

REPUBLICUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOU D MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT DE GENIE-MECANIQUE



Mémoire

De fin d'étude

En vue d'obtention du diplôme

De MASTER en Génie-Mécanique

Option : Construction Mécanique

Thème

Conception et réalisation d'un capteur de déplacement

Présenté par :

Mr BOUMRAH FARID

Dirigé par :

Mr A. BILEK

Promotion 2011-2012

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu, mon promoteur monsieur A. BILEK, pour le sujet qu'il m'a proposé et pour ses précieux conseils et son soutien tout au long de la préparation de ce mémoire.

Je tiens également à remercier les membres du jury pour avoir aimablement accepté de juger le contenu de cette thèse. A savoir messieurs :

- ❖ Mr. S. LARBI
- ❖ Mr. S. DJEBALI
- ❖ Mr. HAKEM

Je n'oublierai pas de remercier également tous ceux qui de près ou de loin m'ont aidé et encouragé tout au long de la préparation de ce mémoire et surtout Mr. AHMED ZAID AMAR.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

- *Ma mère, mon père ;*
- *mes frères et sœurs ;*
- *Toute ma famille ;*
- *Tous mes amis.*



Sommaire

Introduction

Chapitre I : Généralités sur les capteurs

I.1: Généralités	4
I.2: Les caractéristiques d'un capteur	4
I.2.1 Précision	4
I.2.2 Durée de vie	5
I.2.3 Fiabilité	5
I.2.4 Etendue de mesure et courbe d'étalonnage	6
I.2.5 Sensibilité S du capteur	7
I.2.6 Domaines d'utilisation	7
I.2.7 Grandeurs d'influence	9
I.3: Quelques principes de capteurs	10
I.4 : Schéma électrique des capteurs	11
a. Principe du montage en pont	11
b. Disposition des jauges	12
I.5 : Conception mécanique des capteurs	13
I.5.1 Calcul des capteurs	13
I.5.2 Métal du corps d'épreuve	17
I.6 : Choix des jauges pour les capteurs	18

Chapitre II : les jauges d'extensométries

II.1 : Principe des jauges	21
II.2 : Principe de mesure	22
II.3 : Effet piézorésistif des métaux	22
II.4 : Matériaux et réalisation	23
II.5 : Quelques types de jauges	23
II.5.1 : Les jauges à semi-conducteurs	23

II.5.2 : Les jauges résistive	24
II.6 : Caractéristiques principales des jauges métalliques	25
II.7 : Principaux facteurs influant sur le comportement des jauges	27
II.7.1 : Influence de la température	27
II.7.2 : Influence de l'humidité	28
II.7.3 Déformation apparente	28
II.7.4 : Jauges auto-compensées en température	29
II.8 : Choix d'une jauge	30
II.8.1 : Choix d'une série	30
II.8.2 : Choix d'une option	31
II.8.3 : Choix d'une compensation	31
II.8.4 : Choix d'une géométrie	32
II.8.5 : facteur de jauge, ses variations et la résistance nominale des jauges	32
II.9. Méthodes de mesure pour les jauges résistives	33

Chapitre III : Essai de traction

III.1 : Introduction	38
III.2 : Les éprouvettes	38
III.3 : Machines d'essais	41
III.4 : La machine hydraulique de traction OEHLGASS MP12	42
III.5 : Diagramme de traction	45
III.5.1 : Caractéristiques mécaniques	46
III.5.1.1 : Exploitations de l'essai	46
III.5.1.2 : Domaine élastique	48
III.5.1.3 : Domaine plastique	50
III.5.1.4 : la striction	51
III.6 : Autres caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai de traction	52
III.7 : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction	53
III.8 : considération sur l'essai de traction	54

Chapitre IV : Conception du capteur

IV.1 : Description	56
IV.2 : Principe de fonctionnement	56
IV.3 : Positionnement de la jauge sur la lame	57
IV.4 : Caractéristiques des jauges utilisées	59
IV.5 : Montage du capteur	60
IV.6 : La chaîne de mesure	60
IV.7: Etalonnage de capteur	62
IV.8: Essai de validation pour les deux capteurs	63
IV.9 : Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés	71
Conclusion générale	72
Références Bibliographiques	73
Annexe	

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur les capteurs

Fig I. 1 : Schéma de principe d'un capteur	4
Fig I.2 : Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur	6
Fig I.3 : Courbe d'étalonnage d'un capteur	7
Fig I. 5 : Mesure de déplacement	10
Fig I. 6 : Mesure de pression	10
Fig I. 7 : Montage en pont de Wheatstone	11
Fig I. 8 : Disposition des jauges sur une poutre soumise à une flexion pure	13
Fig I. 9 : Différentes formes de jauges	19

Chapitre II : Théorie sur les jauges d'extensométries

Fig II.1 : Jauge de contrainte	21
Fig II.2 : Pont de Wheatstone	22
Fig II.3 : Jauge piézorésistive diffusée	24
Fig II.4 : Jauges résistives	25
Fig II.5 : déformation apparente pour différents alliages, La structure étant en acier	29
Fig II.6 : amplitude des déformations en fonction du nombre de cycle	30
Fig II.7 : le pont de Wheatstone	33
Fig II.8 : Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction et en flexion	35
Fig II.9 : Le pont Wheatstone avec différentes configurations des jauges actives	36

Chapitre III : Essai de traction

Fig III. 1 : éprouvette cylindrique	40
Fig III. 2 : éprouvette plate	40
Fig III.3 : la machine de traction « OEHLGASS MP12 »	42
Fig III. 4 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction.	46
Fig III. 5 : Courbe contrainte-déformation. Limite d'élasticité et résistance à la traction	47
Fig III. 6 : Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes	47
Fig III. 7 : Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe	48
Fig III. 8 : courbe de traction de l'acier doux	50
Fig III.9 : allongement reparti et allongement de striction	52
Fig III.10 : éprouvette avant et après rupture	52
Fig III.11 : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction.	54

Chapitre IV : Conception de capteur

Fig IV. 1 : capteur de déplacement	56
Fig IV.2 : La distance entre la jauge et le point d'application de force	57
Fig IV.3 : La lame fléchie et la jauge d'extensométrie	58
Fig IV.4 : comportement des jauges en fonction de la température	59
Fig IV.5 : Montage du capteur sur la machine de traction	60
Fig IV.6 : Machine de traction et la chaîne d'acquisition	61
Fig IV.7 : Le capteur de déplacement et la chaîne d'acquisition au cours d'un essai	61
Fig IV.8 : courbe d'étalonnage du capteur de déplacement	62
Fig IV.9 : dimensions de l'éprouvette usinée	63
Fig IV.10 : courbe de traction de l'essai de validation	69
Fig IV.11 : éprouvette de traction après rupture	70

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités

Tableau I. 1 : Capteur de force à jauges piézorésistif N556-1 (fabricant J.P.B)	8
Tableau I. 2 : Formules utiles pour le calcul des capteurs	15
Tableau I. 3 : Exemples de métaux pour corps d'épreuve	17

Chapitre II : les jauges d'extensométries

Tableau II.1 : Caractéristique d'alliages pour jauges métalliques	23
Tableau II.2 : Compensations propres aux matériaux utilisés	31

Chapitre III : Essai de traction

Tableau III. 1 : Dimensions des éprouvettes cylindriques	39
Tableau III. 2 : Dimensions des éprouvettes plates	40
Tableau III.3 : Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux	49

Chapitre IV: Conception de capteur

Tableau IV.1 : Valeurs d'étalonnage	62
Tableau IV.2 : Résultats obtenue avec le capteur de déplacement	63
Tableau IV.3 : Validation des résultats	71

Conception et réalisation d'un capteur de déplacement

Introduction :

Les matériaux métalliques sont très employés dans la technologie. Lorsqu'on est en présence d'un matériau nouveau, on est appelé à déterminer ses propriétés et ses caractéristiques mécaniques. Parmi ses caractéristiques les plus importantes qui définissent un matériau, on trouve la limite élastique. Cette dernière est souvent déterminée expérimentalement à partir d'un essai de traction dont l'interprétation est simple et commode.

Si l'essai de traction est simple à interpréter, sa réalisation par contre pose un certain nombre de problèmes liés par exemple à la géométrie de l'éprouvette et aussi au système de fixation.

La machine de traction OEHLGASS de type MP12 existante au niveau de laboratoire de génie mécanique se munie d'un dynamomètre et d'un comparateur qui donnent les valeurs respectivement de l'effort exercé et de l'allongement qui en découle, la courbe de traction ainsi obtenue se trouve entachée de beaucoup d'erreurs qui sont dues aux systèmes d'amarrage et à la lecture des données.

Pour remédier à toutes ses erreurs et automatiser la machine de traction OEHLGASS et afin d'améliorer ces performances et mesurer les déplacements à grande précision. Nous proposons de réaliser un capteur de déplacement à l'aide de jauges d'extensométrie.

Le capteur, une fois conçu et réalisé servira alors au tracé des courbes de traction. L'interprétation de ces dernières permettra de déduire certaines caractéristiques du matériau constituant les éprouvettes (la limite élastique, la résistance à la rupture et l'allongement relatif...).

Chapitre I

Généralités sur les capteurs

Chapitre I : Généralités sur les capteurs

I.1 Généralités

Un capteur est un transducteur capable de transformer une grandeur physique en une autre grandeur physique généralement électrique (tension) utilisable par l'homme ou par le biais d'un instrument approprié (Fig I.1).

Le capteur est le premier élément d'une chaîne de mesure ou d'instrumentation.

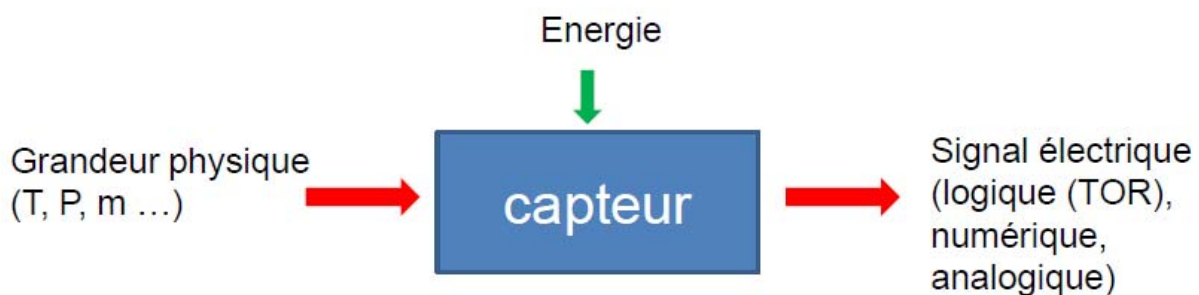


Fig I.1 : schéma de principe d'un capteur

Un capteur n'est jamais parfait, il convient de connaître avec la plus grande précision possible son état d'imperfection. De plus, il faut prendre en compte la perturbation apportée au système par la mesure.

Le concepteur d'une chaîne instrumentale aura donc des choix à opérer.

I.2 Les caractéristiques d'un capteur

I.2.1 Précision

Les caractéristiques que l'on peut attendre de trois types de capteurs suivants :

-Capteur d'usage courant : capteurs facilement réalisables par tout technicien simplement averti des techniques de l'extensométrie par jauges.

- Capteur de précision améliorée : capteurs ayant, des caractéristiques que l'on a pu amélioré en tenant compte méticuleusement des précautions, précautions nécessaires mais simples.

-Capteur de haute précision : capteurs nécessitant des techniques plus sophistiquées et, en conséquence, du domaine des professionnels.

Ces caractéristiques sont données pour deux types de capteurs, parmi les plus courants : mesures de poids et de pressions. On notera que les performances des capteurs de pression sont moins bonnes que celles de poids.

I.2.2 Durée de vie

Les jauges ont été inventées vers 1950, et les capteurs de cette époque sont encore excellents, bien qu'ils aient été fabriqués à une époque où cette technique était empirique. Cela prouve qu'un capteur peut durer de nombreuses années.

Les capteurs peuvent être utilisés dans des conditions variées qui permettent des vérifications périodiques ou non.

Pour la surveillance de constructions à long terme, il est également souhaitable de prévoir dès l'origine la possibilité de les soulager. Des capteurs de tension de câbles peuvent être montés avec des dispositifs mécaniques qui libèrent le capteur de sa charge tout en maintenant les câbles en traction. Lorsque c'est impossible, un doute peut subsister. Si le capteur indique une valeur fixe, on tend à penser qu'il est fidèle. Si, par contre, il détecte une variation de charge, on se pose toujours la question de savoir si c'est une dérive ou vraiment une évolution de l'édifice surveillé.

I.2.3 Fiabilité

La fiabilité des systèmes électroniques ou mécaniques est définie par le MTBF, sigle qui peut désigner la même entité en français ou en anglais : moyenne des temps de bon fonctionnement ou *Mean Time Between Failures*.

On considère aussi le MTTF (*Mean Time To Failure*).

Pour un composant tel qu'un capteur, qui est substitué sans réparation, les deux définitions se confondent.

Comme pour tout composant d'un système, il est parfois nécessaire de connaître le MTBF d'un capteur, qui dépend de critères très différents :

- la partie *mécanique*, comprenant principalement le corps d'épreuve, a une fiabilité qui dépend de la nature des matériaux et de la qualité des usinages.
- la partie *électrique* (sauf les jauges), comprenant des câbles et des connecteurs, dépend des fiabilités de ces composants, connues d'après les normes de leurs fabrications respectives.
- enfin les *jauges*, qui nous intéressent plus particulièrement, sont à considérer sous les deux aspects suivants.

Le travail demandé aux jauges en impose la durée de vie. Pour chaque type, les durées sont connues, données sous forme de courbes de fatigue. Suivant le nombre de cycles successifs à subir, suivant que ces cycles sont alternés, ondulés, ou répétés, c'est-à-dire selon la position relative du zéro et des élongations maximales, nous avons une durée de vie estimée, dont on déduit le MTBF propre aux jauges en fonctionnement. N'oublions pas cependant que les courbes de fatigue sont valables pour des jauges collées et câblées avec soin. La grosseur et la position des points de soudure des sorties ont une grande influence sur les limites réelles de fatigue (généralement une détérioration par fissuration).

* Il faut également considérer l'endurance des jauges lorsqu'elles ne fonctionnent pas ou lorsqu'elles indiquent des déformations constantes. Là encore, la qualité du travail de montage est fondamentale.

Pour donner un exemple de fiabilité de jauges parfaitement équipées (collées, câblées et protégées), on peut prendre comme valeurs de MTBF celles qui ont été obtenues sur des

résistances en métal massif dont la technologie est analogue à celle des jauges. Ces résistances sont équipées dans des laboratoires parfaitement conditionnés (température, humidité, poussière, etc.). L'essai de 676 résistances, suivies pendant plusieurs années au laboratoire de Vishay Intertechnology Inc. (États-Unis), a conduit aux résultats suivants :

- 0,001 8 % de défaillances pour 1 000 heures (intervalle de confiance 60 %) ;
- 0,004 6 % de défaillances pour 1 000 heures (intervalle de confiance 90 %) ; la puissance électrique fournie étant 1/10 de la valeur maximale. On trouve ainsi, par le calcul des probabilités, des durées de vie de 6 000 années !

I.2.4 Etendue de mesure et courbe d'étalonnage

Le capteur est le dispositif qui soumis à l'action d'un mesurande non électrique présente une caractéristique de nature électrique (charge, tension, courant ou impédance) désignée par s et qui est fonction du mesurande :

$$s = F(m)$$

s est la grandeur de sortie ou réponse du capteur, m est la grandeur d'entrée ou excitation. La mesure de s doit permettre de connaître la valeur de m (Fig I.2).

La relation $s = F(m)$ résulte dans sa forme théorique des lois physiques qui régissent le fonctionnement du capteur et dans son expression numérique de sa construction (géométrie, dimensions), des matériaux qui le constituent et éventuellement de son environnement et de son mode d'emploi (température, alimentation) [2].

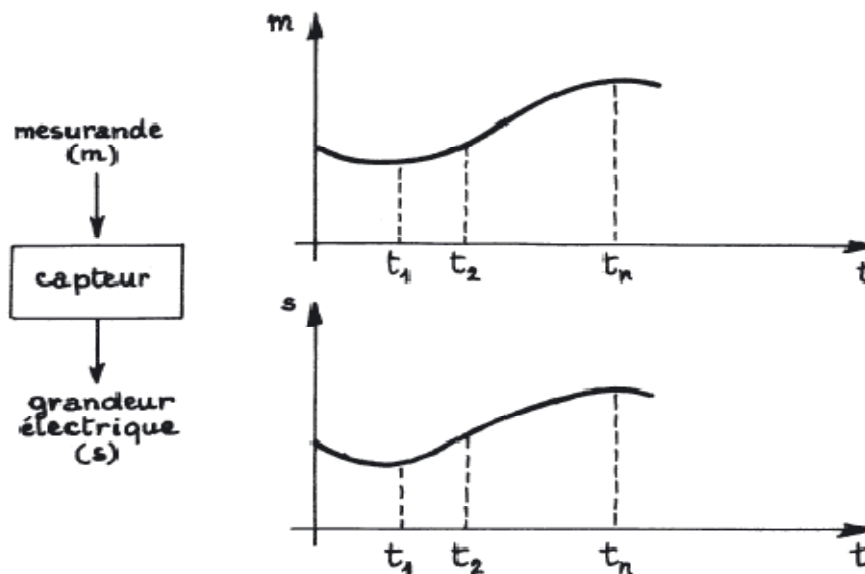


Fig I.2 : Exemple d'évolution d'un mesurande m et de la réponse s correspondante du capteur.

Pour tout capteur la relation $s = F(m)$ sous sa forme numériquement exploitable est explicitée par étalonnage : pour un ensemble de valeurs de m connues avec précision, on mesure les valeurs correspondantes de s ce qui permet de tracer la courbe d'étalonnage (Fig I.3a) ; cette dernière, à toute valeur mesurée de s , permet d'associer la valeur de m qui la détermine (Fig I.3b).

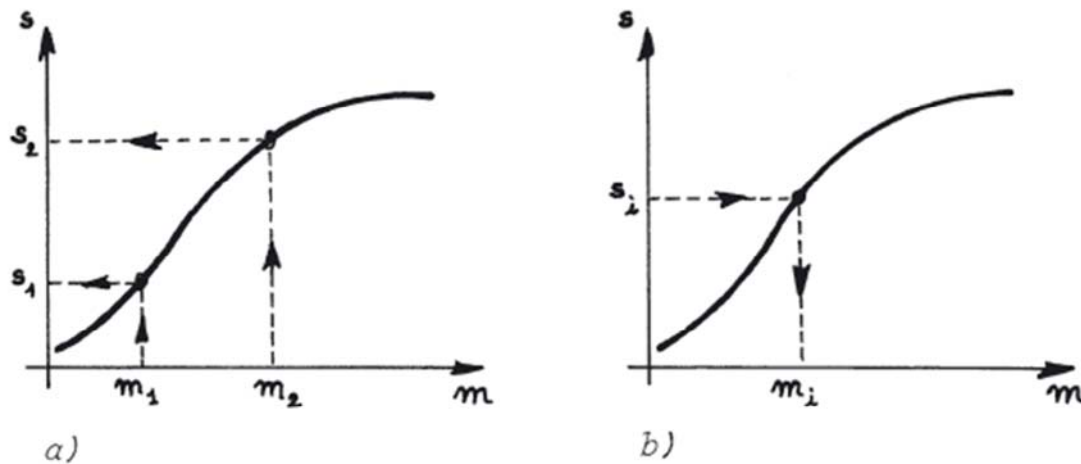


Fig I.3 : Courbe d'étalonnage d'un capteur : a) son établissement, à partir de valeurs connues du mesurande m ; b) son exploitation, à partir des valeurs mesurées de la réponse s du capteur

I.2.5 Sensibilité S du capteur :

Pour des raisons de facilité d'exploitation on s'efforce de réaliser le capteur, ou du moins de l'utiliser, en sorte qu'il établisse une relation linéaire entre les variations Δs de la grandeur de sortie et celles Δm de la grandeur d'entrée :

$$\Delta s = S \cdot \Delta m$$

S est la sensibilité du capteur.

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

- de la valeur de m (linéarité) et de sa fréquence de variation (bande passante) ;
- du temps (vieillessement) ;
- de l'action d'autres grandeurs physiques de son environnement qui ne sont pas l'objet de la mesure et que l'on désigne comme grandeurs d'influence.

I.2.6 Domaines d'utilisation

Les contraintes mécaniques, thermiques ou électriques auxquelles un capteur est soumis entraînent, lorsque leurs niveaux dépassent des seuils définis, une modification des caractéristiques du capteur telles qu'elles étaient connus par étalonnage préalable ou spécification du constructeur [2], il est donc indispensable que l'utilisateur soit averti des diverses limites d'utilisation d'un capteur et des risques qu'il encourt à les dépasser.

On peut ainsi définir quatre domaines d'utilisation :

I.2.6.1 Domaine nominal d'emploi

Il correspond aux conditions normales d'utilisation du capteur, ses limites sont les valeurs extrêmes que peuvent atteindre de façon permanente ou le mesurande ou les grandeurs physiques qui lui sont associées ou les grandeurs d'influence, et ceci, sans que soient modifiées les diverses spécifications qui caractérisent le fonctionnement du capteur.

I.2.6.2 Domaine de non-détérioration

Lorsque les valeurs ou du mesurande ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influence dépassent les limites du domaine nominal d'emploi mais restent inférieures aux bornes du domaine de non-détérioration, les caractéristiques métrologiques du capteur risquent d'être modifiées. Cette altération est cependant réversible, le capteur retrouvant ses caractéristiques spécifiées lorsque les conditions de fonctionnement redeviennent celles du domaine nominal d'emploi.

I.2.6.3 Domaine de non destruction

Lorsque les valeurs ou de mesurande ou des grandeurs physiques associées ou des grandeurs d'influences dépassent les limites de domaine de non détérioration tout en restant inférieures aux bornes du domaine de non- destruction, les caractéristiques du capteur sont modifier de façon irréversible, la réutilisation du capteur dans son domaine nominal d'emploi, nécessite donc un nouveau étalonnage.

I.2.6.4 Etendue de mesure

Elle est définie par la différence des valeurs extrêmes de la plage de mesurande dans laquelle le fonctionnement du capteur satisfait à des spécifications données. La plage du mesurande correspondant à l'étendue de mesure est souvent identique au domaine nominal d'emploi, pour ce qui est de mesurande ; il peut cependant être plus réduit ou plus étendue selon la sévérité des critères du fonctionnement retenu.

Exemple de spécification des limites d'emploi :

Tableau I. 1 : Capteur de force à jauges piézorésistif N556-1 (fabricant J.P.B). [1]

domaine	Mesurande	température
nominal	1 daN(E.M)	0 ⁰ C à 60 ⁰ C
Non détérioration	1.5 x E.M	-20 ⁰ C à 100 ⁰ C
Non destruction	3 x E.M	-50 ⁰ C à 120 ⁰ C

I.2.7 Grandeurs d'influence

Le capteur de part ses conditions d'utilisation, peut se trouver soumis non seulement à la mesurande mais aussi à d'autres grandeurs physiques dont les variations sont susceptibles d'entraîner un changement de la grandeur électrique de sortie qu'il n'est pas possible de distinguer de l'action de mesurande. Ces grandeurs physiques « parasites » auxquelles la réponse du capteur peut être sensible sont les grandeurs d'influence. Les principales grandeurs d'influence sont :

- La température qui modifie les caractéristiques électriques, mécaniques et dimensionnelles des composants du capteur.
- La pression, l'accélération et les vibrations susceptibles de créer dans certains éléments constitutifs du capteur des déformations et des contraintes qui altèrent la réponse.
- L'humidité à laquelle certaines propriétés électriques comme la constante diélectrique ou la résistivité peuvent être sensibles et risque de dégrader l'isolation électrique entre composants du capteur ou entre le capteur et son environnement.
- La tension d'alimentation amplitude et fréquence ; lorsque, comme pour le transformateur différentiel, la grandeur électrique de sortie en dépend de par le principe de capteur.

Afin de pouvoir déduire de la réponse du capteur qui correspond à la mesurande, il est nécessaire :

- De réduire l'importance des grandeurs d'influence au niveau de capteur en le protégeant par un isolement adéquat support antivibratoire...
- De stabiliser les grandeurs d'influence à des valeurs parfaitement connues et d'étalonner le capteur dans ces conditions de fonctionnement : enceinte thermostatée ou hygroskopie contrôlée, source d'alimentation régulée.
- Et enfin d'utiliser des montages qui permettent de compenser l'influence des grandeurs parasites : pont de Wheatstone avec un capteur identique placé dans une branche adjacente au capteur de mesure.

