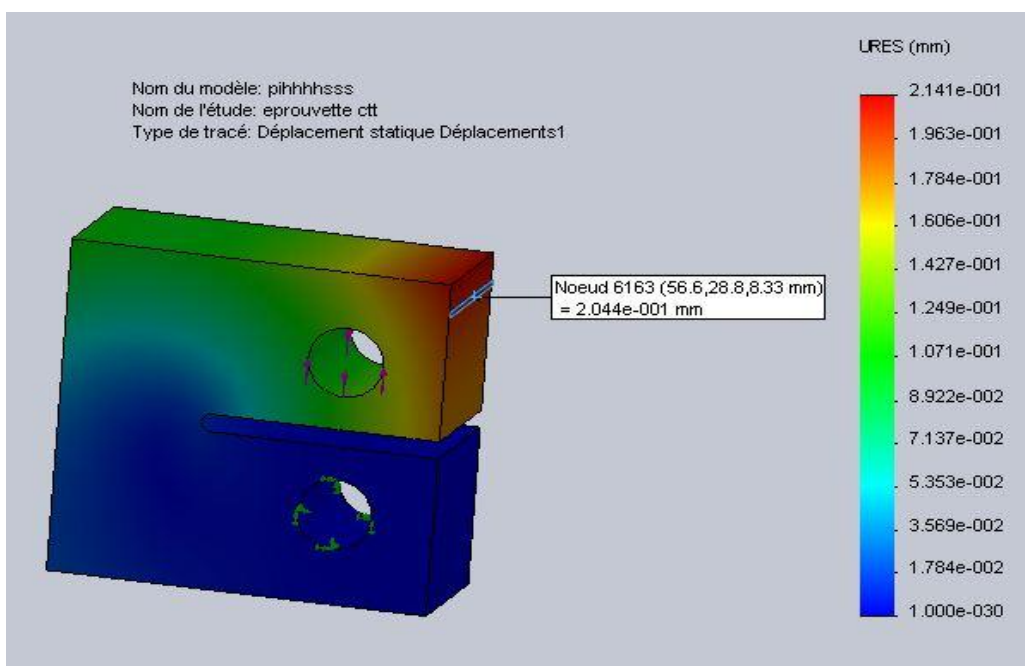


Fig. V.17 distribution des déplacements pour $F = 4800 \text{ N}$

➤ Pour $F = 5800 \text{ N}$

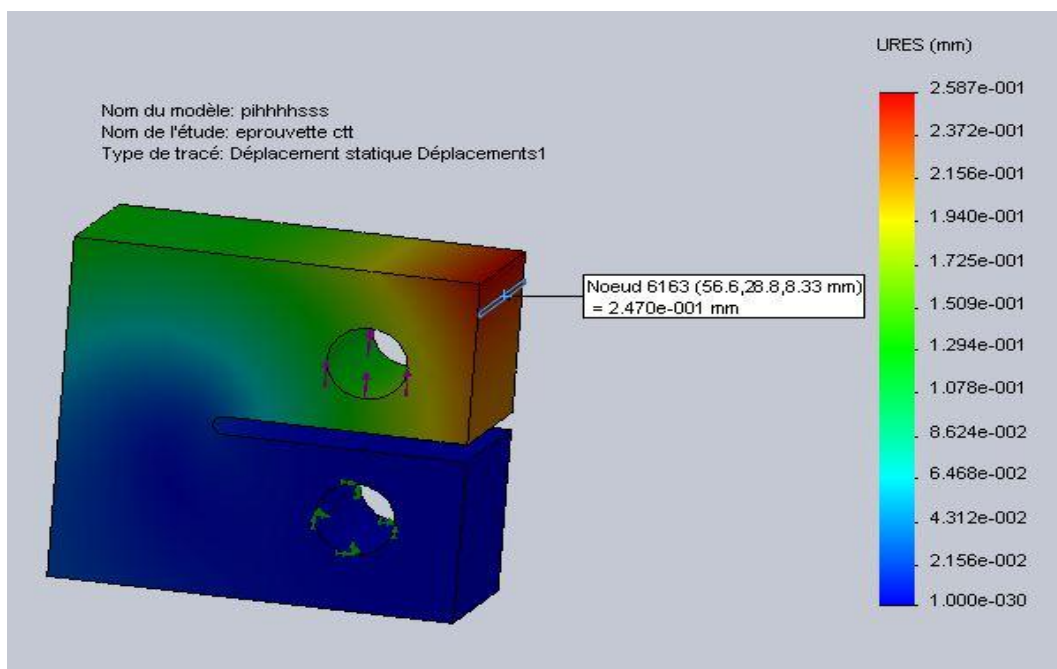


Fig. V.18 distribution déplacements pour $F = 5800 \text{ N}$

La simulation SolidWorks nous permet de tracer la courbe charge déplacement théorique [fig. V.19] à l'aide du tableau [V.7]

