

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE.

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique.

Université MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU.

Faculté de Génie de la Construction.

Département de Génie Mécanique.



Mémoire

**Présenté en vue de l'obtention du diplôme
de MASTER en Génie-Mécanique**

**Option :
Construction Mécanique.**

**Thème :
Conception et réalisation d'un capteur
de force.**

Réalisé par :

MR REBOUT Yacine

Dirigé par :

MR BILEK Ali

Promotion 2011-2012

REMERCIEMENTS

Je remercie Dieu avant tout.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon encadreur Dr. Ali BILEK qui a su guider ce travail par ses conseils avisés et qui a bien voulu m'aider dans ce mémoire. Je le remercie également pour ses encouragements et pour toutes les connaissances que j'ai acquises à ses côtés.

J'adresse également mes remerciements au membre du jury, à Mr S.LARBI, président du jury, ainsi qu'à Mr S. DJEBALI et Mr A. MOHELBI pour m'avoir fait l'honneur d'être membres du jury de soutenance.

Je remercie aussi tout le personnel du labo de R.D.M à Mr AHMED ZAID Amar plus particulièrement, pour son aide et conseils précieux.

Je remercie très chaleureusement mon père et ma mère et toute la famille.

Un grand remerciement à tous les enseignants du Département de Génie Mécanique, à mes collègues et à tous mes amis.

DEDICACES

Je dédie le fruit de mon travail aux êtres les plus chers au monde :

- A mes parents pour leur compréhension, leur amour et leurs sacrifices pour me voir réussir, qu'ils trouvent en ce modeste travail le témoignage de ma reconnaissance,
- A toute ma famille,
- A mes collègues, mes amis et tous ceux qui me connaissent.

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

Chapitre I : Quelques notions sur la pression

I.1 :	Introduction	2
I.1.1:	définitions	2
I.1.2:	les différentes unités de la pression	2
	a) Le kilogramme par centimètre carré	
	b) l'atmosphère normale	
	c) le millimètre de mercure	
	d) le millimètre d'eau	
	e) l'inch of mercury	
	f) le psi	
I.1.3:	définitions des différentes pressions	3
I.1.3-1:	Pression absolue	
I.1.3-2:	Pression atmosphérique ou barométrique	
I.1.3-3:	Pression relative	
I.1.3-4:	Pression différentielle	
I.1.3-5:	Le vide	
I.1.3-6:	Pression de service	
I.1.4 :	pression pour les fluides (liquides et gaz)	3
I.1.4-1 :	Pression hydrostatique	
I.1.4-2 :	Pression due a des forces extérieures	
I.1.4-3 :	Pression totale-charge	
I.2 :	Mesure de la pression	4
I.2.1 :	Identification des instruments de mesure	4
I.2.1.1 :	Capteur de pression	5
I.2.1.2 :	Le transmetteur	5
I.2.1.3 :	Le manomètre	5
I.3 :	Différentes parties d'un instrument de mesure	6
I.3.1 :	Le senseur	6
I.3.2 :	Le circuit de mesure	6
I.3.3 :	Conditionneur de signale et traitement	6
I.3.4 :	Intégration	7

Chapitre II : Les capteurs

II.1 :	Introduction	8
II.2 :	éléments de la chaine de mesure	8

II.2.1 :	Capteur	
II.2.1 :	Transducteur	
II.2.1 :	Transmetteur	
II.2.1 :	Chaîne de mesure	
II.2.1 :	Instruments de mesure	
II.2.1 :	Evaluation	
II.3 :	Quelques caractéristiques métrologiques des capteurs	9
II.3.1 :	<i>L'étendue de la mesure</i>	
II.3.2 :	<i>La sensibilité</i>	
II.3.3 :	<i>La rapidité</i>	
II.3.4 :	<i>La précision</i>	
II.4 :	Conditions de fonctionnement d'un capteur	9
II.4.1 :	Domaine nominal d'emploi	
II.4.2 :	Domaine de non-détérioration	
II.4.3 :	Domaine de non-destruction	
II.5 :	Types de capteurs	10
II.5.1 :	Capteurs extensométriques	10
II.5.2 :	Capteurs à effet piézoélectrique	10
II.5.3 :	Capteurs à effet potentiométriques	11
II.5.3 :	Capteurs à effet HALL	12
II.6 :	Choix d'un capteur	12