I.3 Quelques principes de capteurs à jauges d'extensométries

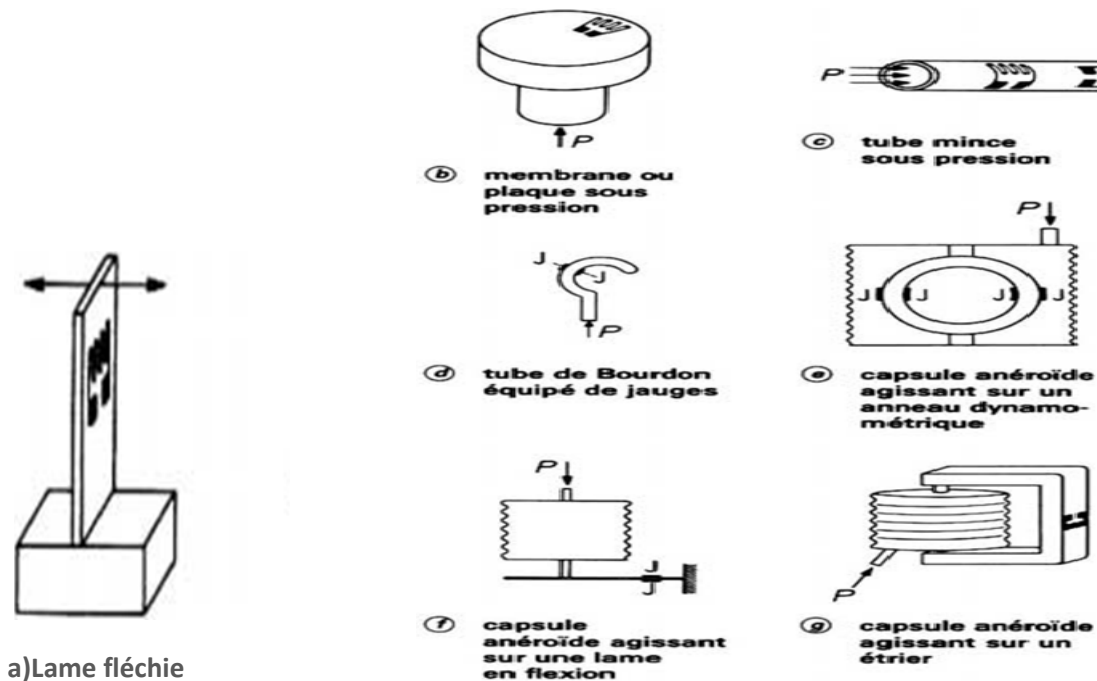


Fig I. 5 : mesure de déplacement

Fig I. 6 : mesure de pression

On voit que, par des dispositifs mécaniques particuliers, on peut, sous l'effet du phénomène physique à mesurer, provoquer la déformation d'une pièce dite corps d'épreuve (cylindre, lame fléchie, membrane, etc.)[2]. Des jauges collées sur le corps d'épreuve en détectent les déformations. Leurs variations de résistance sont liées aux variations de la grandeur physique, dont la mesure se ramène ainsi à celle d'une résistance électrique.

Outre les cas simples représentés par ces schémas (Fig I.5 ; Fig I.6), on peut imaginer des capteurs dont le corps d'épreuve détecte simultanément plusieurs paramètres. Par exemple, une même poutre peut servir à détecter des tractions, des flexions suivant deux composantes, des torsions. Par une disposition judicieuse des jauges, ces composantes sont mesurées séparément.

Exemple : le cas des dards aérodynamiques qui servent à supporter des maquettes en soufflerie ; ils sont constitués par une poutre unique qui détecte séparément les composantes des forces et des couples subis par les modèles.

Par ailleurs, des instruments différents peuvent être conçus suivant des schémas analogues. Ainsi, un capteur de vibrations mesure soit le déplacement, soit l'accélération, suivant que la fréquence à laquelle on l'utilise est supérieure ou inférieure à la fréquence propre fondamentale de résonance. On obtient l'un ou l'autre de ces deux types de capteurs par le choix des dimensions et des masses des divers composants mécaniques qui le constituent.

Ces différents capteurs peuvent être statiques ou dynamiques, suivant qu'ils servent à la détection de grandeurs lentement ou rapidement variables. Les limitations en fréquence ne

dépendent que des inerties de la partie mécanique, car les jauges elles-mêmes ne sont limitées que par leurs dimensions (par exemple, 100000 Hz pour des jauges de l'ordre du millimètre). Évidemment, l'instrumentation électronique disposée en aval du capteur est également à considérer de ce point de vue.

I.4 Schéma électrique des capteurs

a. Principe du montage en pont

Soit un circuit constitué par quatre résistances égales R_1, R_2, R_3, R_4 montées en pont (Fig I. 7). Si nous l'alimentons par une source de courant P suivant une diagonale, nous avons à l'équilibre une tension nulle entre B et D . La variation de l'une quelconque des résistances fait apparaître une tension V_s entre B et D qui peut être mesurée par un instrument G [2]. Pour de très faibles variations de résistance (de l'ordre de quelques microohms dans le cas des jauges), la tension de sortie V_s est pratiquement proportionnelle aux variations relatives de résistance $\Delta R/R$ de chacune des jauges. Négligeant les termes d'ordre supérieur, elle vaut :

$$V_s = \frac{Ve}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{I.1}$$

Avec Ve force électromotrice de la source.

Les signes alternés $+$ et $-$ de cette équation caractérisent la propriété fondamentale des ponts : deux résistances adjacentes agissent en sens inverse, cependant que deux résistances opposées agissent dans le même sens.

Un capteur est constitué par un tel pont dont une, deux, ou quatre des résistances sont des jauges électriques collées sur le corps d'épreuve, les autres étant des résistances fixes. Le cas le plus fréquent est celui de quatre jauges. D'après la règle des signes I.1,

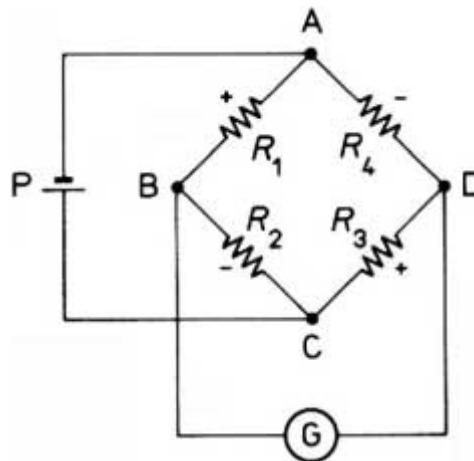


Fig I.7: Montage en pont de Wheatstone

On voit qu'il est possible d'ajouter ou de retrancher les effets séparés des jauges. C'est ainsi que sont éliminés les phénomènes parasites au profit de la grandeur recherchée.

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

- on peut la mesurer directement à l'aide d'un millivoltmètre ;
- on peut la comparer, par méthode d'opposition, à une tension de référence ;

- on peut l'utiliser comme indication de déséquilibre pour rétablir la symétrie par variation de potentiomètres montés en parallèle sur les jauges.

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

Lorsque les quatre bras du pont ne sont pas tous occupés par des jauges, on peut théoriquement les disposer à l'extérieur du capteur.

Toutefois, comme l'on mesure de très faibles variations de résistance, tous les circuits qui constituent le carré ABCD du pont doivent être très stables. Une instabilité est très perturbatrice dans ce carré, alors qu'elle a moins d'importance sur les circuits extérieurs reliant les diagonales du pont à P et à G. C'est pourquoi, sauf cas de force majeure, il est préférable d'inclure les quatre branches du pont dans le corps du capteur.

La relation I.1 est une approximation ne comportant que des ΔR du premier degré, ceux de degrés supérieurs ayant été négligés. De ce fait, il s'agit d'une fonction qui ne peut être considérée comme linéaire que pour de faibles variations ($\Delta R/R$ de l'ordre de 10^{-6}). Pour assurer une meilleure linéarité dans le cas de variations importantes, on alimente le pont non pas par une tension constante mais par une intensité constante. Le choix entre ces solutions dépend de l'étendue des variations de la grandeur mesurée et de la précision requise.

Nous retiendrons que les caractéristiques d'un capteur donné ne sont pas toutes intrinsèques mais dépendent aussi des instruments qui, avec lui, constituent la chaîne de mesure.

b. Disposition des jauges

D'après la relation (1), le signal sera maximal si l'on dispose judicieusement les jauges pour obtenir des $\Delta R/R$ les plus importants possible, les signes + et - s'additionnant algébriquement.

- Par exemple, une poutre ou une lame de section symétrique soumise à une flexion pure subit des déformations égales et de signes contraires en des points symétriques par rapport à la ligne neutre. Ainsi, les deux jauges JA et JB de la figure I. 8a subissent, sous l'effet du couple C de flexion pure, des déformations égales et de signes contraires, alors que, sous l'action d'une traction pure F , elles subissent des déformations égales et de mêmes signes.

En les groupant suivant la figure I. 8b, on obtient F à l'exclusion de C , cependant que par le montage de la figure I. 8c on mesure C à l'exclusion de F . Dans ce dernier cas, on peut même doubler la sensibilité avec deux jauges supplémentaires respectivement juxtaposées à JA et JB et montées dans le pont, chacune en opposition à celle qui donne le même signe qu'elle.

- Citons un montage qui, par compensation des signes, permet d'éliminer une incertitude. Soit une poutre fléchie par une force F dont le point d'appui est mal défini (figure I. 8d). On vérifie facilement, par le calcul des moments fléchissant avec deux sections occupées par les jauges, que l'information obtenue est indépendante de la distance x de la force F . Ce montage est d'autant plus sensible que la distance a est plus grande. Il convient de veiller à ce que les jauges J1 et J3 d'une part, J2 et J4 d'autre part, soient bien situées sur des sections qui vérifient l'hypothèse des poutres, c'est-à-dire la symétrie des déformations. Ce montage ne dépend que de la seule composante verticale de la force F . Cette disposition, rendant la mesure indépendante du point d'application de la force, présente une analogie avec le dispositif mécanique de la balance de Roberval.

Il arrive ainsi fréquemment que, par une disposition étudiée des jauges, on puisse résoudre une difficulté plus simplement par des montages électriques que par des réalisations mécaniques équivalentes.

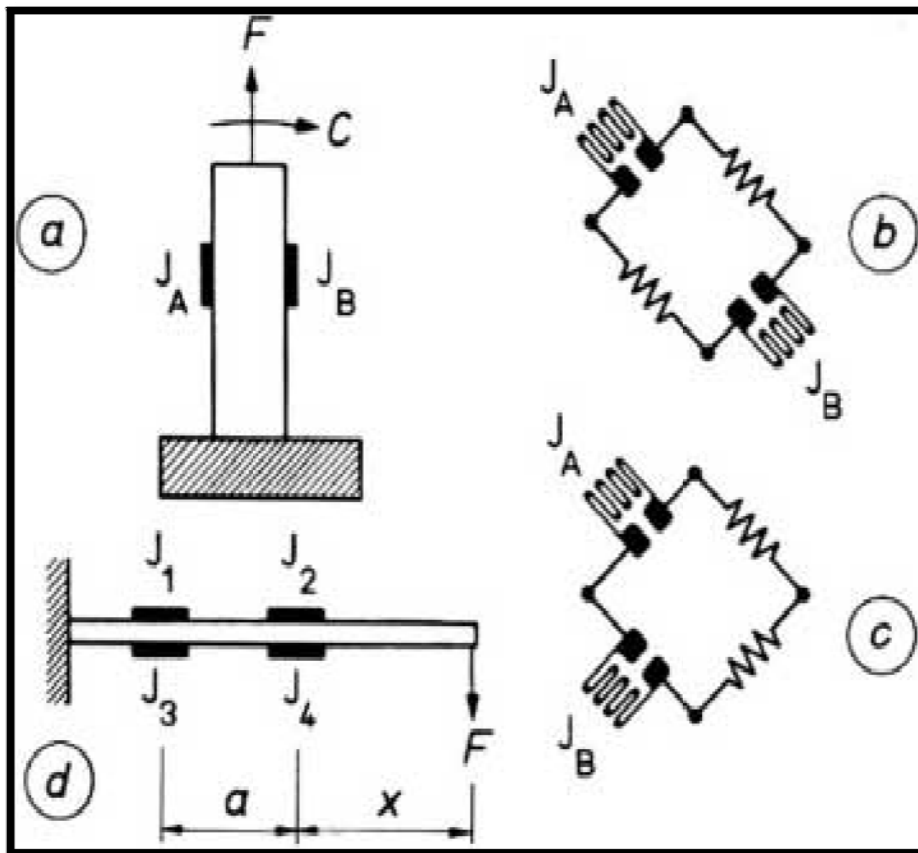


Fig I. 8 : Disposition des jauges sur une poutre soumise à une flexion pure

I.5 Conception mécanique des capteurs

I.5.1 Calcul des capteurs

Le calcul d'un capteur, ou plus précisément de son corps d'épreuve, se ramène généralement à des cas simples de la résistance des matériaux (traction, flexion, torsion de poutres, de plaques, de membranes). Le tableau I.2 donne des formules destinées à simplifier le calcul des corps d'épreuve [2]. Ayant choisi l'emplacement des jauges, on peut calculer, pour chacune d'elles, la déformation (ϵ) (avec son signe). Il lui correspond une variation de résistance (avec son signe) :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\epsilon \quad \text{I.2}$$

Avec K facteur de jauge, généralement de l'ordre de 2.

En appliquant la formule I.1, on obtient le $\Delta R/R$ total d'où, éventuellement, le signal V_s/V_e (en mV/V).

Il ne faut pas trop s'étonner si les résultats expérimentaux diffèrent quelque peu des calculs, car toutes les formules du tableau I. 2 sont données par des théories simples de la résistance des matériaux, liées à des cas idéalisés. Par exemple, les lames fléchies peuvent être considérées plus ou moins comme plaques ou comme poutres, cependant que les plaques minces encastrées sont plus ou moins membranes. C'est pourquoi ces calculs, utiles pour l'étude d'un projet de capteur, ne sont pas utilisés pour son étalonnage. Chaque capteur doit être étalonné par application de valeurs connues de la grandeur à la mesure de laquelle il est destiné.

On notera en particulier (tableau I. 2) l'allure des déformations d'une plaque circulaire encastrée, qui justifie la direction imposée aux fils des jauges : radiale vers les bords et tangentielle vers le centre. La formule qui donne la fréquence propre des plaques circulaires est utile pour connaître l'influence des divers paramètres, mais il faut se garder d'y voir un moyen de calcul précis. Dans la pratique, une plaque est plus ou moins membrane et réciproquement. De plus, la nature exacte de l'encastrement a son importance. Pour toutes ces raisons, le calcul théorique des fréquences propres ne donne que des valeurs vaguement approchées de celles de l'expérience.

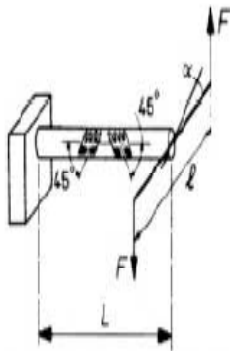
Outre le calcul des déformations aux emplacements des jauges, il faut également calculer les contraintes maximales, par exemple sur une lame encastrée, à la hauteur de l'encastrement. Enfin, il faut parfois tenir compte du déplacement du capteur. C'est ainsi que, sur certains dynamomètres, on peut être dans l'obligation de limiter le déplacement du point d'appui. Ces calculs se font par les formules du (tableau I. 2) qui donnent les flèches.

En raison du développement de dispositifs électroniques de pesage, on utilise aussi des formes de corps d'épreuve donnant des signaux indépendants du point d'appui de la charge. C'est, en somme, une transposition de la propriété bien connue de la balance de Roberval, à savoir que les mesures de poids sont indépendantes de la position sur les plateaux de la marchandise ou des masses de référence.

Ces corps d'épreuve sont utilisés pour le pesage, mais aussi pour d'autres types de mesures. Cette indépendance par rapport au point d'appui exact de la force simplifie la conception mécanique des capteurs et l'usinage du corps d'épreuve, lorsque l'on veut obtenir une certaine précision.

Tableau I.2 : Formules utiles pour le calcul des capteurs [2]

	LAME EN TRACTION	$\varepsilon_1 = \frac{F}{E a t}$ $\varepsilon_2 = \frac{-\nu F}{E a t}$	<ul style="list-style-type: none"> a largeur ε_1 indication jauge longitudinale ε_2 indication jauge transversale F force appliquée t épaisseur 	
	LAME EN FLEXION	$\varepsilon_1 = \frac{6 F l}{E a t^2} = \frac{3 t l}{2 L^3} f$ $\varepsilon_2 = \frac{-6 \nu F l}{E a t^2} = \frac{-3 \nu t l}{2 L^3} f$ $f = \frac{F L^3}{3 E J} = \frac{4 F L^3}{E a t^3}$ $N = 0,55 \frac{1}{L^2} \sqrt{\frac{E J}{\rho S}} = 0,16 \frac{t}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$	<ul style="list-style-type: none"> a largeur ε_1 indication jauge longitudinale ε_2 indication jauge transversale F force appliquée f flèche (déplacement de F) J moment d'inertie de la section par rapport à la ligne neutre L distance force-encastrement l distance force-jauge N première fréquence propre S section t épaisseur 	
	CYLINDRE SOUS PRESSION	$\varepsilon_1 = \frac{P R}{E t} \left(\frac{L}{L + 2 R} - \frac{\nu}{2} \right)$ $\varepsilon_2 = \frac{P R}{E t} \left(\frac{1}{2} - \nu \frac{L}{L + 2 R} \right)$	<ul style="list-style-type: none"> ε_1 indication jauge latérale ε_2 indication jauge longitudinale L longueur P pression appliquée R rayon t épaisseur (faible devant R) 	
		Pour une longueur infinie :	$\varepsilon_1 = \frac{0,85 P R}{E t}$ $\varepsilon_2 = \frac{0,20 P R}{E t}$	



ARBRE EN TORSION

$$\varepsilon_1 = -\varepsilon_2 = \frac{M}{\pi G R^3} = \frac{R}{2L} \alpha$$

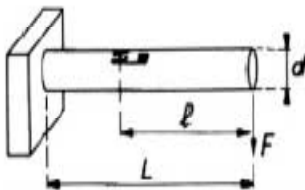
$$\alpha = \frac{2ML}{\pi G R^4}$$

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

avec

 ε_1 indication de l'une des jauges ε_2 indication de l'autre jauge L longueur totale de l'arbre $M = F\ell$ moment appliqué R rayon de l'arbre α angle de rotation (en radians)

La distance des jauges n'intervient pas.



LAME CYLINDRIQUE EN FLEXION

$$\varepsilon_1 = \frac{4F\ell}{\pi E r^3} = \frac{3\ell r}{L^3} f$$

$$\varepsilon_2 = \frac{-4\nu F\ell}{\pi E r^3} = \frac{-3\nu \ell r}{L^3} f$$

$$f = \frac{4FL^3}{3\pi E r^4}$$

$$N = 0,56 \frac{r}{L^2} \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

 $d = 2r$ diamètre ε_1 indication jauge longitudinale ε_2 indication jauge transversale F force appliquée f flèche (déplacement de F) ℓ distance force-jauge L distance force encastrement N première fréquence propre

(1) Notations communes :

 E module d'élasticité ; ρ masse volumique ; ν coefficient de Poisson ; ε déformations (dilatations).

I.5.2 Métal du corps d'épreuve

• Déformations appliquées

La pièce fondamentale d'un capteur est le corps d'épreuve qui subit les déformations et sur lequel les jauges sont collées. La tendance est d'en obtenir une information électrique de grande amplitude donc, d'après les formules I.1 et I.2, d'avoir des grandes déformations. Il faut cependant tenir compte des performances recherchées. Avec de grandes déformations, on risque des ruptures de fatigue, des déformations permanentes, des non-linéarités, qui altèrent les performances du capteur. On sait que la limite élastique d'un métal ne correspond qu'à une limite conventionnelle, par exemple 0,2 %. En conséquence, le retour au zéro d'un capteur dépend des déformations maximales appliquées.

Suivant les caractéristiques exigées, on ne devra faire travailler le métal qu'à 1/5 ou même 1/10 de la limite élastique à 0,2 %. Un acier dont la limite élastique est, par exemple, de 1 000 MPa ne sera utilisé que jusqu'à 100 MPa. De plus, la linéarité du capteur dépend de la propre linéarité de la courbe contrainte-déformation du métal.

• Phénomènes thermiques

Le coefficient de dilatation importe relativement peu, pourvu qu'il soit homogène, du fait que, par symétrie, les montages sont généralement autocompensés et qu'il existe des jauges autocompensées pour les différents alliages (acier, bronze, aluminium).

Un autre phénomène thermique est la variation du module d'élasticité avec la température (tableau I. 3) :

Tableau I.3 : Exemple de métaux pour corps d'épreuve : [2]

Tableau 3 - Exemples de métaux pour corps d'épreuve			
Caractéristiques	Aciers au chrome-silicium-molybdène désignation AFNOR 45 SCD 6	Bronze au béryllium Be 2 %	Alliages d'aluminium 7049A (A-Z8GU)
Masse volumique.....(en 10 ³ kg/m ³)	7,80	8,25	2,80
Coefficient de dilatation.....(en 10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	13	17	23,5
Module d'élasticité E.....(MPa)	220 000	130 000	72 000
Variations ΔE/E.....(en 10 ⁻⁶ °C ⁻¹)	- 260	- 380	- 580
Coefficient de Poisson ν.....	0,285	0,34	0,34
Limite élastique à 0,2 %.....(MPa)	1 450	800	450
Déformations à la limite élastique.....(μm/m)	6 600	4 700	6 400
Traitements thermiques garantissant les caractéristiques ci-dessus (indications approximatives : pour les détails du traitement, s'informer auprès du producteur)	Trempe 890 °C à l'huile Revenu 2 h à 450 °C	Trempe 780 °C à l'eau Revenu 2 h à 320 °C	Trempe 450 °C à l'eau 30 à 50 °C Revenu 8 h à 130-140 °C

• Métaux choisis pour le corps d'épreuve

Parmi les métaux les plus recommandables pour la réalisation de corps d'épreuves, citons :

- les aciers mangano-siliceux (aciers à ressorts à haute limite élastique) ;
- le bronze au béryllium.

Encore que certaines réalisations aient pu donner satisfaction dans un domaine de précision limité, les alliages d'aluminium, malgré leurs grandes déformations, donnent de moins bons résultats que l'acier ou le bronze. De l'avis des spécialistes, les aciers à haute limite élastique et le bronze au béryllium viennent en tête de leurs préférences et, à quelques détails près, à égalité. Les résultats sont analogues. Le bronze est plus cher et d'usinage plus délicat que l'acier. En revanche, sa meilleure conductivité thermique (environ quatre fois plus grande que celle de l'acier) peut parfois être un avantage.

Le tableau I. 3 donne les caractéristiques des métaux considérés comme les plus satisfaisants pour la réalisation de capteurs, dans chacune des trois catégories : aciers, bronzes, alliages d'aluminium.

Il s'agit d'exemples et non d'une liste limitative. Ainsi, pour les capteurs travaillant à chaud, de bons résultats ont été obtenus avec l'acier à outils 45 CDV 6.

Certains aciers ont des limites élastiques encore supérieures, tels les aciers à outils au tungstène-molybdène (par exemple Z 85 WDCV 06-05-04-02). En contrepartie, ils sont d'un prix plus élevé et d'un traitement thermique plus délicat.

Quel que soit le métal utilisé, précisons bien que les traitements thermiques recommandés ne sont pas facultatifs. Ce sont des impératifs rigoureux qui seuls permettent d'atteindre les performances promises. Entre le traitement thermique et l'usinage définitif, un traitement au froid, par immersion dans l'azote liquide, améliore encore sensiblement les propriétés élastiques.

I.6 Choix des jauges pour les capteurs

Le métal des jauges doit être choisi en fonction de divers critères tels que, entre autres :

- le domaine de température d'emploi : par exemple 200 °C maximum pour le *constantan*, 300 °C maximum pour le *Nichrome*, etc. ;

- la dilatation du corps d'épreuve (les jauges sont autocompensées, par exemple, pour l'acier, le bronze, etc.) ;

- la variation du facteur de jauge K avec la température pour compenser la variation du module d'élasticité E du corps d'épreuve ;

- la limite élastique ou la limite de fatigue du corps d'épreuve.

Les jauges d'un même métal constituent une famille. Les producteurs présentent diverses familles aux propriétés particulières, ainsi que les produits de collage et de protection recommandés pour les différentes applications.

En ce qui concerne les géométries, celles-ci sont très nombreuses, car les jauges sont fabriquées par photogravure, et il suffit d'en faire un dessin pour le reproduire indéfiniment. Les catalogues comprennent un nombre considérable de formes. Quelques géométries sont représentées en figure I.9. Outre la forme classique (figure I. 9a), certaines ont des sorties latérales (figure I. 9b), ce qui facilite les câblages. Il en est de même avec les jauges doubles (figure I. 9c).