Tab V.7 Valeurs des déplacements obtenus par simulation

F (N)	800	1800	2800	3800	4800	5800
P (mm)	0.0338	0.0766	0.119	0.161	0.204	0.247

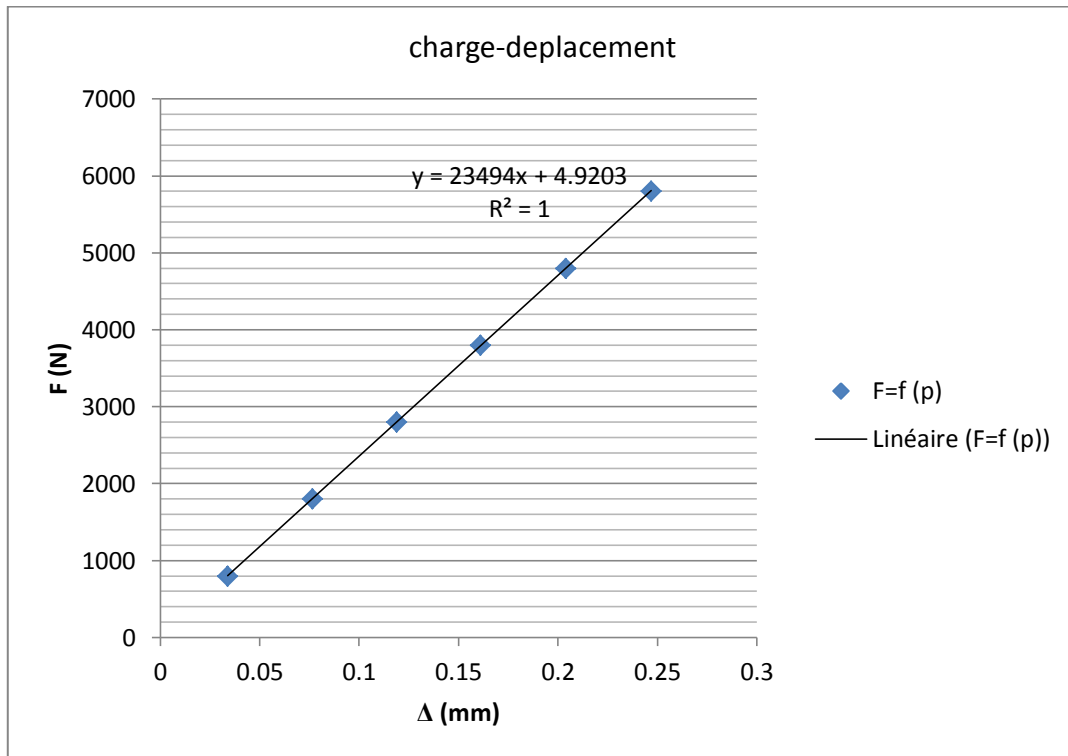


Fig. V.19 courbe charge-déplacement théorique

On trace les deux courbes pratique et théorique sur le même graphe pour visualiser la superposition entre eux [Fig. V.20].