Chapitre II : Les capteurs à jauges extensométriques

III.1 :	Introduction	13
III.2 :	Principe des jauges extensométriques	13
III.3 :	Quelques principes de capteurs à jauges extensométriques	14
III.3.1 :	Schéma électrique des capteurs	16
III.3.1.1 :	Montage en pont	16
III.3.1.2 :	Disposition des jauges	17
III.4 :	Conception mécanique des capteurs	18
III.4.1 :	Calcul des capteurs	18
III.4.2 :	Métal du corps d'épreuve	18
III.4.2.1 :	Déformations appliquées	18
III.4.2.1 :	Phénomène thermique	19
III.4.3 :	Imperfections mécaniques des capteurs	19
III.4.3.1 :	Le frottement	
III.4.3.2 :	Les jeux	
III.4.3.3 :	Instabilité élastique	
III.5 :	Recherche des formes optimales pour les capteurs	20

III.6 :	Terminologies usuelles relatives aux capteurs	21
---------	---	----

Chapitre IV : Conception et réalisation du capteur de pression

IV.1 :	Introduction	23
IV.2 :	Corps d'épreuve	23
IV.2.1 :	Calcul du corps d'épreuve	23
IV.2.1.1 :	Calcul des contraintes principales	24
	1) Pour la partie 1 du tube	
	2) Pour la partie 2 du tube	
IV.2.1.2 :	Calcul de l'épaisseur du tube	26
IV.2.1.3 :	Hypothèse de modélisation	26
IV.2.2 :	Application numérique	26
IV.2.3 :	Déformations dues aux forces de pression	27
IV.2.3 :	Représentation graphiques des contraintes	28
IV.3 :	Collage de la jauge	29
IV.4 :	Etalonnage du capteur	30
IV.4.1 :	Principe	30
IV.4.2 :	Déroulement de l'étalonnage	30

Chapitre V : Essai de traction

V.1 :	Introduction	32
V.2 :	Les éprouvettes	32
V-2.1 :	Dimension des éprouvettes	32
V.3 :	Les machines de traction	34
V-3.1 :	Vitesse de l'essai	35
V.3.1 :	Machine de traction OEHLGASS	35
	• Spécifications	
	• Caractéristiques techniques	
V.3.2 :	Dimension des éprouvettes	38
V.4 :	Exploitations de l'essai	38
V.4.1 :	Diagramme de traction	38
V.4.2 :	Caractéristiques mécaniques	40
V.4.2.1 :	Module de YOUNG	40
V.4.2.2 :	Limite élastique conventionnelle $R_{P0,2}$	40
V.4.2.3 :	<i>La résistance à la traction R_m</i>	41
V.4.2.4 :	<i>L'allongement à la rupture A</i>	41
V.4.2.5 :	La striction	42
V.4.2.6 :	la ductilité	42

V.4.2.7 : la ténacité	43
V.4.2.8 : La rigidité	43
V.5 : Réalisation d'un essai de traction	44
V.5.1 : Interprétation des données	51
V.5.2 : Estimation de la précision des résultats	51
V : Conclusion	52
VI : Fiche technique	53
VIII : Références Bibliographiques	56

Introduction

Dans le domaine de l'automobile et de l'industrie en général, les capteurs ont désormais une importance primordiale. Ils constituent les « organes des sens » d'un véhicule ou d'une machine. Leurs signaux sont devenus indispensables pour de nombreuses fonctions de commande et de régulation des différents systèmes de gestion du moteur, de la suspension, de la sécurité ou du confort.

Le domaine des capteurs est extrêmement vaste et intéressant. La conception d'un capteur fait appel à toutes les ressources offertes par des disciplines scientifiques et techniques aussi variées que la mécanique, l'électromécanique, l'optique, l'informatique, la chimie etc.

Nous disposons, au niveau du laboratoire R.D.M de l'institut de Génie Mécanique, d'une machine hydraulique de traction compression qui ne peut être utilisée avec une grande précision pour caractériser des matériaux, celle-ci est dépourvue d'instruments d'enregistrements sous forme de données numériques des résultats des essais en forces et déformations.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et réaliser un capteur de force fonctionnant en traction et compression.

Munis de jauges de contraintes et d'instruments d'acquisition, nous avons imaginé un capteur à jauges d'extensométrie répondant mieux au type de sollicitation du corps d'épreuve qui est un cylindre branché à la canalisation hydraulique de la machine de traction. La variation de résistance de la jauge, qui résulte de son allongement, nous permet de connaître précisément la sollicitation exercée sur le corps d'épreuve, donc de l'effort appliqué sur l'éprouvette.