Pour les mesures de couples de torsion, les jauges sont constituées de brins actifs orientés à $\pm 45^\circ$ (figure I. 9d). Pour les pressions, quatre jauges sont montées sur un même support circulaire, les brins étant radiaux sur deux d'entre elles et tangentiels pour les deux autres (figure I. 9e). Cette disposition donne le signal maximal d'après la théorie des plaques circulaires (tableau I. 3).

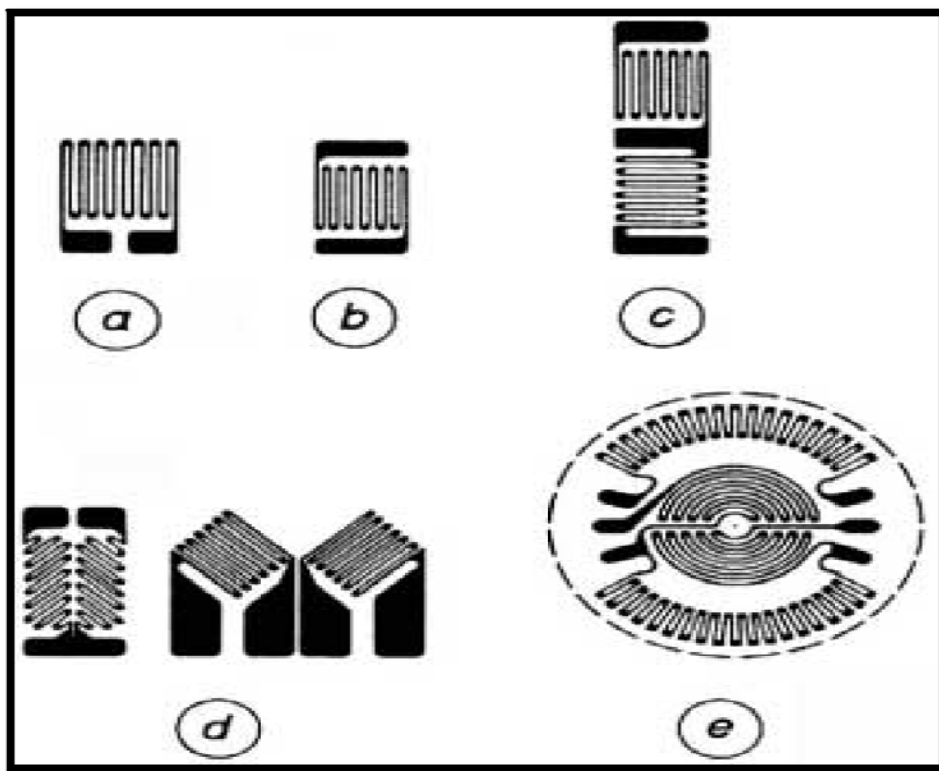


Figure I. 9: Différentes formes de jauges

A large orange scroll graphic with a white border and decorative scroll ends on the left and right sides. The text is centered within the scroll.

Chapitre II

Les jauges d'extensométries

CHAPITRE II : Les jauges d'extensométries

II.1 Principe des jauges

Sous la forme la plus simple, une jauge est constituée d'un très fin fil (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la Figure II.1. Les brins de fil constituant la jauge étant principalement alignés suivant la direction de mesure, on peut admettre que le fil subit les mêmes déformations que la surface sur laquelle la jauge est collée [8].

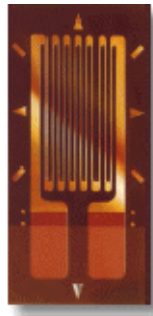


Fig II.1 : Jauge de contrainte

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

$$R = \rho \frac{L}{s} \quad \text{II.1}$$

Où R est la résistance électrique

ρ la résistivité du matériau

L la longueur du fil

s la section du fil

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

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - \frac{\Delta S}{S} \quad \text{II.2}$$

qui peut se réécrire :

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \text{II.3}$$

Où K est appelé le facteur de jauge (environ 2 pour le constantan).

Les fabricants proposent des jauges de différentes tailles et de différentes formes en fonction des travaux d'analyse de contraintes. On aura donc des jauges simples pour l'analyse dans le sens de la déformation connue, des rosettes à 2 jauges (l'une pour le sens principal, l'autre pour la mesure du coefficient de Poisson ou encore pour la mesure de torsion), des rosettes à 3 jauges (45° ou 120°) lorsqu'on ignore les directions principales.

II.2 Principe de mesure

La méthode la plus précise pour mesurer une variation de résistance consiste à placer la jauge dans un pont de Wheatstone (Figure II.2). Lorsqu'un pont est constitué de 4 résistances de valeur égale et alimenté par une source de tension (E) constante aux points C et D, on obtient par symétrie, une différence de potentiel nulle entre les points A et B. Si la résistance R_1 varie légèrement, ce déséquilibre est mesuré par le galvanomètre (e_0). On vérifiera facilement que R_1 et R_3 agissent dans le sens positif (augmentation de la résistance) tandis que R_2 et R_4 agissent dans le sens contraire

$$\frac{e_0}{E} = \frac{R_1}{R_1+R_2} - \frac{R_4}{R_4+R_3} \quad \text{II.4}$$

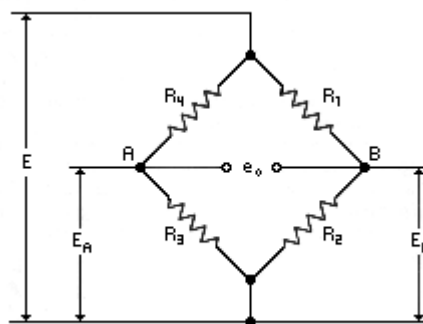


Fig II.2: Pont de Wheatstone.

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

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...).

II.3 Effet piézorésistif des métaux

La résistivité de la plupart des métaux décroît quand la pression à laquelle ils sont soumis augmente. En fait c'est la diminution du volume, et donc des distances inter-atomiques, entraînée par la pression qui est à l'origine de la décroissance de ρ .

En effet, la résistivité d'un métal est due en particulier, à la diffusion qui est d'autant plus élevée que l'amplitude des oscillations des atomes est grande. Une réduction de la maille du réseau cristallin, en rapprochant les atomes, entraîne un accroissement de leurs forces de liaisons et par conséquent une diminution de l'amplitude de leurs oscillations. La probabilité de diffusion des électrons libres diminue, il en est de même de la résistivité.

II.4 Matériaux et réalisation

Les matériaux utilisés sont généralement des alliages à base de nickel ; le tableau ci-dessous indique la composition et le facteur de jauge d'alliages couramment employés.

Tableau II.1 : Caractéristique d'alliages pour jauges métalliques [1] :

alliage	composition	Facteur de jauge
Constantan	45% Ni, 55% Cu	2.1
Iso-élastique	52%Fe, 36% Ni, 8% Cr, 4%(Mn, Mo)	3.5
Karma	74% Ni, 20% Cr, 3% Cu, 3% Fe	2.1
Nichrome v	80% Ni, 20% Cr	2.5
Platine-Tungstène	92% Pt, 8% W	4.1

Les différents alliages se distinguent par leurs propriétés thermiques (coefficient de dilatation et de résistance) ainsi que par leur stabilité à haute température. C'est ainsi que la sensibilité thermique élevée des alliages iso-élastique et Nichrome v les rend impropres aux mesures statiques.

II.5 Quelques types de jauges

Il existe deux familles de capteurs à jauges :

- 1— les capteurs à jauges de contrainte piézorésistives, dites aussi à semi-conducteurs.
- 2— les capteurs à jauges de contrainte métalliques, à fils ou à trame pelliculaire, appelées jauges extensométriques ;

Toutes les jauges sont caractérisées par leur coefficient ou facteur de jauge K qui fait correspondre une variation de résistance $\frac{\Delta R}{R}$ proportionnellement à une variation d'allongement $\frac{\Delta L}{L}$:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \frac{\Delta L}{L} \quad \text{II.5}$$

Ce coefficient K caractérise donc la sensibilité de jauge [1].

II.5.1 Les jauges à semi-conducteurs

Sont de 50 à 100 fois plus sensibles que les jauges extensométriques. En effet, le coefficient de jauge K peut atteindre 200 pour un monocristal de silicium dopé par exemple, au lieu de 2 à 4 pour une jauge métallique. Elles sont en général de très petite taille (longueur active inférieure au mm) et de plus grande raideur. Cette différence de propriété est exploitée en fonction des applications, les capteurs piézorésistifs (fig. II.3), étant par exemple, mieux adaptés que les capteurs extensométriques pour la mesure d'efforts dynamiques à des

fréquences allant jusqu'à quelques dizaines de kilohertz. Autre intérêt de cette plus grande sensibilité : le signal de sortie est d'un niveau plus élevé, ce qui facilite son cheminement lorsque la mesure est effectuée en milieu perturbé.

Mais le domaine d'emploi des jauges piézorésistives est relativement limité (50 à +120°C environ) et surtout l'erreur de linéarité est fonction de la plage de travail : plus elle est large, moins la mesure est précise. Ainsi, pour une plage compensée de 0 à 100°C, l'erreur de linéarité est largement inférieure à $\pm 0,1$ %, alors qu'elle peut être de $\pm 0,4$ % pour une plage de -50 à +120°C.

Par ailleurs, les caractéristiques métrologiques du capteur restent liées non seulement au comportement du corps d'épreuve lui-même (pièce métallique «vivante»), mais aussi à la qualité des jauges et de leur collage, en raison du phénomène d'hystérésis et des problèmes de fluage sous charge des jauges et de relaxation des colles. Les erreurs de mesure qui peuvent en résulter ne doivent être ni ignorées ni négligées, dès qu'il s'agit d'exploitations fines ou de mesures sous un effort appliqué sur une longue durée.

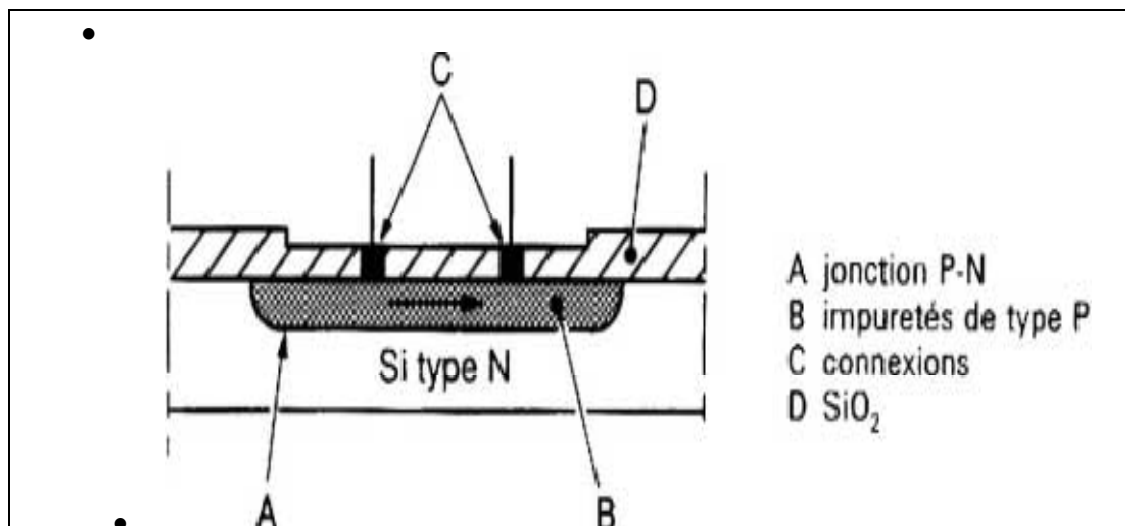


Fig II.3 : Jauge piézorésistive diffusée

II.5.2 Les jauges résistives

Avec les jauges résistives on exploite l'observation que la résistivité de la plupart des métaux augmente lorsqu'on les met sous traction. Un fil mince collé sur un corps d'épreuve suit son allongement et sa résistance électrique est donc une mesure pour sa déformation [9].

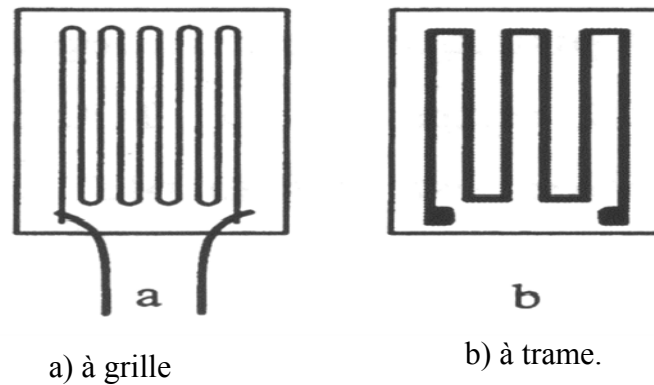


Fig II.4 : Jauges résistives

Dans la pratique on utilise des jauges préfabriquées. Elles sont constituées d'un fil métallique (habituellement un alliage Cu-Ni ou Ni-Cr) d'un diamètre de 10-20 μ m disposé en forme de grille (fig. II.4.a). Cette grille, partie active de la jauge, est placée entre deux couches minces en matière plastique. Cet ensemble est collé avec un adhésif spécial sur l'éprouvette de manière à ce que l'allongement de l'éprouvette puisse se transmettre complètement à la grille de mesure.

Un autre type de jauge est la jauge à trame pelliculaire dont la grille de mesure est fabriquée à partir d'une feuille métallique de 3 à 5 mm d'épaisseur, entièrement noyée dans un support de polyamide (fig. II.4.b). L'élément actif peut aussi être fait en un matériau semi-conducteur.

La résistance électrique R d'un fil dépend de sa longueur L , de sa section et de sa résistivité électrique ρ (d = diamètre).

$$R = \rho \frac{L}{a} = 4 \frac{\rho L}{\pi d^2} \quad \text{II.6}$$

Lorsque ce fil est soumis à un allongement élastique, ses dimensions géométriques et sa résistivité changent. Comme il ne s'agit que de petites variations, nous pouvons exprimer la variation ΔR de sa résistance par les variations relatives de ses dimensions et de sa résistivité.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta d}{d} \quad \text{II.7}$$

Des mesures sous haute pression effectuées par Bridgeman ont montrés que la variation de la résistivité $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ des métaux augmente linéairement avec le changement du volume $\frac{\Delta V}{V}$ du conducteur : c'est l'effet piézorésistif que l'on exprime par la relation :

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = c \frac{\Delta V}{V} \quad \text{II.8}$$

c est la constante de Bridgeman.

En utilisant la déformation longitudinale $\varepsilon_l = \frac{\Delta L}{L}$ et la déformation transversale :

$\varepsilon_t = \frac{\Delta d}{d} = -\nu \varepsilon_l$ du fil constituant la jauge, nous pouvons exprimer la variation de la section et du volume par déformation longitudinale ε_l et le coefficient de Poisson ν .

$$\frac{\Delta S}{S} = -2\nu \varepsilon_l \quad \text{et} \quad \frac{\Delta V}{V} = (1 - 2\nu)\varepsilon_l \quad \text{II.9}$$

En substituant (II.8) et (II.9) dans l'équation (II.7) la variation de la résistance du fil soumis à la déformation ε_l s'écrit :

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon_l \quad \text{avec} \quad K=1+c+2\nu(1-c) \quad \text{II.10}$$

Le facteur de jauge k est le coefficient de proportionnalité entre $\frac{\Delta R}{R}$ et $\frac{\Delta L}{L}$. 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. ($\rho = 49 \mu\Omega\text{cm}$ et $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT} = \pm 40 \text{ppm/K}$ 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 %.

II.6 Caractéristiques principales des jauges métalliques

II.6.1 Résistance

La résistivité des alliages utilisés doit être suffisamment élevée pour que les valeurs de résistance recherchées (100 à 5000 Ω) puissent être obtenues sans longueur de fil excessive, aboutissant à des dimensions exagérées de la jauges et sans réduction trop importante de la section qui imposerait une diminution du courant de mesure et donc de la sensibilité.

II.6.2 La précision des jauges

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

Les facteurs les plus importants limitant la précision des mesures sont :

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

II.6.3 Facteur de jauge

Les valeurs les plus courantes de facteur de jauge sont voisines de $2 \pm 0,1$ à l'exception de l'alliage Iso-élastique et de platine-tungstène qui ont un facteur de jauge respectivement voisine de 3.5.

Tant que la résistance de fil de la jauge reste inférieure à sa limite élastique, le facteur de jauge est constant assurant une excellente linéarité entre variation de résistance et déformation.

Lorsque le fil est déformé au-delà de sa limite élastique $\left| \frac{\Delta L}{L} \right|$ de 0.5% à 2% selon les matériaux, le coefficient de poisson devient égale à 0.5 et le facteur de jauge très voisine de 2.

Pour l'alliage Iso-élastique $K = 3.5$ pour $\left| \frac{\Delta L}{L} \right|$ inférieure à 0.65% au-delà de cette limite $k = 2$.

Les alliages tels que le ferry et le Constantan dont le facteur de jauge K est déjà voisine de 2 ne subissent pratiquement pas de variation de K lorsqu'on dépasse leur limite élastique, cependant il en résulte dans ce cas une déformation permanente du fil de jauge et une modification définitive de sa résistance [2].

• Influence de la température

La variation thermique de K est généralement faible sauf pour l'alliage Iso-élastique, linéaire dans une gamme étendue de température -100°C à 300°C ;

$$K(T) = K_0 [1 + \alpha_K (T - T_0)] \quad \text{II.11}$$

Où K_0 est le coefficient de jauge, à la température de référence T_0 qui est généralement de 25°C .

Ordre de grandeur :

Nichrome v : $\alpha_K = -0.04\% / ^{\circ}\text{C}$; Constantan : $\alpha_K = +0.01\% / ^{\circ}\text{C}$; Karma : $\alpha_K = -0.01\% / ^{\circ}\text{C}$.

II.7 Principaux facteurs influant sur le comportement des jauges

II.7.1 Influence de la température

Les dilatations ou les contraintes dues au changement de température ont une influence sur l'élément sensible de la jauge dont la résistance électrique variera elle aussi et indiquera l'existence des déformations dues à la température.

Pour éliminer l'influence de la température sur la mesure de la déformation, on utilise, soit des jauges compensatrices de température, dites jauges passives collées sur une structure

non sollicitée de même nature de celle à étudier et placées de manière qu'elle se trouvent dans les mêmes conditions de température, soit des jauges dites autocompensées dont l'élément sensible est composé de deux types d'alliages qui ont la propriété de réagir aux variations de température de telle façon que son effet se trouve annulé, elles transmettent seulement les signaux dus aux déformations mécaniques.

II.7.2 Influence de l'humidité

En plus de la corrosion que l'humidité peut produire sur l'élément sensible de la jauge, elle provoque une diminution des dimensions de papier support donc une perte d'adhérence entre la jauge et la pièce. Les résultats seront grossiers.

Pour y remédier, il est indispensable de protéger les jauges avec des protections étanches. Plusieurs solutions ont été apportées à cet effet. Nous citerons à titre d'exemple le revêtement d'époxy, des caches au mastic.

II.7.3 Déformation apparente

Une variation de température provoque en l'absence de toutes contraintes mécaniques une variation de résistance :

$$\frac{\Delta R}{R} = \beta_{j/s} \Delta T \quad \text{II.12}$$

On définit la déformation apparente comme étant celle qui provoquerait, dans des conditions isotherme, la même variation de résistance :

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\text{app}} = \frac{\beta_{j/s}}{K} \Delta T \quad \text{II.13}$$

on a ainsi, pour une jauge de karma collée sur l'acier :

$$\beta_{j/s} = 2,2 \cdot 10^{-2} / ^\circ\text{C} \quad \text{soit} \quad \left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{\text{app}} = 1 \cdot 10^{-5} / ^\circ\text{C}$$

II.7.4 Jauges auto-compensées en température

Par un choix convenable des alliages constituant la jauge ainsi que des traitements thermiques qu'ils ont subis, il est possible de minimiser pour un matériau de structure donnée le coefficient $\beta_{j/s}$ sur une plage plus ou moins étendue de température. Les jauges ainsi obtenues sont dites auto-compensées en température, leur coefficient $\beta_{j/s}$ demeure inférieure à $1,5 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ dans le domaine de température étendu (-20°C à 200°C par exemple).

Dans la figure ci-dessous (Fig II.5) on retrouve les déformations apparentes de jauges selon qu'elles soient compensées ou non en température. Il faut noter que les jauges destinées à la seule mesure de déformation dynamiques ne nécessitent pas de compensation de température puisque les variations correspondantes sont en général lentes par rapport à la fréquence des déformations.

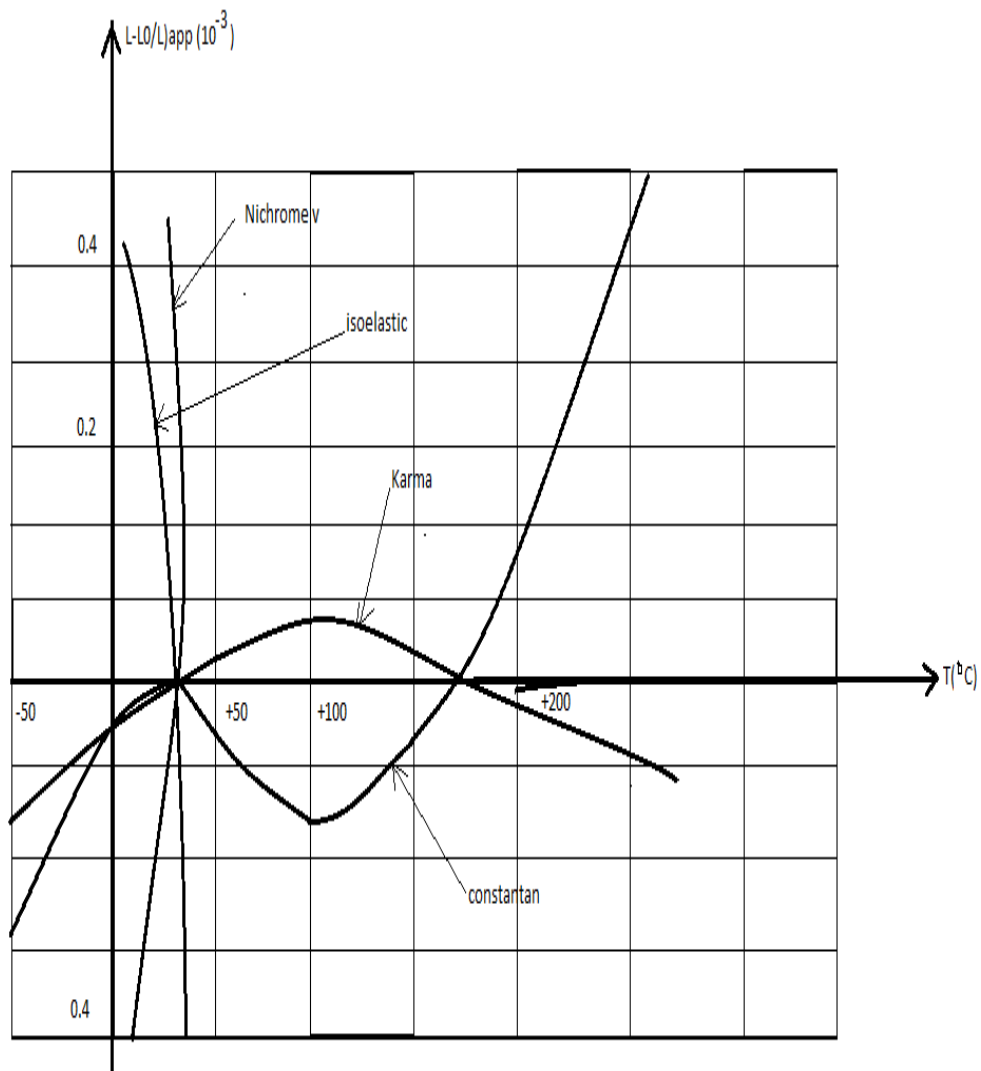


Fig II.5 : déformation apparente pour différents alliages.
La structure étant en acier.

II.8 Choix d'une jauge

En consultant un catalogue pour jauges d'extensométries, afin de choisir le modèle répondant le plus à ces besoins, l'utilisateur se trouve embarrassé, vu, le nombre très élevé de combinaisons entre le type de support, de métaux, les compensations et les options caractérisant les jauges de contraintes (environ 40.000 combinaisons).

Pour lui faciliter la tâche les laboratoires VICHAY micro-mesures, ont établi un classement en considérant successivement différentes conditions d'emploi [3]:

II.8.1 Choix d'une série

On choisit une série, selon l'environnement d'emploi, principalement la température, l'allongement maximal, la fatigue subie du fait des élongations et du nombre de cycles.

On définit une série ou famille de jauges, comme étant l'ensemble des jauges qui sont constituées par les mêmes matériaux et qui de ce fait sont utilisables dans les mêmes conditions d'environnement et installées suivant les mêmes procédures.