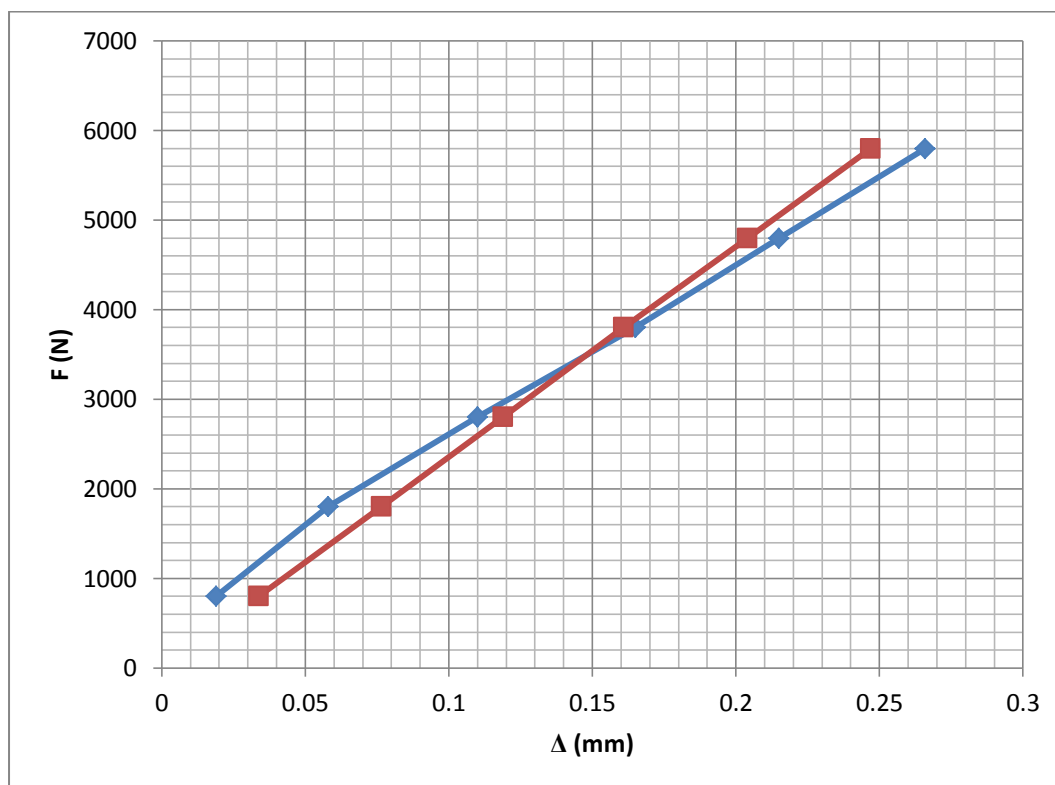


Fig. V.20 disposition des deux figures.

V.4.3.2. Interprétation des résultats

D'après le diagramme charge-déplacement obtenu pratiquement, on constate que la courbe $F = f(\Delta)$ a une allure linéaire ce qui coïncide avec le résultat théorique [fig. III.6] et aussi avec le résultat obtenu à l'aide de simulation SolidWorks.

D'après l'analyse des résultats, on observe que les deux diagrammes montrent que la pente de la courbe obtenue pratiquement est inférieure à celle trouvée théoriquement

- Pratiquement

$$P_{pr} = 19839$$

- Théoriquement

$$P_{th} = 23494$$

➤ **Calcul de pourcentage d'erreur**

Le pourcentage d'erreur est définie par

$$\%E = \Delta p / p_{th}$$

$$\%E = 15.44\%$$

Cette erreur est assez grande mais reste acceptable tenant compte des moyens utilisés lors de la réalisation des différents dispositifs et les moyens de mesures disponible dans notre département. Cette différence résulte de deux raisons fondamentales : les dispositifs et les instruments de mesure

1) Les dispositifs

- L'absence d'un montage d'étalonnage standardisé,
- La phase de pré-serrage avant d'entamer l'essai qui est due au mauvais usinage des dispositifs de fixation,
- les erreurs commises lors de la réalisation de l'éprouvette,
- La mal caractérisation du matériau utilisé.