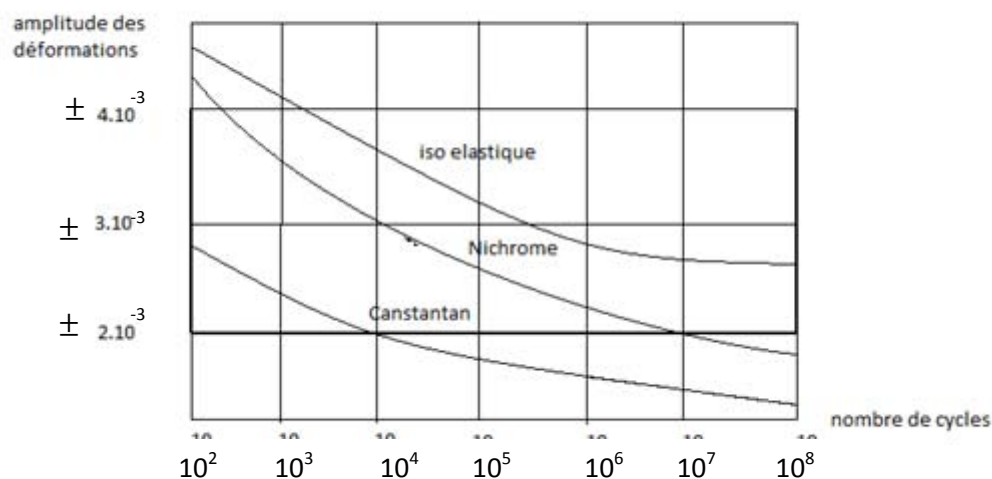


Fig II.6 : Amplitude des déformations en fonction du nombre de cycles.

Remarque : On désigne par type de jauges, celles qui en plus d'être de même famille, ont même géométrie et mêmes dimensions.

II.8.2 Choix d'une option

Ce choix est dicté par les conditions de mise en œuvre, principalement liées aux commodités de collage et câblages (laboratoires ou chantiers plus au moins confortables) qui conduisent à utiliser des jauges nues ou au contraire, des jauges ayant subi un travail préparatoire en usine.

La première catégorie est représentée par des jauges soudables qui sont des jauges à trames pelliculaires collées sur une feuille d'acier que l'on installe par une soudure électrique par points.

Pour la seconde catégorie, c'est-à-dire, les jauges ayant subi un travail préparatoire en usine, les jauges de la série CEA sont les plus élaborées et les plus universelles avec une grille complètement encapsulée, elles comprennent une cross-relai en cuivre permettant la soudure directe des câbles sans l'intermédiaire des petits fils de liaison.

II.8.3 Choix d'une compensation

L'expression « jauge auto-compensée » caractérise une jauge destinée à être utilisée sur un matériau ayant un coefficient de dilatation déterminé. Le coefficient de température de l'alliage dont est constituée la jauge, est ainsi choisi pour donner un effet thermique nul, avec une jauge auto-compensée, il n'est pas nécessaire d'utiliser une jauge de compensation. Toutefois lorsqu'on ignore le coefficient de dilatation du métal, on peut toujours employer la méthode classique de la jauge de compensation, qui ne peut qu'améliorer une compensation déjà approchée par la nature même de la jauge. Une jauge est auto-compensée par un métal de dilatation voisine d'une valeur pour laquelle elle a été conçue. Le tableau ci-dessous montre les dilatations de quelques matériaux.

Tableau II.2 : Compensations propres aux matériaux utilisés : [3]

Matériaux	Coefficients de dilatation
Quartz, invar	0 / °C
Tungstène-molybdène-zinc-uranium-carbure de tungstène.	5,4.10 ⁻⁶ / °C
Titane et alliages	9.10 ⁻⁶ / °C
Aciers-certains inox-béryllium	11.10 ⁻⁶ / °C
Aciers- inox-cuivre et alliages	16.10 ⁻⁶ / °C
Aluminium et alliages	23,4.10 ⁻⁶ / °C
Magnésium et alliages	27.10 ⁻⁶ / °C
Zinc et alliages	32,4.10 ⁻⁶ / °C
Matières plastiques	73,8.10 ⁻⁶ / °C
Plexiglas-Aral dite	90.10 ⁻⁶ / °C

II.8.4 Choix d'une géométrie

On choisit une jauge suivant la nature géométrique de la structure, ses détails à étudier (congés, gorges, recoins, bords, etc...), Les causes des contraintes (traction, torsion, contraintes résiduelles,...).

En effet, la grandeur et la forme d'une jauge dépendent du but poursuivi, mais également, il y'a lieu de considérer les formes qui facilitent les travaux des câblages. Le nombre de géométrie étant très important, lorsque, en cas d'urgence on ne peut obtenir dans des délais courts un modèle bien déterminé, on aura avantage à considérer des géométries assez voisines qui pourraient pratiquement donner les mêmes résultats mais qui seront disponibles à court terme.

Remarque : lorsqu'on choisit une jauge de petite taille, il convient de vérifier le courant maximum qui sera toléré sans échauffement néfaste. En gros la puissance dissipée est de l'ordre de 1 watt/cm^2 , mais elle dépend de nombreux paramètres dont la conductivité de la structure et la précision requise.

II.8.5 facteur de jauge, ses variations et la résistance nominale des jauges

Selon l'instrumentation utilisée pour le conditionnement, l'amplificateur, la lecture ou l'enregistrement des données, l'utilisateur doit considérer le facteur de jauge, ses variations ainsi que la résistance nominale des jauges.

- **Facteur de jauge**

Dans les conditions de fabrication des jauges modernes, le facteur de jauges est constant pour un type donné, sauf peut être pour certaines géométries particulières. Les variations du facteur de jauge en fonction de la température sont connues pour chaque types et indiquées par une courbe. La pente peut être positive ou négative.

Remarque : Certains constructeurs de capteurs utilisent des pentes négatives afin de compenser les variations de sensibilité dues au fait que le module d'élasticité E des corps d'épreuve diminue lorsque la température augmente. On peut même réaliser des jauges ayant une pente désirée par l'utilisateur.

• Resistance nominale

Les résistances nominale des jauges sont un compromis entre les valeurs trop basse, elles donneraient un signal trop faible et provoqueraient des erreurs dues aux effets de câblage ou de contact, trop élevées, elles provoqueraient des erreurs dues aux pertes d'isolement et leur fils fins seraient trop fragiles. Les valeurs nominales les plus courantes sont 120Ω, 350Ω et 1000Ω, la valeur la plus utilisée en analyse des contraintes est 120Ω.

Sur les capteurs, les valeurs 120 et 350Ω sont toutes deux employées, avec peut être une tendance actuelle à l'emploi plus fréquent de 350Ω.

La valeur 1000Ω est employée plus rarement par exemple pour certains capteurs dynamiques.

II.9 Méthodes de mesure pour les jauges résistives

Il est primordial d'appliquer une méthode qui ne mesure que la variation ΔR et non pas la résistance totale $R + \Delta R$. Pour illustrer ce point, supposons qu'on a une jauge résistive avec $R = 1000\Omega$ et $K = 2$ et on aimerait mesurer une déformation de $0.1\% = 1.10^{-3}$ avec une précision de 0.1%.

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon_1 \longrightarrow \Delta R = 2 \Omega \quad \text{II.14}$$

La précision demandée sur ΔR correspond à $0,002\Omega$, ce qui signifie qu'on doit mesurer la résistance totale $R = 1002,000 \pm 0.002\Omega$. La précision demandée sur la valeur R est donc de $2 \cdot 10^{-6}$. En d'autres termes, on doit disposer d'un instrument qui permet la lecture de 7 décimales. Avec une méthode de compensation qui supprime le signal dû à R on ne mesure que la variation ΔR qui est proportionnelle à la déformation, il suffit d'un instrument à 4 décimales. On doit néanmoins, dans le dernier cas, veiller à ce que les conditions de compensation restent stables jusqu'à la septième décimale. Un circuit qui ne permet que de mettre en évidence la variation ΔR est le pont de Wheatstone représenté en fig. II.7 [9].

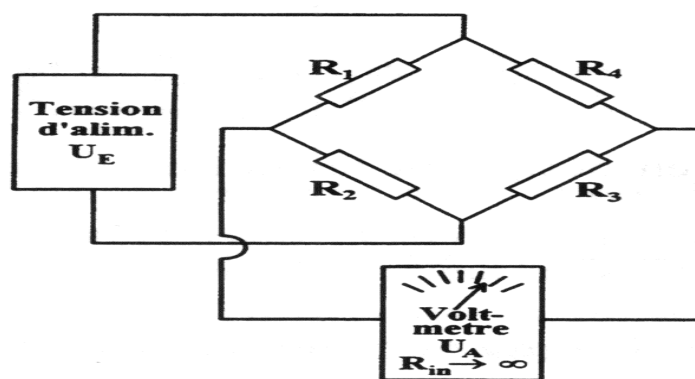


Fig II.7 : Le pont de Wheatstone

Ce circuit comprend 4 résistances électriques dont une ou plusieurs peuvent être remplacées par des jauges actives. Le pont est alimenté par une tension UE (continue ou alternative). Avant l'application d'une déformation le pont est ajusté par variation des résistances, de façon à ce que la tension de sortie UA s'annule. Selon le type de pont utilisé des potentiomètres de faible résistance doivent être branchés dans le circuit. Le pont est équilibré ($UA = 0$) lorsque:

$$\frac{R_1}{R_4} = \frac{R_2}{R_3} \longrightarrow U_A = 0 \quad \text{II.15}$$

Après remplacement de R_1 par une jauge et en laissant R_2 , R_3 et R_4 comme résistances fixes et équilibrées avant déformation de la jauge, la variation ΔR_1 de R_1 provoque un déséquilibre et la tension de sortie UA devient :

$$\frac{UA}{UE} = \frac{R_1 + \Delta R_1}{(R_1 + \Delta R_1) + R_2} - \frac{R_4}{R_4 + R_3} \quad \text{II.16}$$

Dans la pratique, on utilise trois résistances (R_2 , R_3 et R_4) d'une valeur identique à la valeur nominale R_1 de la jauge, qui pour jauges métalliques, vaut typiquement 300Ω . Puis, en tenant compte que $\Delta R_1 \ll R_1$, la formule se présente sous une forme plus simple et la tension de sortie du pont déséquilibré devient directement proportionnelle à ΔR_1 ou par l'intermédiaire de éq.II.14 à l'allongement de la jauge:

$$\frac{UA}{UE} = \frac{\Delta R_1}{4R_1} = \frac{1}{4} K \epsilon \quad \text{II.17}$$

Comme une variation de la température provoque également une variation des résistances dont on ne tient pas compte dans éq.II.17, la jauge et les trois résistances fixes doivent être soigneusement tenues à la température à laquelle on a équilibré le pont. Comme mesure de prévention on utilise des résistances fixes fabriquées avec le même alliage que la jauge. Ainsi les variations thermiques de toutes les 4 résistances sont identiques et ne peuvent pas déséquilibrer le pont. De plus il est une bonne pratique de coller aussi les 3 résistances fixes sur l'éprouvette. Ceci peut être fait à un endroit mécaniquement non sollicité. Une solution encore plus avantageuse constitue le pont complet. Il comporte directement 4 jauges actives sans résistances fixes. Elles doivent être collées sur le corps d'épreuve de façon à ce que les variations des résistances s'additionnent et augmentent ainsi la tension de sortie (voir fig II.8). Un pont (indices comme fig II.7) en équilibre avec les résistances R_i et déséquilibré par les ΔR_i donne une tension de sortie UA de

$$\frac{UA}{UE} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad \text{II.18}$$

En substituant d'après éq. II.14 et en désignant les déformations dans le sens des jauges à leur endroit par ϵ_i :

$$\frac{UA}{UE} = \frac{K}{4} (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad \text{II.19}$$

Pour les deux cas représentés dans la figure II.8 cette formule se simplifie de manière suivante:

a) Traction/compression uniaxiale

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

$$\frac{UA}{UE} = \frac{K}{2}(\varepsilon_L - \varepsilon_t) = \frac{K}{2}(1 + \nu)\varepsilon_L \quad \text{II.20}$$

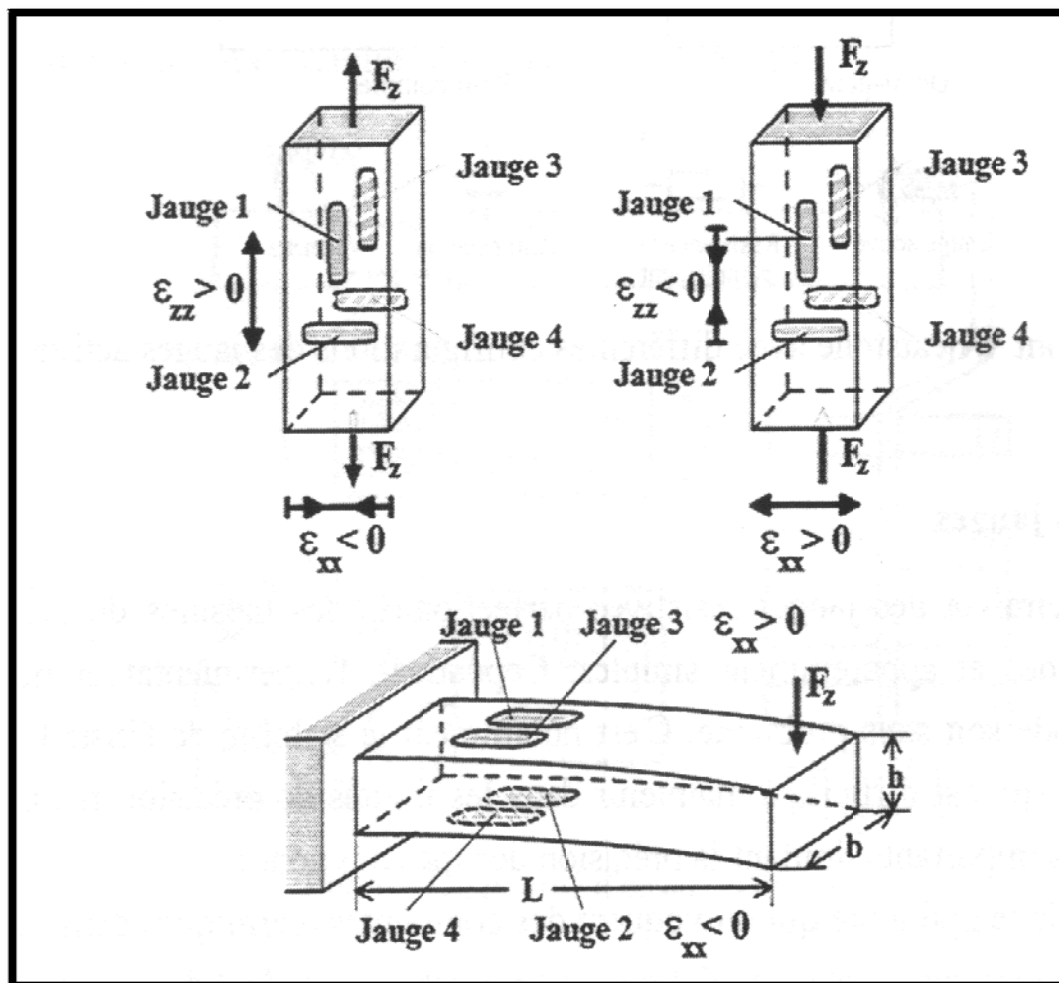


Fig II.8 : Position des jauges dans un pont complet pour la mesure des déformations en traction et en flexion

b) Flexion

Les jauges R_1 et R_3 sont sous traction et les jauges R_2 et R_4 sous compression

$$\frac{U_A}{U_E} = K\varepsilon_L \quad \text{II.21}$$

En flexion, les quatre jauges actives augmentent donc la résolution de quatre fois par rapport à un pont, qui ne contient qu'une seule jauge active (quart de pont). D'autres arrangements comme le demi-pont avec deux jauges actives et deux jauges fixes sont évidemment possibles et s'appliquent selon les circonstances (forme de la pièce à surveiller, accessibilité pour collage etc.). Les arrangements des jauges et des résistances fixes possibles dans un pont sont représentés dans la figure II.9. La plupart des capteurs de déplacement basés sur les jauges d'extensométries profitent de l'avantage de la compensation de température et de la résolution élevée d'un pont complet. Le type de capteurs de déplacement préféré, constitue la lame en flexion, équipée de quatre jauges.

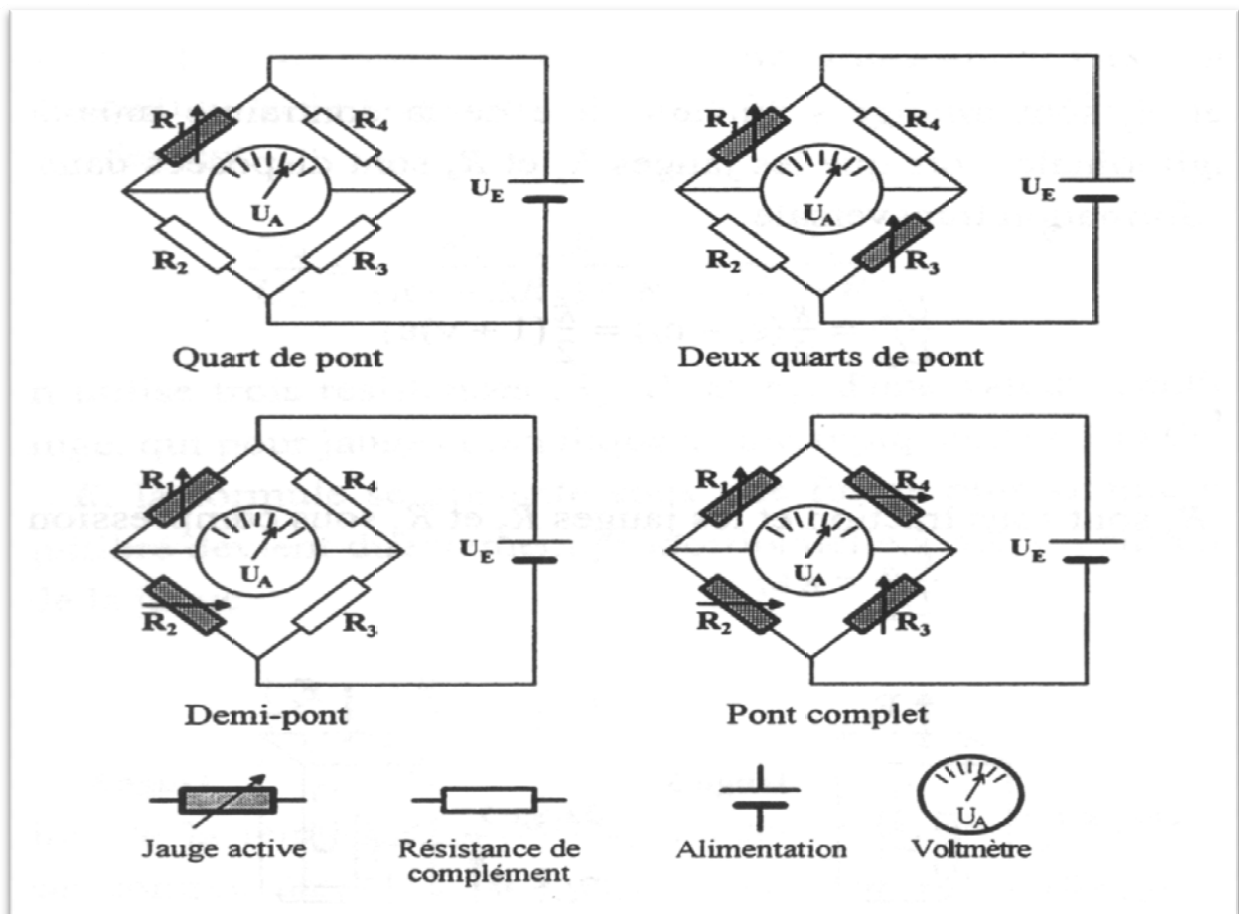


Fig II.9 : Le pont Wheatstone avec différentes configurations des jauges active

Chapitre III

Essai de traction

Chapitre III : ESSAI DE TRACTION

III.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 la limite élastique, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Avec de l'équipement adéquat on peut également mesurer le module d'élasticité et le coefficient de Poisson. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes des pièces allant d'un pignon microscopique jusqu'à la structure métallique d'un grand hall. Dans la recherche on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Ce travail de laboratoire a comme objectif :

- . De faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués;
- . De mesurer des courbes de traction sur des alliages d'aluminium, de cuivre et des aciers;
- . D'interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture etc...
- . D'estimer la précision de mesure [6].

III.2 Les éprouvettes

L'essai de traction est exécuté 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 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 (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 ΔL 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 rapport $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}}$ est le même. Pour pouvoir comparer les résultats provenant de différents laboratoires, les normes ASTM fixent ce rapport à $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5,65$ soit, $L_0 = 5d_0$ pour les éprouvettes cylindriques (diamètre d_0), ou alternativement $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 11,3$ soit, $L_0 = 10d_0$.

Afin de réduire l'influence de l'état de surface de l'éprouvette, celui-ci devra être particulièrement soigné et répété pour un même lot. Selon la norme ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials" Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques. Les éprouvettes d'essais ont les dimensions suivantes :

➤ Eprouvettes cylindriques

Ces éprouvettes sont de section circulaire, avec des congés qui se raccordent tangentiellement entre la partie soumise à l'essai et les extrémités avec un arc de cercle continu. Ce raccordement permet de minimiser les concentrations de contraintes. Les dimensions de ces éprouvettes sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.1 : dimensions des éprouvettes cylindriques [3]

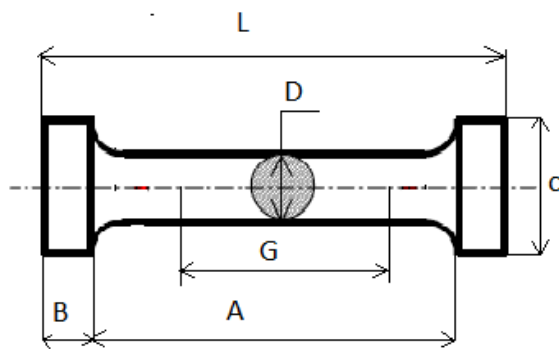
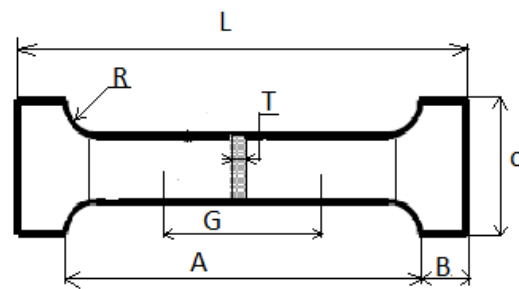
	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
G : longueur entre repères (mm)	63.5±1	45±1	30±1
D : diamètre (mm)	12.5±2	20±4	3±6
R : rayon de raccordement (mm)	10	8	6
A : longueur utile (mm)	75	54	36

➤ Eprouvettes plates

Ces éprouvettes sont de section rectangulaire, d'épaisseur uniforme sur toute la partie soumise à l'essai, avec des congés qui se raccordent de manière tangentielle entre les sections d'amarrage et les parties soumis à l'essai, suivant d'un rayon de cercle continu. Les dimensions de ces éprouvettes sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. 2 : Dimensions des éprouvettes plates [3]

	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Largeur nominale (mm)	40	12.5	6
G : longueur utile (mm)	200±2	74±2	25±2
R : rayon de raccordement (mm)	25	6	6
L : longueur totale (mm)	450	176	100
A : longueur entre repères (mm)	255	86	32
B : longueur de la section d'amarrage (mm)	75	45	30
C : largeur de la section d'amarrage (mm)	50	24	10

**Fig III. 1** : éprouvette cylindrique**Fig III. 2** : éprouvette plate**Remarque :**

- 1- Les têtes de fixation sont, soit filetées, soit plates, selon le type d'amarrage employé (mors filetés ou serrage sur mors plats, mécaniques ou hydrauliques)
- 2- La fixation de la ligne d'amarrage aux mâchoires de la machine de traction doit être bien étudiée, si on veut réaliser un essai pur et éviter toute flexion parasite. Même soigné l'alignement ne peut être parfait. Aussi utilise-t-on très souvent des raccords très articulés, comme des cardans et des rotules. De tels dispositifs peuvent être insuffisants lorsqu'on a réalisé des essais sur des matériaux très anisotropes (monocristaux, matériaux composites, tôles fortement texturées) et lorsque la direction de traction ne coïncide pas avec un axe de symétrie du matériau. Ces essais hors-axes nécessitent des dispositifs spéciaux.

- 3- Les extrémités de l'éprouvette ont généralement une section plus importante en vue d'éviter la rupture de l'éprouvette à l'intérieur des mors de la machine d'essai ; dans cette région en effet, les conditions de travail sont plus sévères, en raison des irrégularités locales dans la répartition des contraintes.

III.3 Machines d'essais

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.

Dans le cas le plus simple le réglage assure une vitesse de déplacement de la traverse constante ce qui se traduit en une vitesse de déformation constante si la machine et la ligne de charge sont très rigides. Pour des machines avec une certaine complaisance, la vitesse de déformation de l'éprouvette est plus lente dans la partie de déformation élastique que dans la partie de déformation plastique, car une partie du déplacement de la traverse va dans la déformation élastique de la ligne de charge.

La complaisance de la ligne de charge est aussi la raison pourquoi 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.

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 que l'on a déjà enregistré lors d'un essai précédent. 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 analogique digital).

Après l'ouverture d'un fichier qui reçoit les valeurs mesurées et la préparation de l'écran pour l'affichage des courbes et des valeurs désirées, le programme attend, jusqu'à ce que l'opérateur donne le signal pour le départ. Une fois en route, le programme entre dans une boucle qu'il ne quitte que lorsqu'un capteur signale un incident, l'opérateur intervient manuellement ou lorsque une condition de fin d'essai programmée est atteinte. Comme condition de fin d'essai on peut, selon le type d'essai, demander une force ou un déplacement maximal, un nombre de cycles ou surveiller la chute de la contrainte après la rupture. Lors de chaque répétition de cette boucle les signaux des capteurs sont convertis en valeurs digitales, transférés dans la mémoire vive de l'ordinateur, transformés en unités physiques (force, allongement etc.), enregistrés dans le fichier de sortie et envoyés à l'écran pour actualiser l'affichage. En plus la valeur servant au contrôle du déplacement de la traverse est comparée avec la valeur de consigne. La différence entre ces deux valeurs est amplifiée et envoyée au circuit de contrôle du moteur comme signal d'accélération ou de décélération.

III.4 La machine hydraulique de traction OEHLGASS MP12

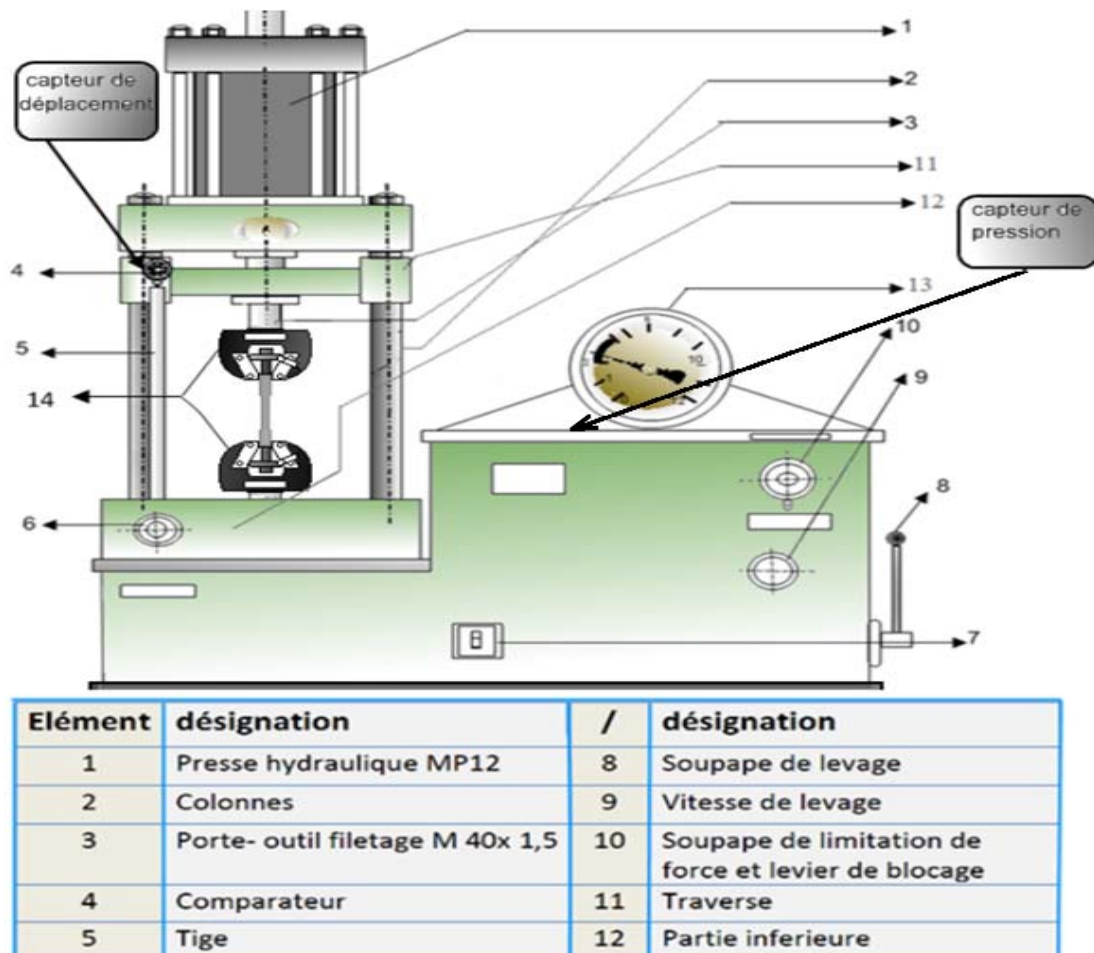


Fig III.3 : la machine de traction « OEHLGASS MP12 » [7]

III.4.1 Description

La structure simple et claire de cet appareil d'essai de matériaux permet d'observer tous les détails et toutes les phases des processus d'essai, ce qui est pratiquement impossible avec une machine d'essai industrielle. L'appareil est cependant suffisamment performant pour réaliser des tests de niveau industriel.

Son utilisation simple et sa robustesse en facilitent l'utilisation pour les expérimentations d'utilisateurs.

L'appareil d'essai est une machine d'essai verticale à montant hydraulique produisant directement aussi bien des forces de traction que des forces de compression.

La traverse inférieure peut être déplacée en plusieurs positions pour le réglage approximatif de la hauteur.

Des logements cylindriques sur les traverses permettent de changer facilement les différents éléments, comme les mâchoires à coins.

Des éprouvettes cylindriques et plates peuvent être utilisées.

La force et le déplacement sont enregistrés par des capteurs, affichés et peuvent être traités sur un PC.

III.4.2 Contenu didactique/ essai

Système de base pour l'application d'efforts de compression et de traction pour les essais de matériaux. Une gamme étendue d'accessoires permet d'effectuer :

- Essai de traction
- Essai de dureté Brinell
- Essai de compression
- Essai de flexion
- Essai de cisaillement

* Machine d'essai hydraulique à montant avec production directe des forces

* Possibilité de produire des forces de traction et de compression

* Force d'essai dans les deux directions 130kN

* Affichage numérique de la force et du déplacement.

III.4.3 Spécification

1. Appareil d'essai hydraulique universel pour les essais de matériaux
2. Production des forces de traction et de compression
3. Force d'essai et vitesse de déplacement ajustable
4. Production de la force d'essai via pompe à engrenages et cylindre hydraulique à double effet
5. Mesure de force via point de mesure pour jauge de contrainte avec signal acoustique de surcharge, surcharge max. 150%
6. Mesure de déplacement via comparateur
7. Affichages LED pour la force et le déplacement avec mémoire de tare et de valeur maximale.

III.4.4 Caractéristiques techniques

Production hydraulique de force d'essai

- force d'essai: 0...120kN
- pression max. du système: 250bar
- course max. du piston: 150mm
- vitesse de déplacement: 0...425mm/min

Pompe à engrenages

- débit max: 1cm³/tour
- puissance absorbée: 0,55kW

Plages de mesure

- force: 0...120kN
- déplacement: 0...150mm

Affichages LED

- fréquence de répétition des mesures: 2,5s⁻¹

Positons du levier du distributeur

Position

« O » Le piston de travail est arrêté.

Le levier s'encliquette.

« AUF » Le piston de travail se déplace vers le haut.

Le levier s'encliquette.

« AB » (descente) Le piston de travail se déplace vers le bas, pour des raisons de sécurité, le levier ne s'encliquette pas lors de la descente.

« LEER » (à vide) : cette position n'est pas nécessaire pour commande du débit d'huile.

.à vide descente o montée.

La vitesse de déplacement est réglé de façon continue de 0 mm à 150 mm en sortant ou dévissant le régulateur de vitesse « lent-rapide ».

Le double écrou sert à blocage. Le piston est alors amené dans sa position la plus haute jusqu'à la butée. La force de pression ou de traction souhaitée peut alors être réglée sur la soupape de limitation de pression « 0 KN – 120 KN ». Le levier oscillant sert alors au blocage.

III.4.5 Instructions importantes

Tous les essais pour lesquels la force de pression ou de traction doit être mesurée doivent être réalisés à une très faible vitesse de déplacement. Exemple : 0.1 à 0.3 mm/mn. Le compteur monté dans le champ de travail est utilisé avec la colonne de mesure coulissante pour le contrôle de la vitesse de déplacement.

III.4.6 Dimensions des éprouvettes

- Eprouvettes plates : largeur max. 40 mm (largeur idéale)
Epaisseur max : 8 mm.
- Eprouvettes rondes : diam. De serrage 8 à 10 mm

Remarque

Il ne faut pas utiliser des pièces trempées.

III.4.7 Mesure de la force

La force est donnée directement sur le cadran du manomètre de pression, ce dernier est gradué en KN.

III.4.8 Mesure de déplacement

Le mouvement de montée et descente de la traverse permet de mesurer mécaniquement le déplacement à l'aide d'un comparateur à cadran protégé contre les chocs, possédant une plage de mesure de 50 mm et une précision de 0.01 mm.

III.4.9 Montage d'outils

Le montage, le remplacement aisé et rapide des outils (dispositif de serrage) ont fait l'objet d'une attention particulière au cours de la mise au point de cette machine de traction. Des dispositifs de serrage spéciaux pour des éprouvettes cylindriques et plates sont disponibles.

Remarque

Les têtes de serrage à mâchoires à clavette se prêtent particulièrement à la fixation de matériaux se présentant sous forme de tôles minces. Les forces auxquelles elles sont soumises ne doivent pas dépasser une traction de 50 KN.

III.5 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).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad \text{III.1}$$

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

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{III.2}$$

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. La contrainte vraie est obtenue en divisant la force par la section instantanée, tandis que la déformation vraie est l'intégrale sur les incréments d'allongement divisé par la longueur à chaque instant. Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. La figure III. 4 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux [6].

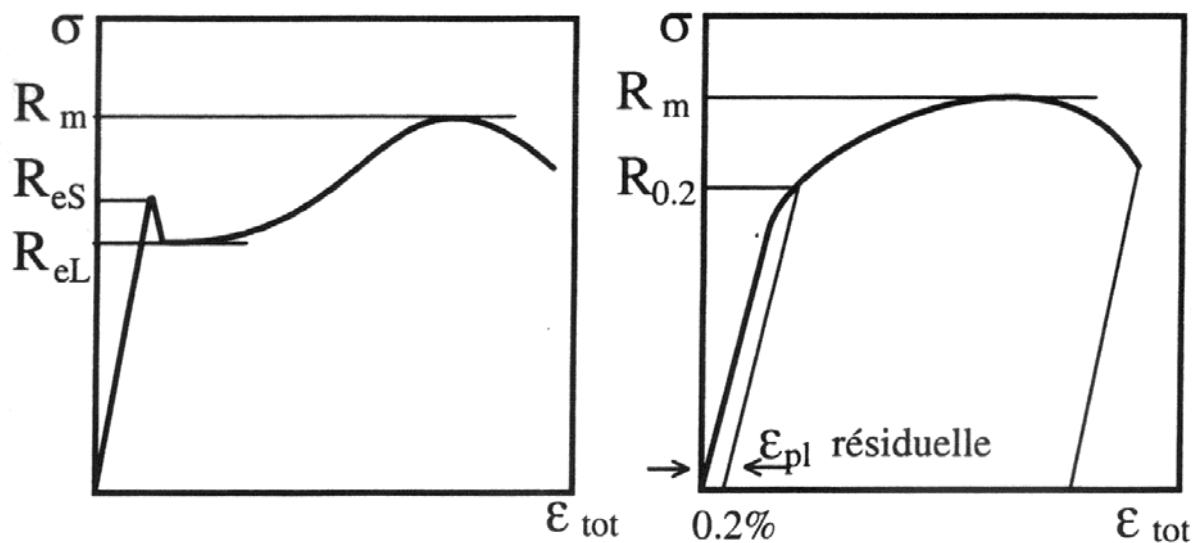


Fig III. 4: Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction [6]

Le comportement à gauche est typique pour un acier au carbone recuit tandis que la courbe de traction à droite est caractéristique pour un matériau avec une structure cristalline cfc.

L'apparition d'une limite élastique bien définie et du plateau montrée à gauche est liée à une interaction entre des dislocations et le carbone en solution solide.

III.5.1 Caractéristiques mécaniques

III.5.1.1 Exploitations de l'essai

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 s'accroissent 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 [10].

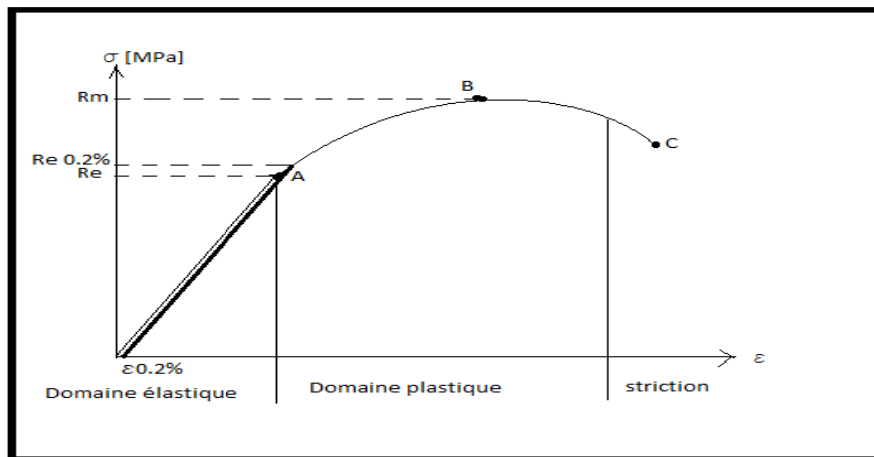


Fig III. 5 : Courbe contrainte-déformation. Limite d'élasticité et résistance à la traction [10]

On peut également définir certaines caractéristiques déterminées par l'essai de traction :

- la rigidité est fonction de l'énergie des liaisons entre les atomes ou les molécules constituant le matériau. On mesure la rigidité principalement par le module d'YOUNG. Plus ce module est élevé, plus le matériau est rigide.

- la résistance caractérise la contrainte maximale qu'un matériau supporte avant de se rompre. Cette résistance est fonction de l'intensité des liaisons mais également de la forme des pièces ou de ses défauts.

- la ductilité correspond à la capacité d'un matériau à se déformer de façon permanente avant de se rompre. Plus l'allongement à la rupture est élevé, plus le matériau est considéré comme ductile. À l'opposé, lorsque la déformation permanente est très réduite ou nulle, on parle d'un matériau fragile. Un matériau fragile peut présenter une résistance très élevée (Fig III.6)

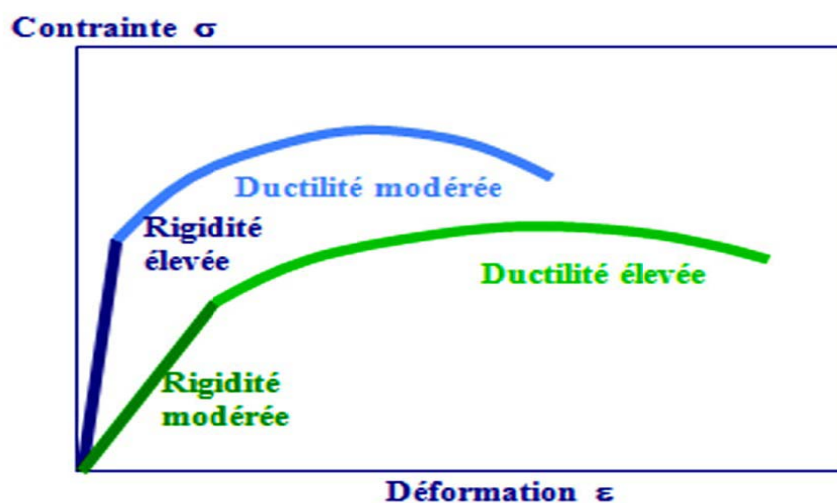


Fig III. 6 : Courbe contrainte-déformation. Deux matériaux avec des rigidités et des ductilités différentes

- la ténacité qui représente la quantité d'énergie absorbée à la rupture par un matériau. Elle caractérise la résistance à la propagation brutale de fissures. Sa valeur est égale à l'aire de la surface sous la courbe contrainte-déformation. Cette caractéristique est importante pour les céramiques.

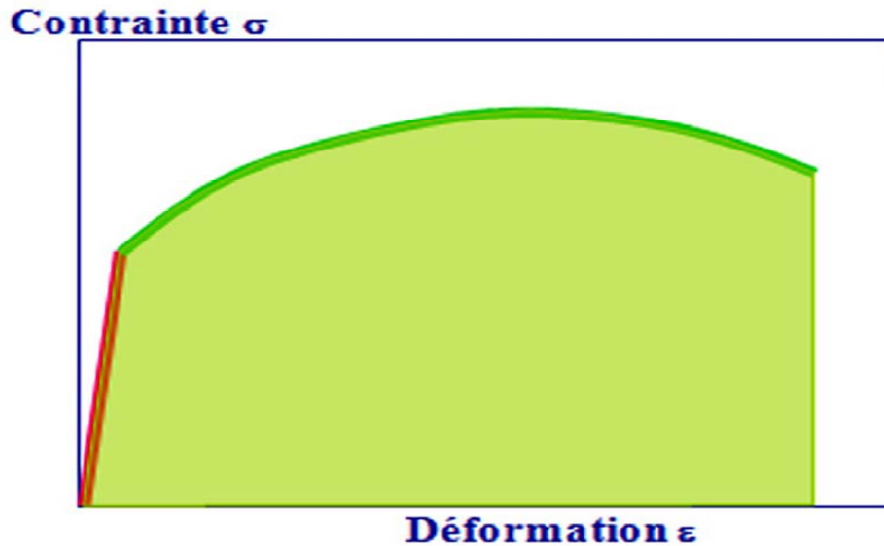


Fig III. 7 : Courbe contrainte-déformation. Ténacité = surface sous la courbe

III.5.1.2 Domaine élastique

C'est la partie rectiligne de la courbe où les déformations sont réversibles et proportionnelles à la contrainte appliquée.

La pente de la ligne OA définit le coefficient de proportionnalité entre la contrainte et la déformation : C'est le module d'élasticité ou module de Young.

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 III.3 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.

Tableau III.3: Valeur typique du module d'élasticité pour différent métaux : [6]

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

Limite d'élasticité R_e [daN/mm²]

C'est une valeur qui caractérise, en plus de E, le domaine élastique. Par définition c'est une contrainte minimale qui produit une déformation permanente du métal, elle est une propriété capitale de l'acier car la contrainte supportée par celui-ci en service ne devra jamais la dépasser. C'est elle qui est souvent considérée pour décider du choix d'un acier, cependant cette limite n'est pas théoriquement définie d'une façon précise. Si on se place du point de vue réception d'un acier et qu'en veuille vérifier si la limite élastique n'est pas inférieure à tel contrainte donnée, on a qu'à soumettre l'éprouvette à la charge en question et constater après cessation de l'effort s'il y'a eu ou non déformation sensible. Si au contraire on se propose non de vérifier si la limite élastique supérieure à un chiffre donné mais de déterminer cette limite, il serait long de soumettre l'éprouvette à des charges rapprochées et de vérifier après chaque charge s'il y'a un allongement permanent. On peut dans ce cas suivre la relation qui existe entre l'allongement et la charge ; dans le cas général ou la machine de traction donne une vitesse d'allongement à peu près au début cesse de croître un instant pour recommencer ensuite plus lentement, la discontinuité entre la charge et l'allongement observée sur l'enregistreur est suffisamment nette.

L'essai de traction donne donc un coefficient qui, s'il ne correspond pas à la limite élastique théorique et cependant relativement bien défini.

La commission pour l'unification des cahiers des charges considère comme limite élastique pratique, la contrainte capable de produire un allongement permanent de 0,2 mm sur une éprouvette de 100 mm entre repères.

En pratique, la limite élastique par son utilisation pratique, sa mesure relativement facile et sa traduction mécanique se tient dans le premier rang des caractéristiques mécanique de l'acier, elle doit toujours être considérée pour le choix et le contrôle.

Remarque

1- Il faut distinguer entre la limite apparente d'élasticité qui est la contrainte maximale pouvant être supportée par l'éprouvette dans le domaine élastique (sur le graphe, l'ordonnée du point A) et la limite conventionnelle d'élasticité qui est la contrainte maximale qui donne un allongement permanent de 0,2% de la longueur initiale.

- Limite apparente d'élasticité :

$$R_e = F_e / S_0$$

III.3

Avec :

F_e : charge élastique, [N] ;

S_0 : Section de l'éprouvette avant essai, [mm²] ;

- Limite conventionnelle d'élasticité :

$$R_{e 0.002} = F_{e 0.002} / S_0$$

III.4

Avec :

$F_{e 0.002}$: charge produisant un allongement permanent de 0,2%

2- Certains alliages (notamment l'acier doux), présentent un diagramme particulier tel que ;

*la limite de domaine élastique est marquée par un décrochement de la courbe de traction, c'est le crochet.

*le domaine plastique débute par une zone où la charge oscille autour d'une valeur moyenne constante : c'est le palier.

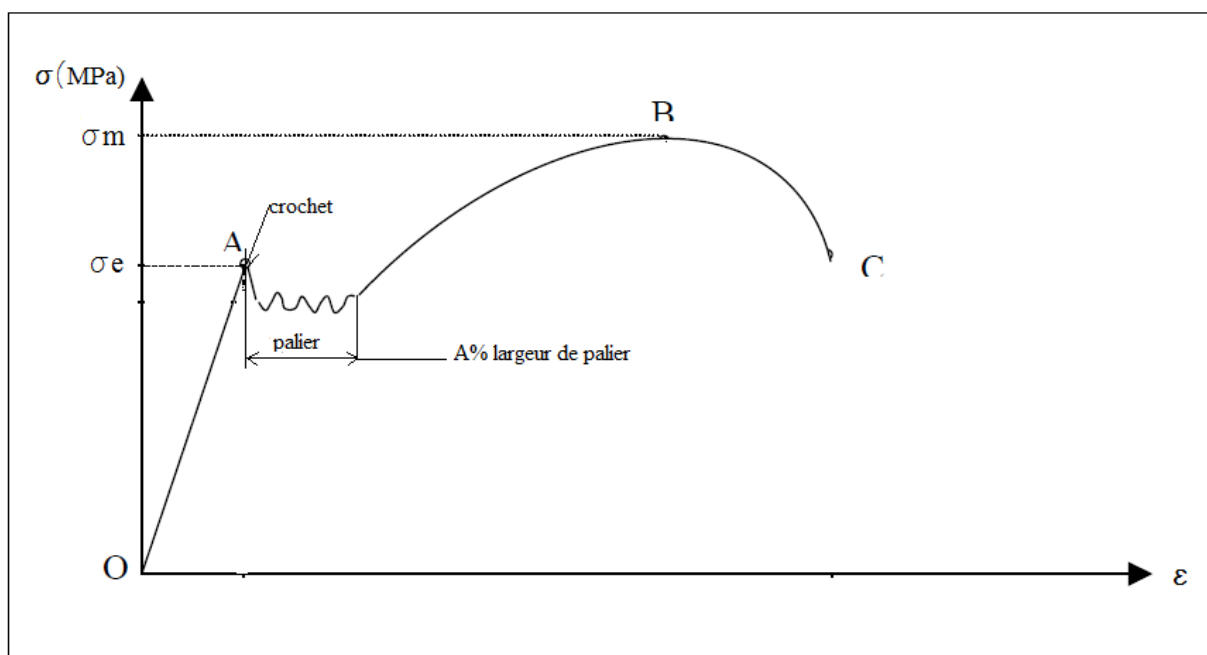


Fig III. 8 : courbe de traction de l'acier doux

III.5.1.3 Domaine plastique

A partir du point A, les allongements augmentent rapidement et l'allure du diagramme varie d'un matériau à un autre. La section diminue de manière appréciable et cette diminution devient visible lorsqu'on atteint la contrainte maximale R_m (correspondant à la charge maximale), le point B correspondant marque le début de la striction.

A partir de B, l'éprouvette continue à s'allonger alors que la charge décroît. La rupture a lieu en C et la charge correspondant est la charge ultime.

Cette partie de diagramme de traction nous renseigne sur d'autres caractéristiques mécaniques du matériau.