2) Les instruments de mesure

- le mauvais équilibrage des résistances du pont de Wheatstone,
- incertitude de lecture des valeurs sur le pont de Wheatstone,
- incertitude de lecture des valeurs de la charge sur l'anneau dynamométrique,
- incertitudes sur le palmer

V.5 conclusion

L'extensomètre est opérationnel et les étalonnages sont acceptables. Il permet la mesure du déplacement. La simulation sur SolidWorks est bonne. La performance du prototype peut être améliorée en améliorant les outils au sein du département.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'extensomètre conçu et réalisé au sein du département permet de travailler sur des éprouvettes CT et des éprouvettes en flexion 3 points dans le cadre de la mécanique de la rupture.

L'extensomètre a été réalisé avec ses accessoires.

Les tests d'étalonnage ont montré une réponse acceptable de l'extensomètre.

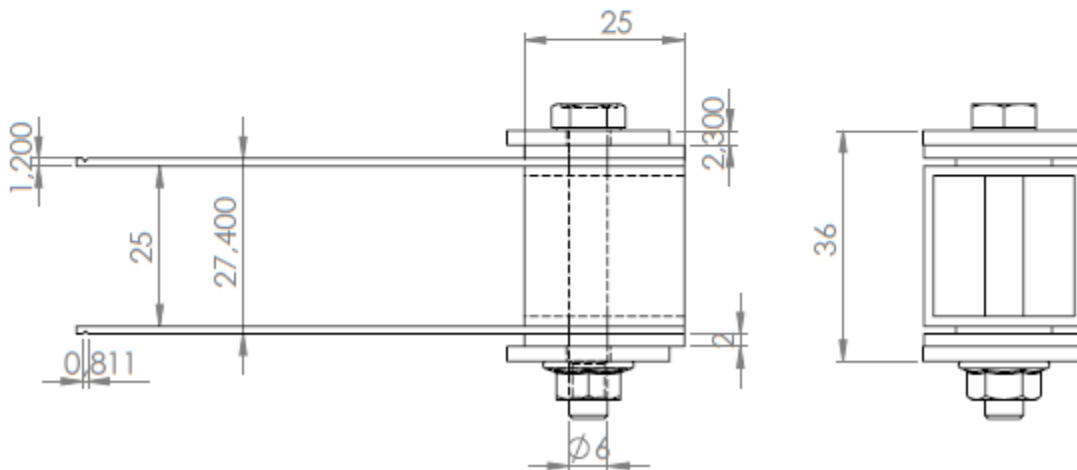
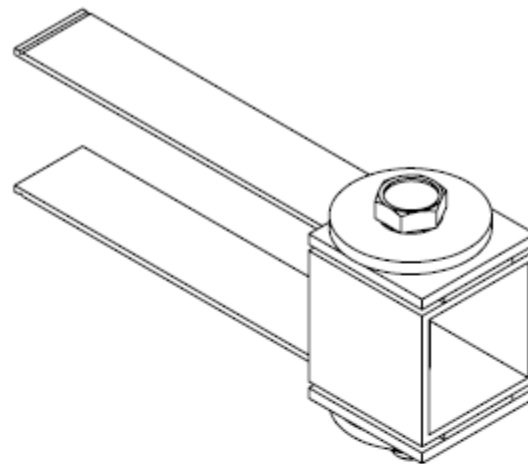
Le pont de Wheatstone analogique utilisé lors des mesures est assez ancien. Des lectures sur des ponts numériques peuvent améliorer les lectures

La qualité des usinages doit être améliorée.