Résistance à la rupture

Elle correspond à la charge maximale supportée par l'éprouvette. Rapportée à l'unité de section initiale S_0 .

$$R_m = F_m / S_0 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad \text{III.5}$$

C'est une caractéristique absolument nette qui ne donne lieu à aucune difficulté d'interprétation. Son grand avantage est être facile à déterminer.

III.5.1.4 La striction

La notion de striction est souvent associée à l'instabilité, physiquement elle se manifeste par la localisation de la déformation en une portion ou surface de l'éprouvette. En effet, en rapprochant les deux parties de l'éprouvette après cassure, on constate que l'allongement n'est pas réparti uniformément sur toute la longueur calibrée, mais est plus accentué à l'endroit de la cassure. C'est pourquoi on indique seulement l'allongement moyen exprimé en pour-cent de la longueur initiale de barreau. L'écartement choisi est repéré avant essai, afin de pouvoir effectuer avec le plus de précision possible la mesure de variation de longueur.

Le phénomène s'effectue en deux périodes : en premier lieu allongement proportionnel, puis allongement de striction. Si l'on exerce une traction sur un barreau, il s'allonge d'abord régulièrement sur toute la longueur ; la section tend alors à diminuer, mais à cause de cette tension du métal, il se produit un écrouissage qui compense largement la diminution de section. C'est la première période des allongements proportionnels. Puis arrive un moment où cette augmentation de résistance par écrouissage ne compense plus l'effort exercé par la traction ; l'allongement se localise dans une région du métal et le phénomène localisé de striction, ou autrement dit d'étranglement du métal commence. Cet allongement se poursuit jusqu'à rupture de la pièce : c'est l'allongement de striction.

On définit la striction par :

1-coefficient de striction(Z) :

$$Z\% = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_0} \quad \text{III.6}$$

2-allongement de striction(Z_u) :

$$Z\% = 100 \frac{S_0 - S_u}{S_u} \quad \text{III.7}$$

Avec :

S_0 : section droite correspondant à la longueur entre repères avant l'application de la charge.

S_u : section droite minimale après reconstitution de l'éprouvette

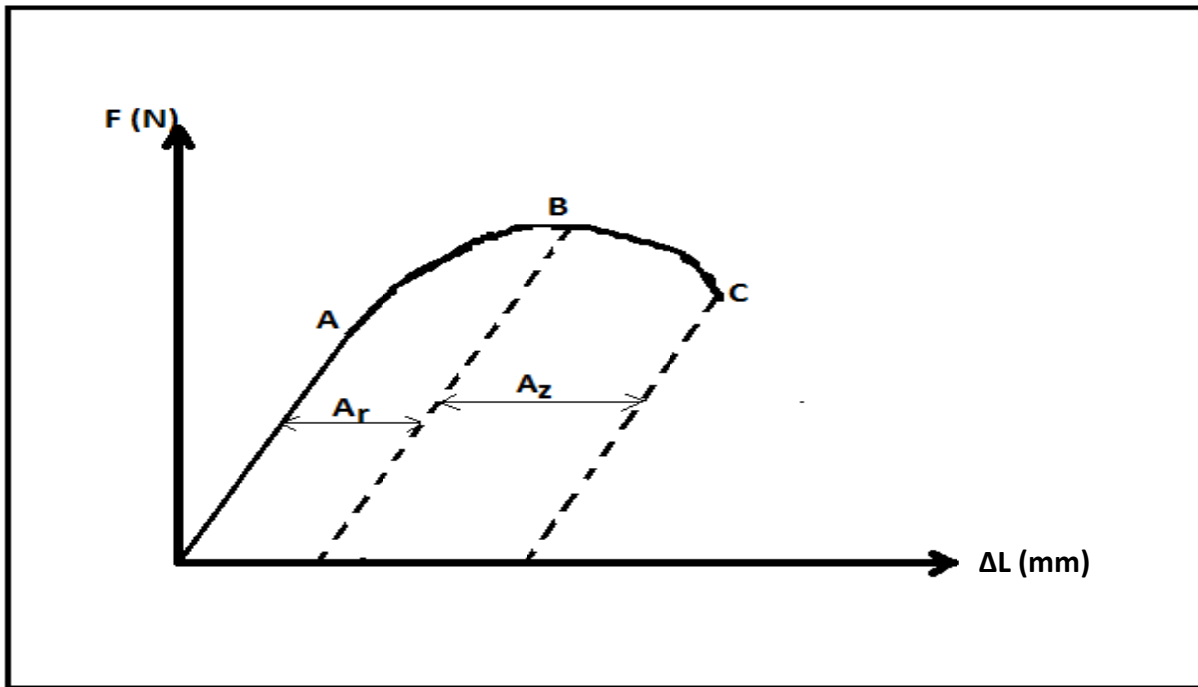
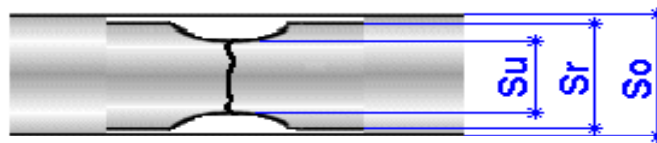


Fig III.9 : allongement reparti et allongement de striction



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

Fig III.10 : éprouvette avant et après rupture

III.6 Autres caractéristiques mécaniques déterminées par l'essai de traction

III.6.1 Allongement permanent après rupture

$$E_{Lt} = L_T - L_0$$

III.8

Où,

L_0 : longueur initiale entre repères

L : longueur d'éprouvette reconstituée après rupture.

III.6.2 Allongement uniforme

$$E_{L_u} = L_u - L_0 \quad \text{III.9}$$

L_u : longueur mesurée lorsque F_m est atteint

III.6.3 Coefficient d'allongement

$$A\% = (L_u - L_0/L_0).100 \quad \text{III.10}$$

III.6.4 Coefficient de poisson

C'est le rapport de l'allongement transversal sur l'allongement longitudinal.

$$\nu = \varepsilon_T / \varepsilon_L \quad \text{III.11}$$

Avec :

$$\varepsilon_L = \Delta L / L_0 \quad \text{III.12}$$

$$\varepsilon_T = (D_0 - D_u) / D_0 \quad \text{III.13}$$

Pour une éprouvette cylindrique : D_u est un diamètre à la rupture [3].

III.7 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.III. 11) s'explique par le fait que la déformation plastique ne suit pas instantanément la variation de déformation ε et 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 $\sigma(\varepsilon)$ 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 s [6].

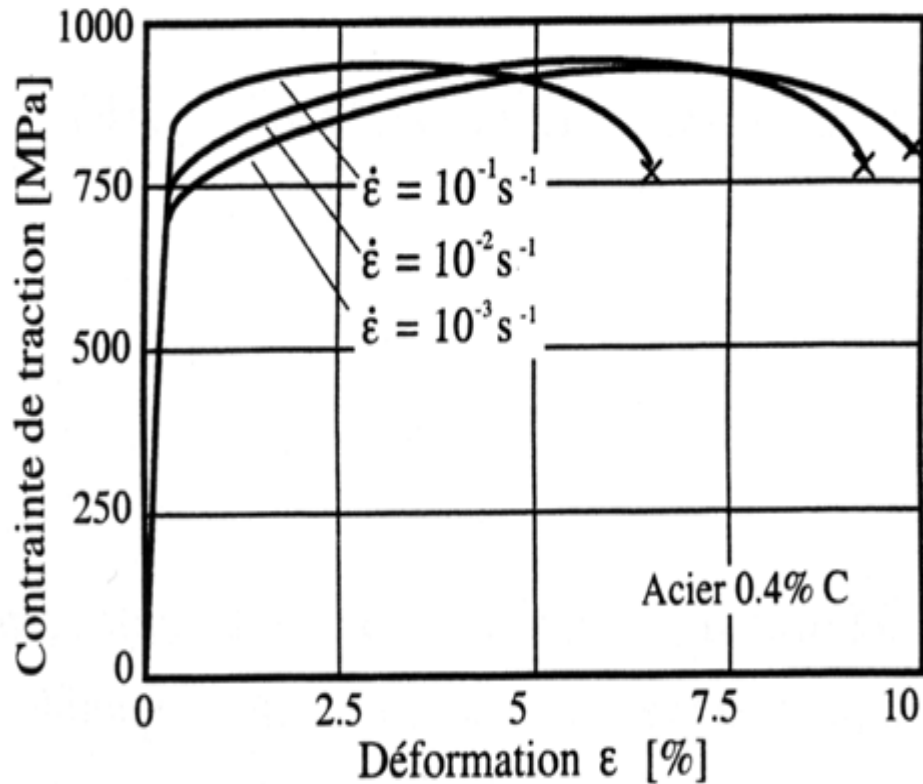


Fig III.11 : Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction.

III.8 Considération sur l'essai de traction

On admet qu'une vitesse trop grande d'application de la charge accroît la limite élastique, augmente un peu la résistance à la traction et diminue l'allongement.

D'ailleurs, la vitesse peut varier avec la section des éprouvettes ; évidemment, plus la section est forte, moins il faut aller vite.

[Les normes AFNOR prévoient pour les aciers C.C, une vitesse d'essai de : $\dot{\epsilon} \leq 0.15L_0$ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) ou $\leq 30 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$].

Donc, on peut dire que les caractéristiques mécaniques dépendent de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ et aussi de la température ; mais la déformation plastique est indépendante de la durée de la charge lorsque les températures sont inférieures à la température de fusion (T_F). Au-delà de $T_F(K)/2$ apparaît le phénomène du fluage.

Ce phénomène désigne l'évolution de la déformation plastique en fonction de temps, pouvant conduire éventuellement à la rupture, lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte inférieure ou supérieure à la limite élastique, à des températures assez élevées :

$T(K) > 0.4 \text{ à } 0.5T_F$ T_F (aciers) = 1400°C .

Chapitre IV

Conception du capteur

Chapitre IV : Conception du capteur

IV.1 Description

Le capteur de déplacement conçu est constitué de deux parties distinctes :

- Une lame élastique sur laquelle on colle la jauge électrique.
- Un dispositif qui permet de transformer le mouvement de translation de l'éprouvette en une flexion de la lame.

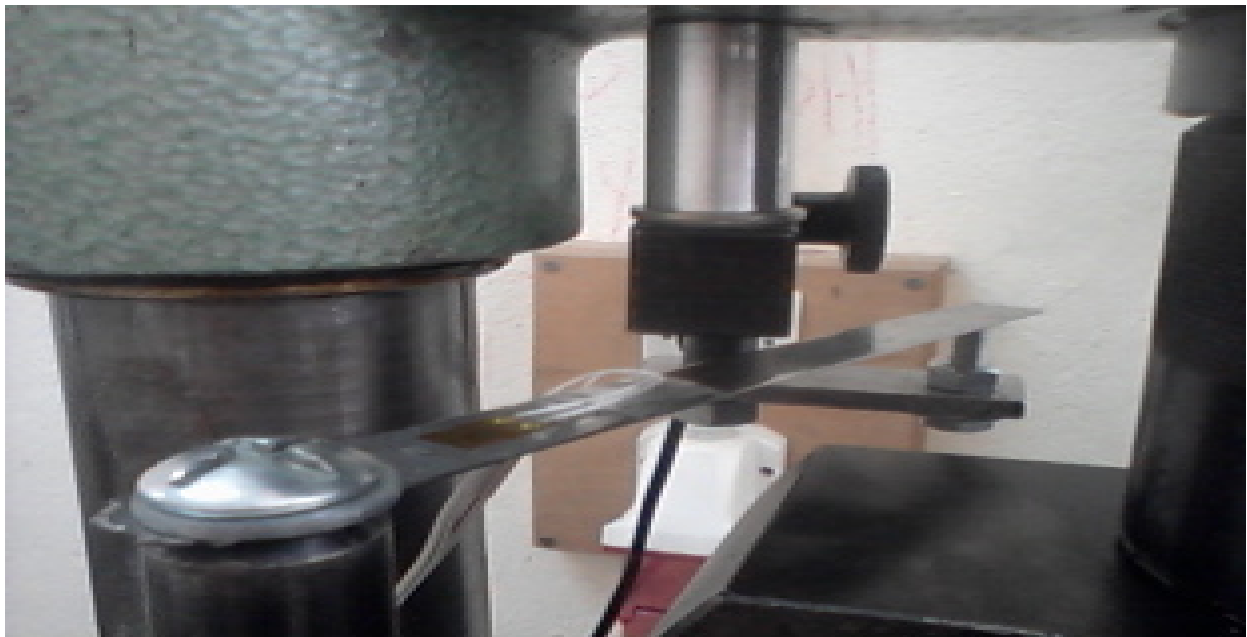


Fig IV.1 : Le capteur de déplacement.

IV.2 Principe de fonctionnement

Le capteur de déplacement permet la mesure du déplacement de la longueur utile d'une éprouvette.

Le mors supérieur comporte une vis, qui une fois mise en contact avec la lame, permet d'équilibrer le pont et la remise à zéro de l'afficheur. En enclenchant la machine de traction, l'éprouvette s'étire de façon constante en tirant avec elle l'ensemble formé de (support inférieur et la vis) du dispositif, celui-ci à son tour tire la lame, laquelle en fléchissant communique sa déformation à la jauge d'extensométrie. Le choix d'utilisation d'une lame flexible repose sur le fait que la valeur de la déformation est beaucoup plus sensible en flexion qu'en traction pour une même valeur de l'effort.

IV.3 Positionnement de la jauge sur la lame

C'est l'opération la plus délicate, lors de la manipulation elle demande beaucoup d'attention et d'assurance de la part du manipulateur. Pour avoir une transmission de la déformation de la lame à la jauge électrique, on colle intimement celle-ci. Pour ce faire, une jauge montée sur un ruban adhésif est posée sur la lame (fig. IV.3) préalablement nettoyée à l'aide d'un solvant et sur laquelle on a étalé une couche de colle à base d'époxyde.

La jauge est collée sur la face supérieure de la lame à une distance de 80 mm de point d'application de force comme la montre la figure ci-dessous :

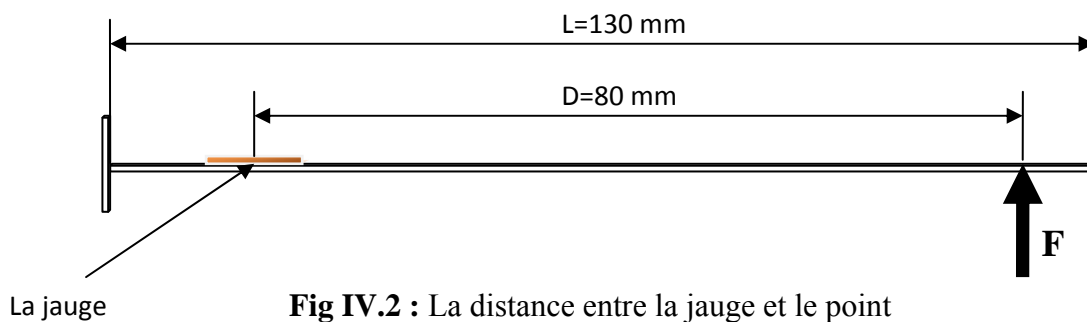


Fig IV.2 : La distance entre la jauge et le point d'application de force

On considère la lame comme une poutre encastré en flexion des caractéristiques suivantes :

La lame est de l'acier (Z85 WDCV06). On a choisit ce type de matériaux selon les conditions qui est présenté dans le premier chapitre (page 17). $Re=1500$ MPa, et son module d'élasticité $E=220$ GPa, la longueur totale $L=130$ mm, l'épaisseur $e=1$ mm, la largeur $b=10$ mm.

On veut calculer la déformation de la jauge :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad \text{IV.1}$$

$$K = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon} \quad \text{IV.2}$$

La valeur de la déformation est déterminée de la façon suivante :

$$\sigma = \frac{M_f}{\frac{I_{GZ}}{\vartheta}} : \text{Contrainte à une distance connue } D = 80\text{mm.}$$

$$\sigma = E\varepsilon \rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{M_f}{\frac{I_{GZ}}{\vartheta}} * \frac{1}{E} \quad \text{IV.3}$$

$$M_f = F * D \rightarrow \varepsilon = \frac{F.D.\vartheta}{I_{GZ}.E} \quad \text{IV.4}$$

(F, D, ϑ, I_{GZ} , E) sont connues, on calcul donc facilement la valeur de ε .

Une fois la jauge posée, nous relierons celle-ci à l'aide de fils électriques de façon à réaliser un pont de Wheatstone.

Pour l'essai de traction, la jauge collée sur la face supérieure de la lame se trouve sollicitée en compression et donne un signal négatif.

Et contrairement, si on réalise un essai de compression, la jauge sollicitée en traction et donne un signal positif.



Fig IV.3 : La lame fléchie et la jauge d'extensométrie

Le signal total fourni par l'enregistrement est donné par la formule suivante :

$$\Delta E = v \frac{r}{(1+r)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad \text{IV.5}$$

Avec : $r = \frac{R_1}{R_2} = 1$; puisque les quatre jauges utilisées sont identiques.

On aura donc :

$$\Delta E = \frac{v}{4} [\alpha - (-\alpha) + \alpha - (-\alpha)] = v \cdot \alpha \quad \text{IV.6}$$

$$\Delta E = v \cdot \alpha \quad \text{IV.7}$$

On remarque bien que le signal électrique est amplifié.

IV.4 Caractéristiques des jauges utilisées

Les quatre jauges utilisées sont des jauges HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GMBH) de résistances $R=350^{\pm 0.004}[\Omega]$, de facteur de jauge $K = 2,105^{\pm 0.005}$, et de sensibilité transversale $K_t = 0.7 \pm 0.002$.

- Le graphe ci-dessous donne le comportement thermique des jauges HBM montées sur des matériaux dont le coefficient de dilatation thermique est voisin de $10.8 [10^{-6}/^{\circ}\text{C}]$ qui est le coefficient de dilatation de l'acier.
- La courbe K_1 indique le comportement des jauges sans fils de sorties, au cours d'une variation continue de la température.
- La courbe K_2 montre le comportement des jauges avec des fils de sortie (longueur unitaire du fil = 30 mm) [5].

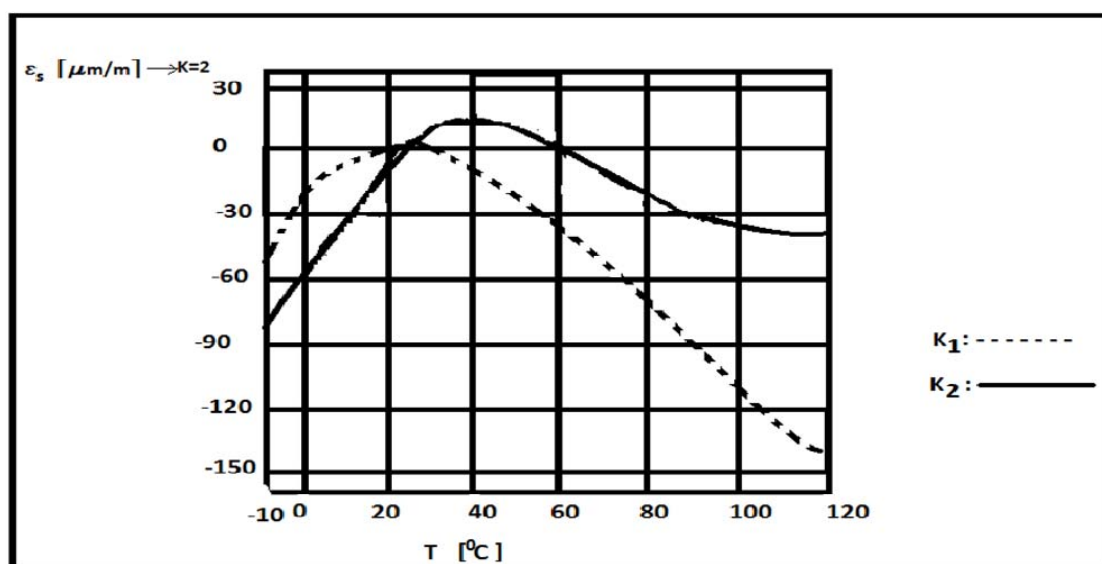


Fig IV.4 : Comportement des jauges en fonction de la température.

L'équation régissant ces deux courbes est :

$$\varepsilon_s = -25.3 + 2.22T - 5.60 \cdot 10^{-2}T^2 + 2.49 \cdot 10^{-4}T^3 + 0.0333L(T - 20)\mu\text{m}/\text{m} \pm 0.3\left(\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}\right)^{\circ}\text{C}^{-1} \quad \text{IV.8}$$

Le dernier terme de l'équation indique avec exactitude l'influence des fils de sortie.

T : température en $^{\circ}\text{C}$.

L : longueur unitaire des fils en mm.

IV.5 Montage du capteur

La lame est fixée à l'aide d'une vis M6x1.5 sur la tige qui est posé sur la table de la machine, de l'autre coté la lame est posée sur une vis du dispositif qui est fixé sur le mors supérieur de la machine:

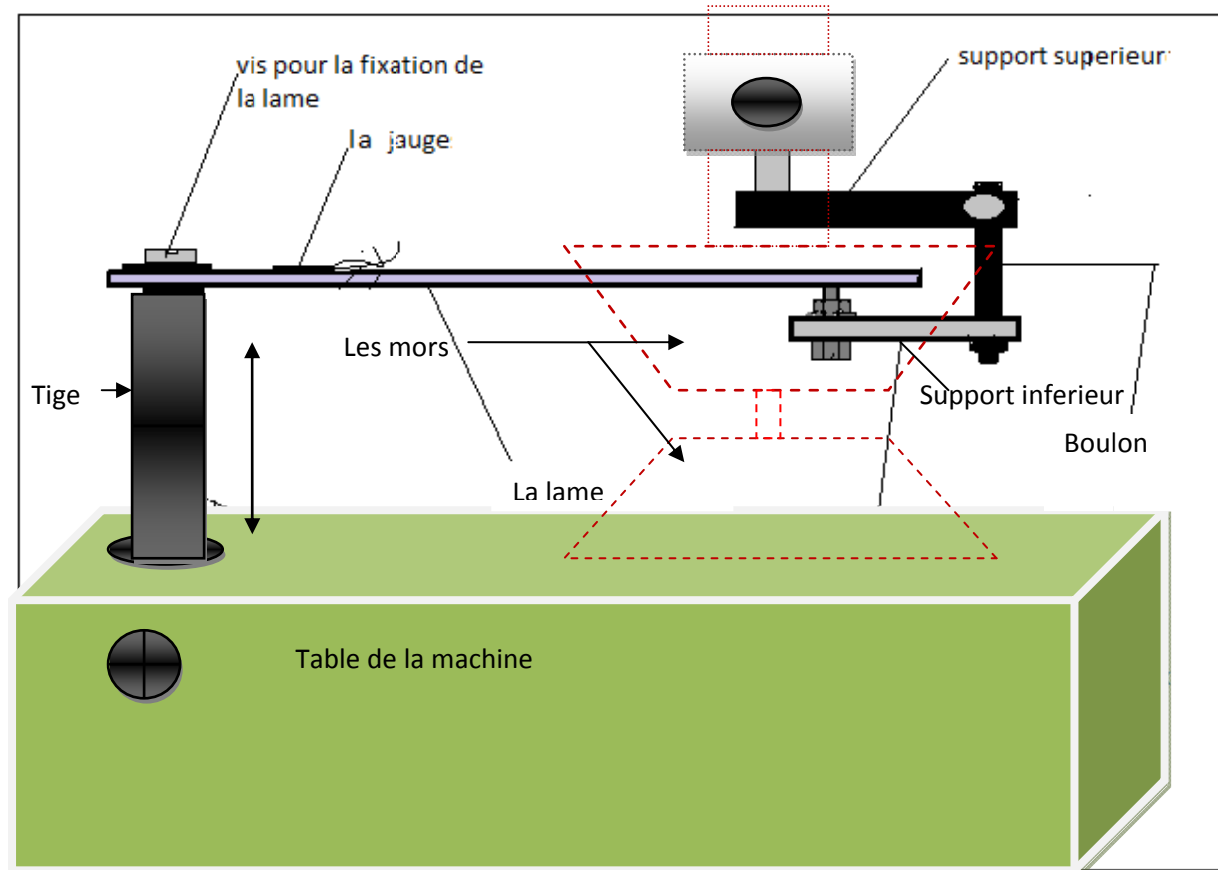


Fig IV.5 : Montage du capteur sur la machine de traction

IV.6 La chaîne de mesure

La chaîne de mesure est constituée de l'ensemble des dispositifs, y compris le capteur, rendant possible, dans les meilleures conditions, la détermination précise de la valeur du mesurande.

À l'entrée de la chaîne, le capteur soumis à l'action du mesurande permet d'injecter dans la chaîne le signal électrique, support de l'information liée au mesurande.

À la sortie de la chaîne, le signal électrique qu'elle a traité est converti sous une forme qui rend possible la lecture directe de la valeur cherchée du mesurande (fig IV.6) :

- enregistrement analogique graphique ou oscillographique ;
- affichage ou impression d'un nombre.

C'est l'étalonnage de la chaîne de mesure dans son ensemble qui permet d'attribuer à chaque indication en sortie la valeur correspondante du mesurande agissant à l'entrée.



Fig IV.6 : Machine de traction et la chaîne d'acquisition

La figure ci-dessous (Fig IV.7) présente le fonctionnement de capteur de déplacement, et comment la chaîne de mesure transformé la valeur de mesurande en signal électrique.



Fig IV.7 : Le capteur de déplacement et la chaîne d'acquisition au cours d'un essai

IV.7 Etalonnage de capteur

Pour permettre à l'utilisateur de traduire le signal électrique donné par l'afficheur en déplacement, il est nécessaire d'étalonner le capteur. Pour cela, on peut réaliser le test suivant : on lit sur l'afficheur les signaux correspondant à différentes flèches de la lame, les résultats obtenus nous donneront le facteur d'étalonnage de capteur :

Signale électrique (MV/V)	Flèche (mm)
0	0
42.5	0.75
75	1.25
105	1.78
217	3.5

Tableau IV.1 : valeurs d'étalonnage

- **Déduction du coefficient d'étalonnage**

La pente de la courbe ci-dessus nous donne le facteur d'étalonnage : $K = \tan \alpha = 0.016$.

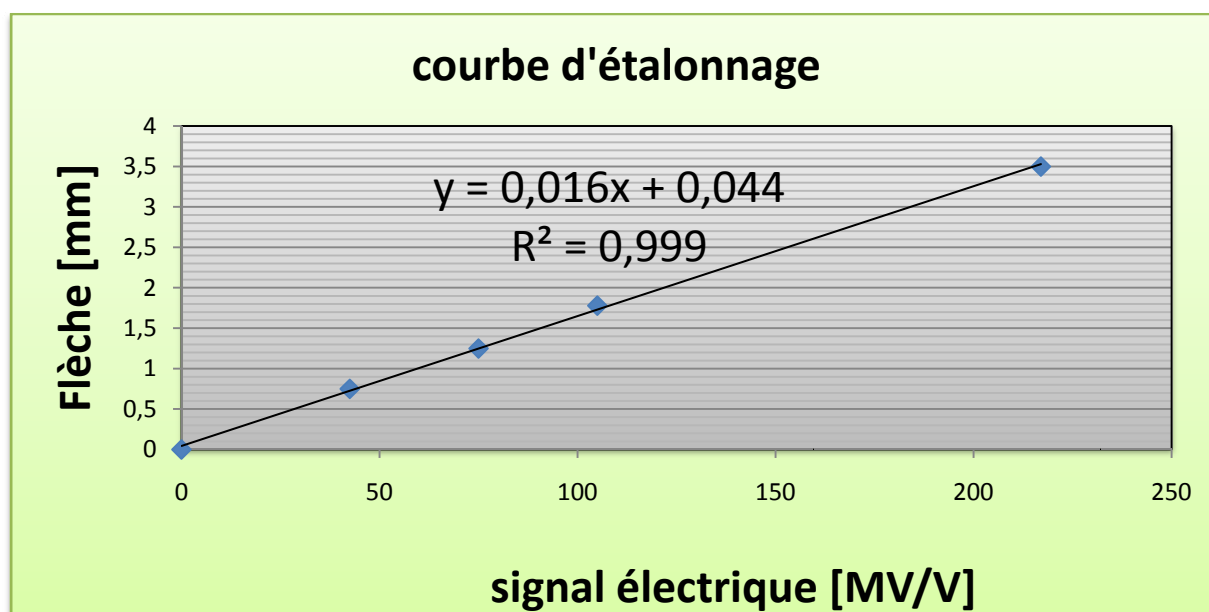


Fig IV.8 : Courbe d'étalonnage du capteur de déplacement

IV.8 Essai de validation pour les deux capteurs

Après l'étalonnage des deux capteurs (déplacement et de force), nous sommes prêt à réaliser des essais de traction sur les éprouvettes que nous avons usinées au hall de technologie de OUED AISSI. Les éprouvettes sont plates avec les dimensions suivantes :

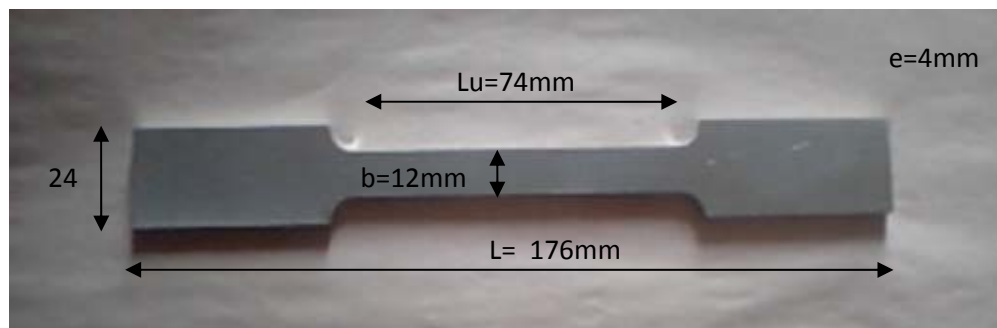


Fig IV.9 : les dimensions de l'éprouvette

a) Déroulement de l'essai

L'essai de traction est réalisé sur une éprouvette « plate » en acier XC38 de section rectangulaire (12mmx4mm).

- le déplacement de la traverse se déroule à vitesse constante (1mm/mn dans notre cas)
- la force appliquée est mesurée à l'aide de capteur de force
- l'allongement de l'éprouvette est mesuré par le capteur de déplacement

Les résultats obtenus lors de cette essai ce regrouper dans le tableau ci-dessous :

Tableau IV.2 : résultats obtenue avec le capteur de déplacement

signal force (MV/V)	signal déplacement (MV/V)	ΔL (mm)	F (N)	ϵ	σ (N/mm ²)
0	0	0	0	0	0
66,7	458,15	4,5815	1013,84	0,00010135	21,12
67,6	458,9	4,589	1027,52	0,0002027	21,40
68,2	459,65	4,5965	1036,64	0,00030405	21,59
71,5	460,4	4,604	1086,8	0,00040541	22,64
80,3	461,15	4,6115	1220,56	0,00050676	25,42
90,6	461,9	4,619	1377,12	0,00060811	28,69
102	462,65	4,6265	1550,4	0,00070946	32,3
114,7	463,4	4,634	1743,44	0,00081081	36,32
128,9	464,15	4,6415	1959,28	0,00091216	40,81
144,8	464,9	4,649	2200,96	0,00101351	45,85
162,8	465,65	4,6565	2474,56	0,00111487	51,55
182,4	466,4	4,664	2772,48	0,00121622	57,76
205,2	467,15	4,6715	3119,04	0,00131757	64,98
231,5	467,9	4,679	3518,8	0,00141892	73,30

261,7	468,65	4,6865	3977,84	0,00152027	82,87
296	469,4	4,694	4499,2	0,00162162	93,73
333,7	470,15	4,7015	5072,24	0,00172297	105,67
375	470,9	4,709	5700	0,00182433	118,75
420,2	471,65	4,7165	6387,04	0,00192568	133,06
468,8	472,4	4,724	7125,76	0,00202703	148,45
520,8	473,15	4,7315	7916,16	0,00212838	164,92
576	473,9	4,739	8755,2	0,00222973	182,4
633,6	474,65	4,7465	9630,72	0,00233108	200,64
693,4	475,4	4,754	10539,68	0,00243243	219,57
756,5	476,15	4,7615	11498,8	0,00253378	239,55
824,2	476,9	4,769	12527,84	0,00263514	260,99
893,8	477,65	4,7765	13585,76	0,00273649	283,03
964,5	478,4	4,784	14660,4	0,00283784	305,42
1035,5	479,15	4,7915	15739,6	0,00293919	327,90
1105,3	479,9	4,799	16800,56	0,00304054	350,01
1171,9	480,65	4,8065	17812,88	0,00314189	371,10
1223,5	481,4	4,814	18597,2	0,00324324	387,44
1238	482,15	4,8215	18817,6	0,0033446	392,03
1255,9	482,9	4,829	19089,68	0,00344595	397,70
1257,6	483,65	4,8365	19115,52	0,0035473	398,24
1256,8	484,4	4,844	19103,36	0,00364865	397,98
1245	494,3	4,943	18924	0,00498649	394,25
1249,9	503,1	5,031	18998,48	0,00617568	395,80
1259,4	512,5	5,125	19142,88	0,00744595	398,81
1253,8	522,2	5,222	19057,76	0,00875676	397,03
1257,1	531,7	5,317	19107,92	0,01004054	398,08
1251,9	541,6	5,416	19028,88	0,01137838	396,43
1252,7	549,7	5,497	19041,04	0,01247297	396,68
1249,6	559,5	5,595	18993,92	0,0137973	395,70
1247,3	569,3	5,693	18958,96	0,01512162	394,97
1250	578,7	5,787	19000	0,01639189	395,83
1261,8	587,3	5,873	19179,36	0,01755405	399,57
1260,9	596,6	5,966	19165,68	0,01881081	399,28
1242,6	606,8	6,068	18887,52	0,02018919	393,49
1236,4	616,7	6,167	18793,28	0,02152703	391,52
1242,1	626,2	6,262	18879,92	0,02281081	393,33
1249,6	635,5	6,355	18993,92	0,02406757	395,70
1268,5	644,3	6,443	19281,2	0,02525676	401,69
1289,4	652,9	6,529	19598,88	0,02641892	408,31
1304,1	661,3	6,613	19822,32	0,02755405	412,96
1318	670,1	6,701	20033,6	0,02874324	417,36
1329,4	678,6	6,786	20206,88	0,02989189	420,97
1339,5	687,7	6,877	20360,4	0,03112162	424,17
1348,9	696,7	6,967	20503,28	0,03233784	427,15

1357,8	705,7	7,057	20638,56	0,03355405	429,97
1366,2	714,4	7,144	20766,24	0,03472973	432,63
1374,7	722,6	7,226	20895,44	0,03583784	435,32
1382,8	731,8	7,318	21018,56	0,03708108	437,88
1390,4	740,8	7,408	21134,08	0,0382973	440,29
1398	749,2	7,492	21249,6	0,03943243	442,7
1405,1	757,4	7,574	21357,52	0,04054054	444,94
1412,3	766,4	7,664	21466,96	0,04175676	447,22
1418,9	775,3	7,753	21567,28	0,04295946	449,31
1425,7	784,3	7,843	21670,64	0,04417568	451,47
1432,1	793	7,93	21767,92	0,04535135	453,49
1438,2	802	8,02	21860,64	0,04656757	455,43
1444,1	810,7	8,107	21950,32	0,04774324	457,29
1449,8	819,5	8,195	22036,96	0,04893243	459,10
1455,5	828,4	8,284	22123,6	0,05013514	460,90
1460,9	837,2	8,372	22205,68	0,05132433	462,61
1466,2	844,2	8,442	22286,24	0,05227027	464,29
1471,6	853	8,53	22368,32	0,05345946	466,00
1476,8	862	8,62	22447,36	0,05467568	467,65
1481,8	870,5	8,705	22523,36	0,05582433	469,23
1486,9	878,6	8,786	22600,88	0,05691892	470,85
1491,6	887,1	8,871	22672,32	0,05806757	472,34
1496,3	895,6	8,956	22743,76	0,05921622	473,82
1500,8	904,1	9,041	22812,16	0,06036487	475,25
1503,9	912,5	9,125	22859,28	0,0615	476,23
1507,8	920,7	9,207	22918,56	0,06260811	477,47
1511,4	929,1	9,291	22973,28	0,06374324	478,61
1515,1	937,2	9,372	23029,52	0,06483784	479,78
1518,7	945,5	9,455	23084,24	0,06595946	480,92
1522,4	954,2	9,542	23140,48	0,06713514	482,09
1526,3	962,6	9,626	23199,76	0,06827027	483,32
1530,1	970,9	9,709	23257,52	0,06939189	484,53
1533,6	979,5	9,795	23310,72	0,07055405	485,64
1540,6	996,3	9,963	23417,12	0,07282433	487,85
1544,1	1004,6	10,046	23470,32	0,07394595	488,96
1547,4	1012,8	10,128	23520,48	0,07505405	490,01
1550,6	1021	10,21	23569,12	0,07616216	491,02
1553,7	1029,4	10,294	23616,24	0,0772973	492,00
1556,5	1037,8	10,378	23658,8	0,07843243	492,89
1559,4	1045,9	10,459	23702,88	0,07952703	493,81
1562,1	1054,2	10,542	23743,92	0,08064865	494,66
1564,7	1062,5	10,625	23783,44	0,08177027	495,48
1567,4	1071	10,71	23824,48	0,08291892	496,34
1569,9	1079,4	10,794	23862,48	0,08405405	497,13
1572,3	1087,8	10,878	23898,96	0,08518919	497,89

1575,1	1096,2	10,962	23941,52	0,08632433	498,78
1577,5	1104,4	11,044	23978	0,08743243	499,54
1580,1	1112,4	11,124	24017,52	0,08851351	500,36
1582,33	1120,4	11,204	24051,416	0,0895946	501,07
1584,5	1128,9	11,289	24084,4	0,09074324	501,75
1586,7	1137,1	11,371	24117,84	0,09185135	502,45
1588,8	1145,4	11,454	24149,76	0,09297297	503,12
1590,8	1153,8	11,538	24180,16	0,09410811	503,75
1593,1	1162,1	11,621	24215,12	0,09522973	504,48
1594,9	1170,2	11,702	24242,48	0,09632433	505,05
1596,8	1176,8	11,768	24271,36	0,09721622	505,65
1598,8	1185	11,85	24301,76	0,09832433	506,28
1600,6	1193,5	11,935	24329,12	0,09947297	506,85
1602,5	1201,7	12,017	24358	0,10058108	507,45
1604,3	1209,4	12,094	24385,36	0,10162162	508,02
1605,9	1216,8	12,168	24409,68	0,10262162	508,53
1607,6	1225,1	12,251	24435,52	0,10374324	509,07
1609,1	1233,4	12,334	24458,32	0,10486487	509,54
1610,7	1241,1	12,411	24482,64	0,10590541	510,05
1612,5	1249	12,49	24510	0,10697297	510,62
1614,2	1257,3	12,573	24535,84	0,1080946	511,16
1615,5	1265	12,65	24555,6	0,10913514	511,57
1617	1273	12,73	24578,4	0,11021622	512,05
1618,6	1281	12,81	24602,72	0,1112973	512,55
1620,2	1289,1	12,891	24627,04	0,11239189	513,06
1621,5	1297,2	12,972	24646,8	0,11348649	513,47
1622,9	1305,3	13,053	24668,08	0,11458108	513,91
1624	1313,5	13,135	24684,8	0,11568919	514,26
1625,6	1321,3	13,213	24709,12	0,11674324	514,77
1627	1329,3	13,293	24730,4	0,11782433	515,21
1628,3	1337,2	13,372	24750,16	0,11889189	515,62
1629,5	1345,2	13,452	24768,4	0,11997297	516,00
1630,8	1352,8	13,528	24788,16	0,121	516,42
1632,4	1360	13,6	24812,48	0,12197297	516,92
1633,6	1368,3	13,683	24830,72	0,1230946	517,30
1634,8	1376,3	13,763	24848,96	0,12417568	517,68
1635,6	1384,4	13,844	24861,12	0,12527027	517,94
1636,6	1392,4	13,924	24876,32	0,12635135	518,25
1637,3	1399,2	13,992	24886,96	0,12727027	518,47
1638,2	1407,4	14,074	24900,64	0,12837838	518,76
1639,5	1415,3	14,153	24920,4	0,12944595	519,175
1640	1423,5	14,235	24928	0,13055405	519,33
1640,7	1431,2	14,312	24938,64	0,1315946	519,55
1641,6	1438,5	14,385	24952,32	0,13258108	519,84
1642,7	1446,6	14,466	24969,04	0,13367568	520,18

1643,8	1454,5	14,545	24985,76	0,13474324	520,53
1644,7	1462,5	14,625	24999,44	0,13582433	520,82
1645,7	1470,6	14,706	25014,64	0,13691892	521,13
1646,5	1477,9	14,779	25026,8	0,13790541	521,39
1647,1	1485,2	14,852	25035,92	0,13889189	521,58
1647,6	1492,9	14,929	25043,52	0,13993243	521,74
1648,1	1500,4	15,004	25051,12	0,14094595	521,89
1648,5	1507,8	15,078	25057,2	0,14194595	522,02
1648,6	1515,9	15,159	25058,72	0,14304054	522,05
1649	1523,5	15,235	25064,8	0,14406757	522,18
1649,5	1531,7	15,317	25072,4	0,14517568	522,34
1649,9	1539,5	15,395	25078,48	0,14622973	522,46
1650,7	1547,2	15,472	25090,64	0,14727027	522,72
1651,5	1554,8	15,548	25102,8	0,1482973	522,97
1651,9	1562,3	15,623	25108,88	0,14931081	523,10
1651,9	1570,5	15,705	25108,88	0,15041892	523,10
1652	1577,7	15,777	25110,4	0,15139189	523,13
1652,2	1585,7	15,857	25113,44	0,15247297	523,19
1652,3	1593,9	15,939	25114,96	0,15358108	523,22
1652,3	1601,5	16,015	25114,96	0,15460811	523,22
1652,6	1609,2	16,092	25119,52	0,15564865	523,32
1652,7	1617,2	16,172	25121,04	0,15672973	523,35
1652,8	1625,1	16,251	25122,56	0,1577973	523,38
1652,8	1632,7	16,327	25122,56	0,15882433	523,38
1652,7	1639,6	16,396	25121,04	0,15975676	523,35
1653	1647,6	16,476	25125,6	0,16083784	523,45
1653	1655,7	16,557	25125,6	0,16193243	523,45
1652,9	1663,6	16,636	25124,08	0,163	523,41
1652,9	1671,4	16,714	25124,08	0,16405405	523,41
1652,8	1679,4	16,794	25122,56	0,16513514	523,38
1652,6	1687,3	16,873	25119,52	0,1662027	523,32
1652	1695	16,95	25110,4	0,16724324	523,13
1650,7	1710,8	17,108	25090,64	0,16937838	522,72
1650	1718,7	17,187	25080	0,17044595	522,5
1649,4	1726,6	17,266	25070,88	0,17151351	522,31
1648,3	1734,3	17,343	25054,16	0,17255405	521,96
1647,2	1742,1	17,421	25037,44	0,17360811	521,61
1646,1	1750,1	17,501	25020,72	0,17468919	521,26
1644,6	1758,1	17,581	24997,92	0,17577027	520,79
1642,7	1766,2	17,662	24969,04	0,17686487	520,18
1640,4	1774,1	17,741	24934,08	0,17793243	519,46
1637,7	1782	17,82	24893,04	0,179	518,60
1634,7	1790	17,9	24847,44	0,18008108	517,65
1631,8	1797,8	17,978	24803,36	0,18113514	516,73
1628,6	1805,5	18,055	24754,72	0,18217568	515,72

1624,8	1812,7	18,127	24696,96	0,18314865	514,52
1620,8	1820,1	18,201	24636,16	0,18414865	513,25
1616,4	1828,4	18,284	24569,28	0,18527027	511,86
1611,5	1836,6	18,366	24494,8	0,18637838	510,30
1606,1	1844,8	18,448	24412,72	0,18748649	508,59
1600,5	1853,1	18,531	24327,6	0,18860811	506,82
1594,2	1861,2	18,612	24231,84	0,1897027	504,83
1587,6	1869,4	18,694	24131,52	0,19081081	502,74
1580,7	1877,3	18,773	24026,64	0,19187838	500,55
1573,3	1885,3	18,853	23914,16	0,19295946	498,21
1565,6	1893,6	18,936	23797,12	0,19408108	495,77
1557,4	1901,8	19,018	23672,48	0,19518919	493,17
1548,4	1909,9	19,099	23535,68	0,19628378	490,32
1538,7	1918,2	19,182	23388,24	0,19740541	487,25
1528,5	1926,6	19,266	23233,2	0,19854054	484,02
1517,5	1935	19,35	23066	0,19967568	480,54
1505,8	1943,3	19,433	22888,16	0,2007973	476,83
1492,9	1952	19,52	22692,08	0,20197297	472,75
1479,4	1960,6	19,606	22486,88	0,20313514	468,47
1465,1	1968,9	19,689	22269,52	0,20425676	463,94
1449,7	1977,7	19,777	22035,44	0,20544595	459,07
1433,6	1986,5	19,865	21790,72	0,20663514	453,97
1415,8	1995,4	19,954	21520,16	0,20783784	448,33
1396,7	2004,2	20,042	21229,84	0,20902703	442,28
1375,8	2013,6	20,136	20912,16	0,2102973	435,67
1352,2	2023,3	20,233	20553,44	0,21160811	428,19
1326	2033,2	20,332	20155,2	0,21294595	419,9
1296,1	2041,9	20,419	19700,72	0,21412162	410,43

b) La courbe obtenue

La courbe tracée lors de l'essai est de la forme : $\sigma = f(\epsilon)$, La fig. IV.10 représente le diagramme conventionnel de traction d'une éprouvette en acier XC38 donné par les deux capteurs.

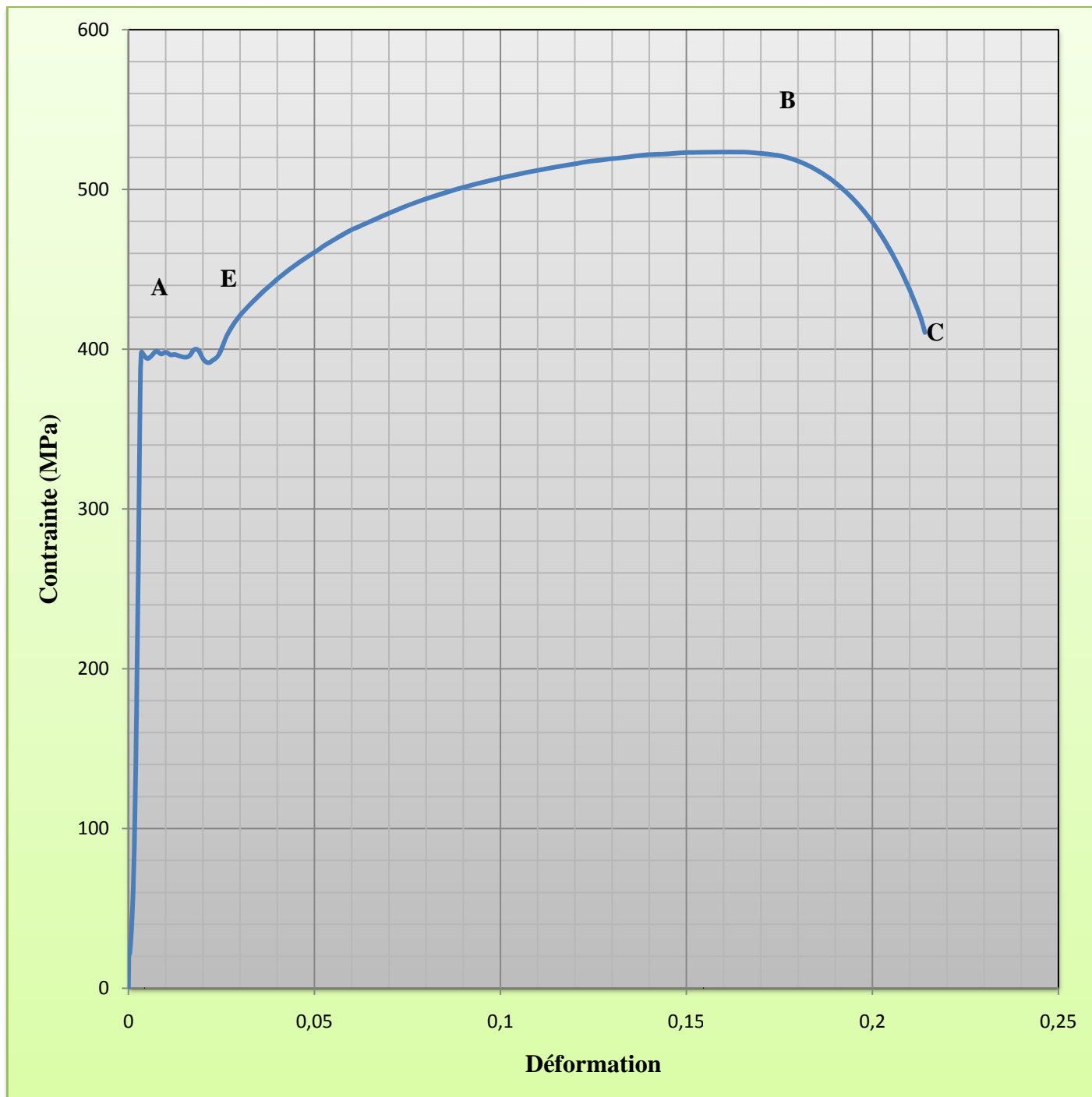


Fig IV. 10 : Courbe de traction de l'essai de validation

c) Exploitations de l'essai

➤ Interprétation qualitative

Sur le diagramme contrainte-déformation, on observe les phases successives suivantes :

Différentes zones de la courbe obtenue :

- O à A : zone de déformation élastique (réversible)
- A à E : palier de plasticité (présence d'un acier doux dans notre cas)
- E à B : zone de déformation plastique répartie
- B à C : zone de déformation plastique non répartie. Il y a striction de l'éprouvette jusqu'à la rupture (en C) (figure IV.11).