Références bibliographiques

- [1] **Amar Ghoul**, Mécanique de la rupture. Casbah éditions 2005
- [2] **Leblond J.B.**, Mécanique de la rupture fragile et ductile. Hermès science publications, (2003)
- [3] **Lemaitre J, Chaboche J.L**, Mécanique des matériaux solides .Edition Dunod paris (1986).
- [4] **Perez N**, Frature mechanics. Kluwer Academic Publishers, (2004)
- [5] **Barthélémy B**, Notions pratiques de la mécanique de la rupture. Edition Eyrolles, 1980.
- [6] **Hossein-Tehrani P, Eslami M.R, Daghyani H.R**. Dynamic crack analysis under couples thermoplastic assumption. Journal of Applied Mechanics, Vol. 68, (2001).
- [7] **Broek D**, Elementary engineering fracture mechanics .MarinusanaijhoffPublishers, (1982).
- [8] **LUC Marchand**, Analyse expérimentale des contraintes, Ecole Polytechnique de Montréal, Canada, Hiver 2010.
- [9] **K.Hoffman**, Bases de la technique des jauges d'extensométrie, HBM.
- [10] **J.Molimard**, Cours de Mécanique Expérimentale, Ecole Nationale Supérieure de Mines de Saint-Etienne, France, 2011.
- [11] **J.L. LE Goer, J. Avril**, Capteurs de force, Techniques de l'Ingénieur R1 860, Paris.
- [12] **J.L. LE Goer, J. Avril**, Extensométrie, Techniques de l'Ingénieur R1 850. Paris.
- [13] **Dominique François**, Essais de mesure de la ténacité-Mécanique de la rupture, techniques de l'ingénieur R1 551. Paris.
- [14] www.directindustry.fr/extensometres-a-agrafe-62911-568160.
- [15] Cours de RDM., Université de Bourgogne , France

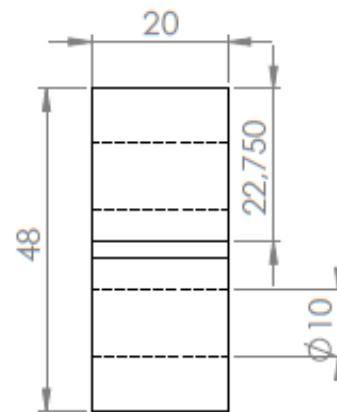
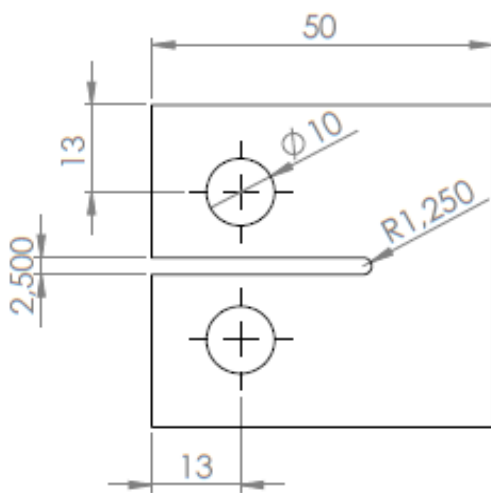
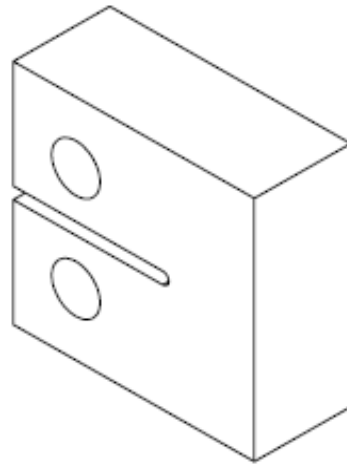
Annexe 1



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		EXTENSOMETER	ENP Dép G.Mécanique
1:1				
Etudiant	A.Mellal	Materiau		
Promoteur	Y.Belkacemi			
Promoteur	B.Guergueb			
Fabricant	A.Mellal			

Annexe 2



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

Echelle	Masse		EPROUVETTE CT	ENP Dép G.Mécanique
1:1	35.34g			
Etudiant	A.Mellal	Matériau		
Promoteur	Y.Belkacemi	Alum 7022		
Promoteur	B.Guergueb			
Fabricant	USI-PRECIS			