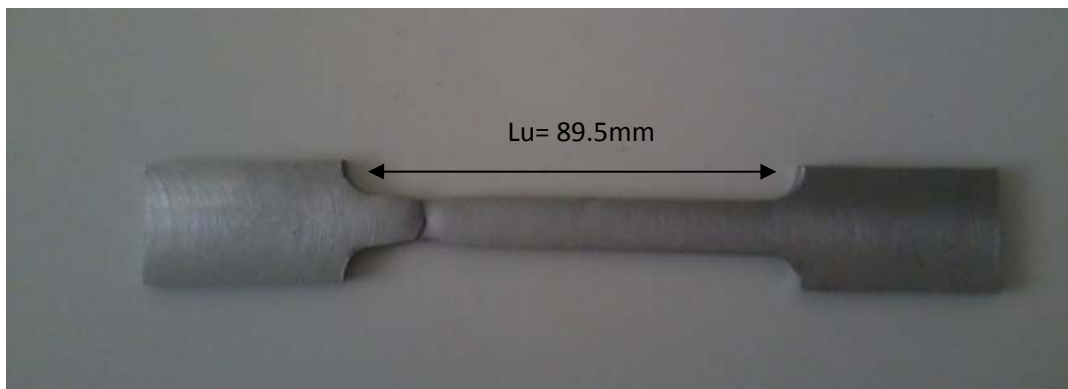


Fig IV.11 : Eprouvette de traction après rupture

➤ Identification des caractéristiques mécaniques de l'éprouvette

• Détermination du module d'Young

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.

Lorsqu'on trace la courbe de σ en fonction de ϵ dans la zone élastique, la pente de la courbe est donnée par $\text{tg } \alpha$.

Le module d'Young (E) obtenue lors de l'essai qu'on a réalisé est proportionnel à la pente de la droite dans la zone élastique.

$$E = \text{tg} \alpha = 202482.57 \text{ MPa}$$

- **La résistance à la traction**

Correspond à la contrainte maximale supportée par le matériau et est :

$$\sigma_m = \frac{F_m}{S_0} = 525 \text{ MPa}$$

- **La limite élastique**

On voit sur la courbe de traction la présence d'un crochet et de palier à la limite élastique, pour ça on détermine deux limites élastiques (supérieure et inférieure).

$$\sigma_{eH} = \frac{F_{eH}}{S_0} = \frac{27236}{48} = 400 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{eL} = \frac{F_{eL}}{S_0} = \frac{26917}{48} = 395 \text{ MPa}$$

- **L'allongement à la rupture**

$$A\% = 100 \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{89.5 - 74}{74} = 20\%$$

Tableau IV.3 : Validation des résultats

Caractéristiques mécaniques	Acier XC38 recuit	Acier de l'éprouvette utilisé
Module de YOUNG [MPa]	180000 à 220000	202482.57
Limite élastique [MPa]	335 à 490	400
Résistance à la traction [MPa]	570 à 830	525
Allongement à la rupture (%)	16 à 20	20

On remarque que les résultats expérimentaux obtenus sont plus proches des valeurs théoriques. Sauf la valeur de la résistance à la traction ; n'est pas dans le domaine de mesure, peut être due aux erreurs de mesure ou l'usinage des éprouvettes.

IV.9 Caractéristiques mécaniques des matériaux utilisés

Pour avoir le dispositif de fixation le plus léger possible, nous avons utilisé de l'alpax qui a les propriétés chimiques et mécaniques suivantes [6] :

Composition chimique :

AL. Si 12 (Cu)

Avec 11-13% Si

1% maxi Fe, 0.8% Cu, 85.2-87.2% AL

Caractéristiques mécaniques :

- Limite élastique : 0.2%
80-100 N/mm²
- Résistance à la rupture :
150-210 N/mm²

La lame est de l'acier d'usage général (E36). C'est caractéristiques mécaniques sont les suivantes :

$E=210000$ MPa

La limite élastique $Re=360$ MPa

La résistance à la traction $Rm=490$ MPa

L'éprouvette est réalisée avec l'acier (XC38) dont les caractéristiques mécaniques suivantes :

$E=180000$ à 210000 MPa

$\sigma_e = 335$ à 490 MPa

$\sigma_m = 570$ à 830 MPa

$A\% = 16$ à 20 %.

Conclusion générale

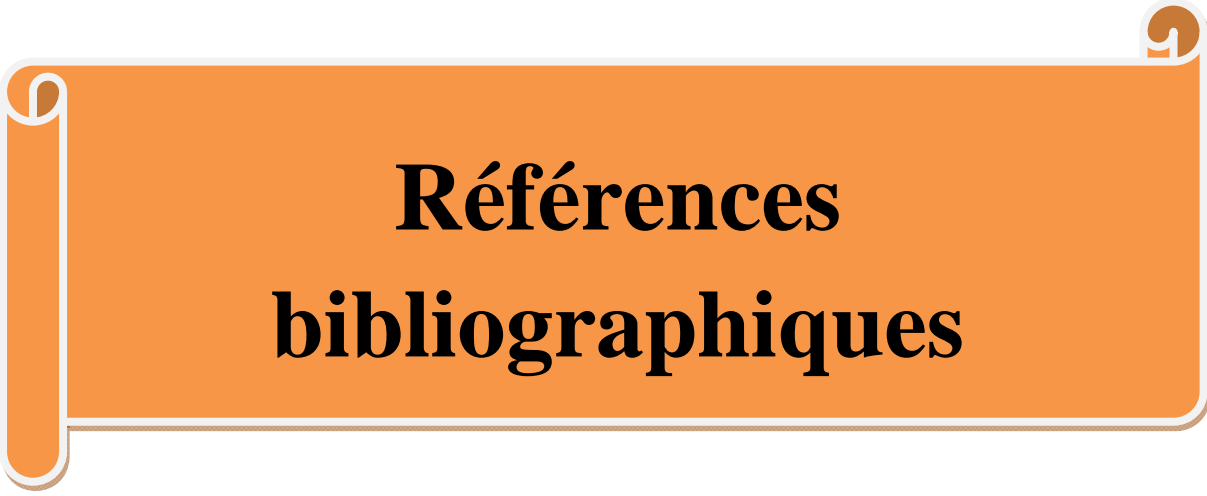
Conclusion

Dans le cadre de la présente étude, nous avons été amené à réaliser un capteur de déplacement à jauges d'extensométrie qui nous a permis d'améliorer les performances de la machine de traction existante au niveau du labo de RDM, et mesurer les déplacements à grand précision.

En effet, les essais que nous avons réalisés nous ont permis de tracer la courbe de traction, et déterminer les caractéristiques mécaniques du matériau de l'éprouvette utilisée lors de l'essai de traction. Malgré quelques imperfections dues notamment à des problèmes de glissement de l'éprouvette sur les mors, nous pouvons admettre que les résultats obtenues lors de ces essais sont suffisamment proches de celles donnés par les essais normalisés.

Cependant, il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions pour améliorer la qualité de la mesure, par exemple : La géométrie de l'éprouvette, ajustement des jauges extensométriques, vitesse de mise en charge (déplacement de la traverse de la machine de traction), alignement des mors de la machine de traction. (Afin de tirer dans l'axe de l'éprouvette), glissement de l'éprouvette sur les mors, les vibrations et les parasites de la machine de traction.

Pour éviter le problème de glissement de l'éprouvette sur les mors qui influent sur la mesure des déplacements, nous souhaiterons de réaliser un capteur de déplacement lié à l'éprouvette.

A large orange scroll graphic with a white border and decorative scroll ends on the left and right sides. The text is centered within the scroll.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

[1]- G. Asch, les capteurs en instrumentation industrielle.

Edition DUNOD, cinquième édition (1999).

[2]- J.L. Le GOËR, J. Avril, « capteurs à jauges extensométriques », techniques de l'ingénieur R1860 (1992)

[3]- S.GHELID et N. HADDAD.

Projet de fin d'étude

Etude et réalisation d'un capteur à jauges d'extensométrie

Institut de Génie-mécanique de l'université de Tizi-ouzou

Promotion : 1998.

[4]- F. RABAH

Projet de fin d'étude

Conception et réalisation d'un capteur de déformation pour éprouvette spéciale en traction

Institut de Génie-mécanique de l'université de Tizi-ouzou

Promotion : 1998

[5]- Notice d'utilisation des jauges HBM.

[6]- Guide des sciences et technologies industrielles, Jean-louis fanchon

[7]- mode d'emploi de la presse universelle MP12 modèle Zi.

[8]- CI 3 les chemins de l'information

Les Jauges d'extensométrie.

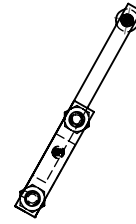
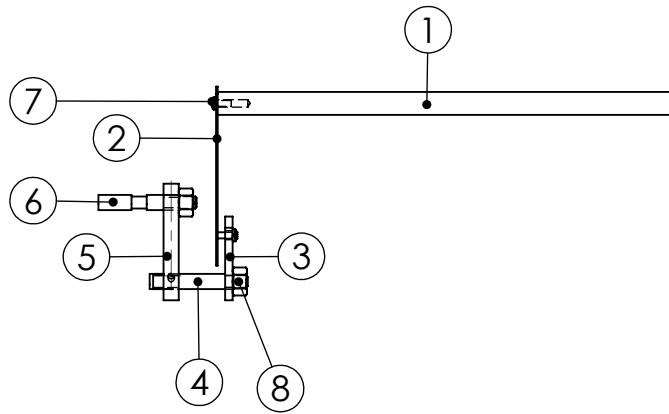
[9]- Les capteurs en instrumentation industrielle, G. Asch et al. Dunod, pages 377-408, 1983.

[10]- Propriétés mécaniques des Biomatériaux utilisés en Odontologie.

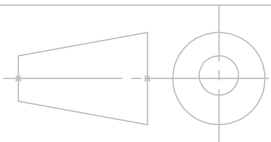
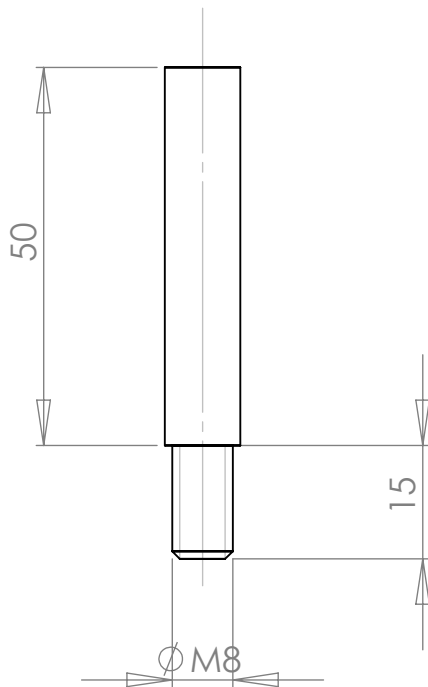
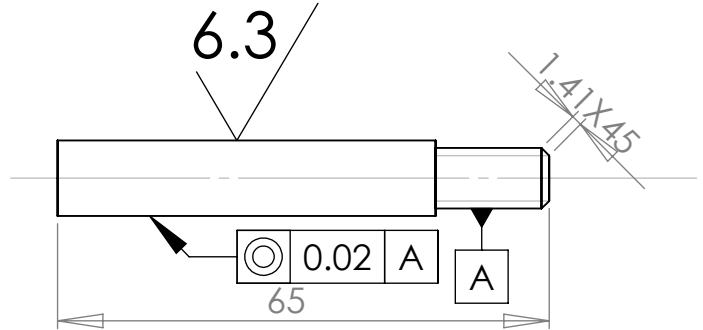
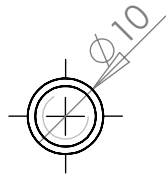
Société Francophone de Biomatériaux Dentaires

B. JACQUOT

- © Université Médicale Virtuelle Francophone -



8	2	Ecrou H	XC38
7	2	Vis CHC \varnothing M6x20	XC38
6	1	Boulon2	AL
5	1	Support superieur	AL
4	1	Boulon1	AL
3	1	Support inferieur	AL
2	1	La lame	E36
1	1	La tige	XC48
Numéro	Nombre	Désignation	Materiau
	CAPTEUR DE DEPLACEMENT		BOUMRAH.F
ECHELLE 1/5	U.M.M.T.O		C.M



BOULON

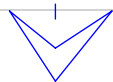
BOUMRAH.F

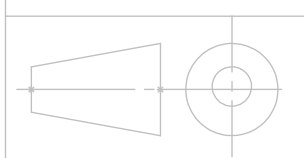
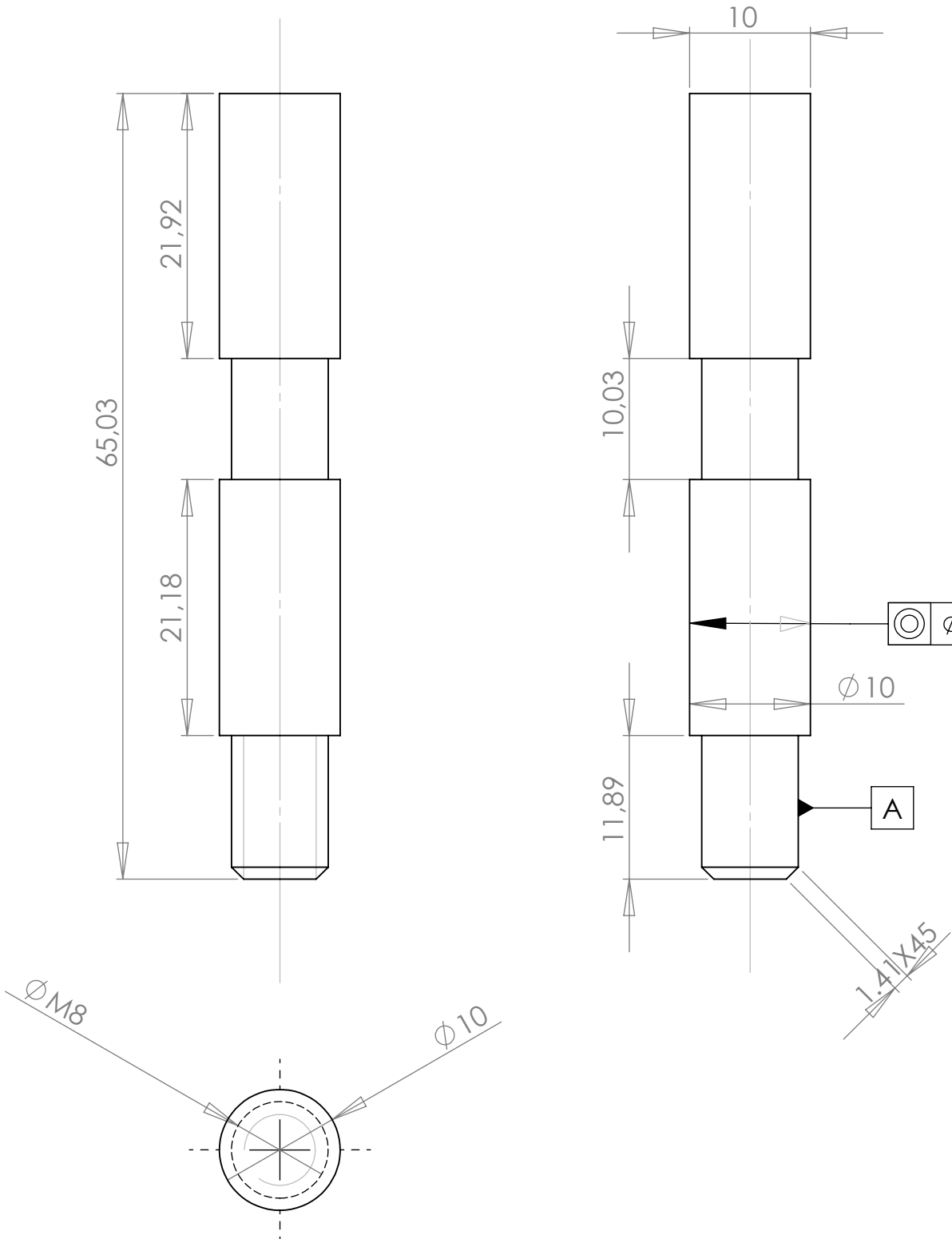
15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M





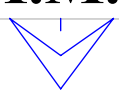
BOLLON

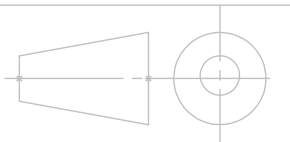
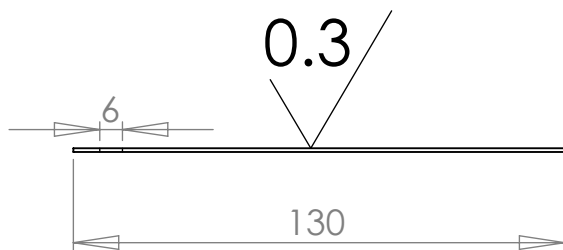
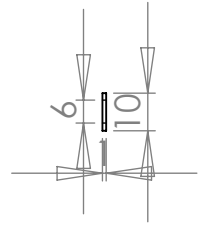
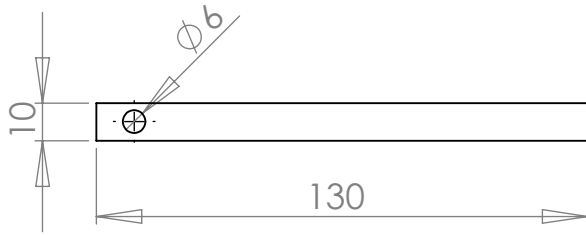
BOUMRAH.F
15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M





LAME FLECHIE

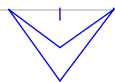
BOUMRAH.F

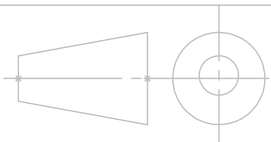
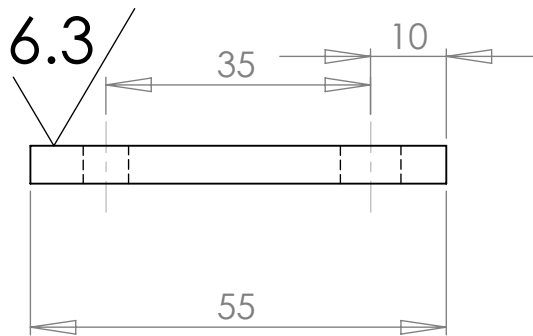
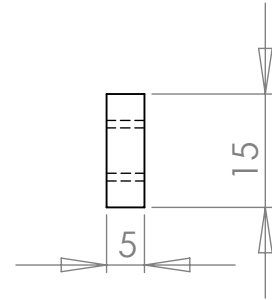
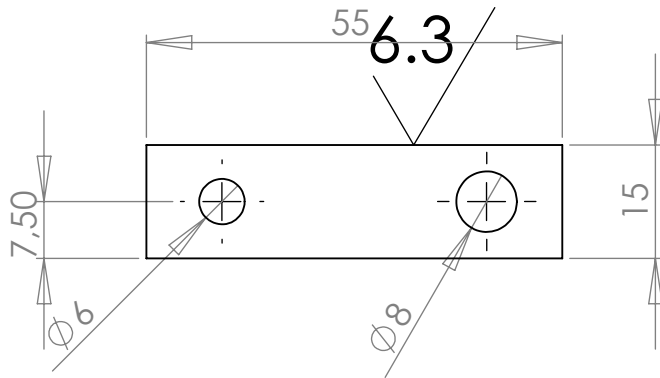
15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M





SUPPORT INFERIEUR

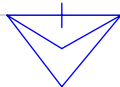
BOUMRAH.F

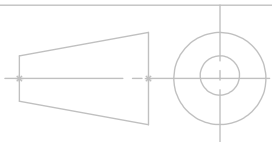
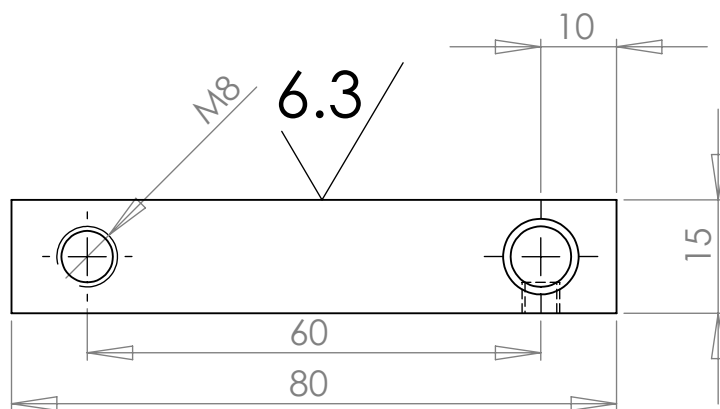
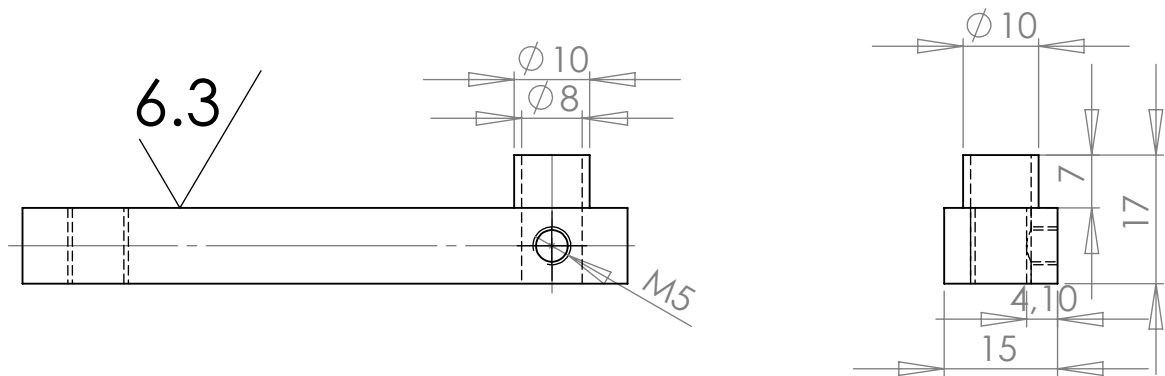
15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M





SUPPORT SUPPERIEUR

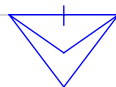
BOUMRAH.F

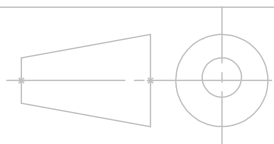
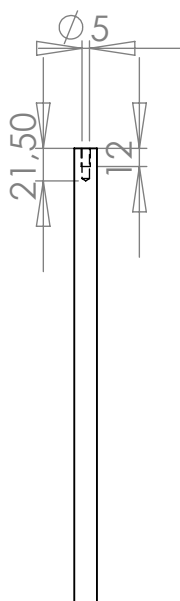
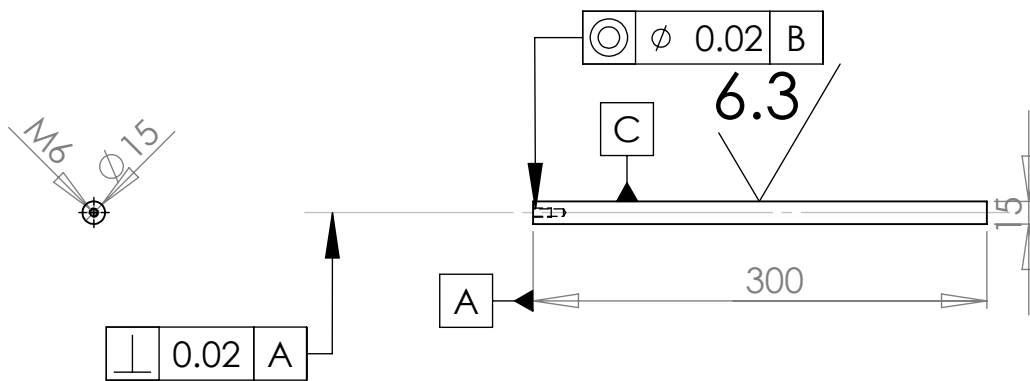
15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M





LA TIGE

BOUMRAH.F

15/09/2012

ECHELLE 1/1

U.M.M.T.O

C.M