Au cours de ce travail, nous verrons :

Au chapitre I, quelques notions sur la pression, les différentes pressions existantes ainsi que les moyens et instruments de mesure.

Au second chapitre nous verrons quelques définitions relatives aux capteurs et quelques techniques de transduction existant. Nous verrons ensuite chapitre III, plus en détail, les capteurs à jauges d'extensométrie.

Le quatrième chapitre détaille la conception du capteur, tel le choix des paramètres physiques et le dimensionnement du capteur. Nous procéderons ensuite au montage et à l'étalonnage du capteur.

Le chapitre V est consacré à la mise à l'épreuve du capteur de force, en réalisant un essai de traction. À l'aide d'un capteur de déformations (objet d'un mémoire réalisé en parallèle par un autre étudiant) on tracera la courbe contrainte déformation du matériau utilisé pour l'essai de validation des capteurs.

Nous terminerons enfin notre travail par une conclusion générale où seront rassemblés nos principaux résultats et quelques perspectives.

I.1 : introduction

La pression est un paramètre important dans de nombreuses disciplines, mais est surtout très importante dans l'industrie si on y regarde tout son étendu dans ce domaine.

La présente section définit la pression d'après la façon dont elle s'applique et dont on la mesure dans l'industrie.

I.1.1 : Définition de la pression

Dans un fluide au repos, ou dans un fluide parfait, la pression P qui règne en un point donné est définie à partir de la force élémentaire \vec{dF} s'exerçant suivant la normale \vec{n} à un élément de surface dS centré en ce point :

$$P = \lim_{dS \rightarrow 0} \left(\frac{dF}{dS} \right) \quad (I.1)$$

Avec $\vec{dF} = dF \cdot \vec{n}$

La grandeur ainsi définie ne dépend pas de l'orientation de l'élément dS au point considéré. La norme X 02.006 définit plus simplement la pression comme étant le quotient d'une force par une surface: [1]

$$P = \frac{F}{S} \quad (I.2)$$

I.1.2 : Les différentes unités de pression

L'équation aux dimensions de la pression résulte directement de la définition. Elle s'écrit :

$$[P] = ML^{-1}T^{-2} \quad (I.3)$$

Avec M : masse, L : longueur, T : temps.

L'unité légale du système international est le **pascal**(Pa) ou newton par mètre carré. On peut utiliser le kilo pascal (KPa) et le méga pascal (MPa), mais souvent le **bar** est encore utilisé :

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ mbar} = 10^{-3} \text{ bar} = 10^2 \text{ Pa}$$

Autres unités (à proscrire) rencontrées sur les notices d'appareils :

- le kilogramme par centimètre carré

$$1 \text{ kg/cm}^2 = 0,980 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- l'atmosphère normale :

$$1 \text{ atm} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- le millimètre de mercure :

$$1 \text{ mmHg} = 133,3 \text{ Pa}$$

- le millimètre d'eau :

$$1 \text{ mm H}_2\text{O} = 9,81 \text{ Pa}$$

- l'inch of mercury :

$$1 \text{ inch Hg} = 3386 \text{ Pa}$$

- le psi (poundforce per square inch) :

$$1 \text{ psi} = 6895 \text{ Pa}$$

I.1.3 : Définition des différentes pressions

I.1.3.1 : La pression absolue : C'est la pression réelle, dont on tient compte dans les calculs sur les gaz.

I.1.3.2 : La pression atmosphérique ou pression barométrique : La pression atmosphérique moyenne au niveau de la mer, à 15°C, est d'environ 1013 mbar. Elle peut varier, de ± 25 mbar, avec la pluie ou le beau temps. Elle est fonction de l'altitude (hydrostatique).

I.1.3.3 : La pression relative : C'est la différence de pression par rapport à la pression atmosphérique. Elle est le plus souvent utilisée, car la plupart des capteurs, sont soumis à la pression atmosphérique. Pour mesurer une pression absolue, il faut faire un vide poussé dans une chambre dite de référence.

I.1.3.4 : Pression différentielle : C'est une différence entre deux pressions, dont l'une sert de référence. Une pression différentielle peut prendre une valeur négative.

I.1.3.5 : Le vide : Il correspond théoriquement à une pression absolue nulle. Il ne peut être atteint, ni dépassé. Quand on s'en approche, on parle alors de vide poussé.

I.1.3.6 : Pression de service ou pression dans la conduite : C'est la force par unité de surface exercée sur une surface par un fluide s'écoulant parallèlement à la paroi d'une conduite.

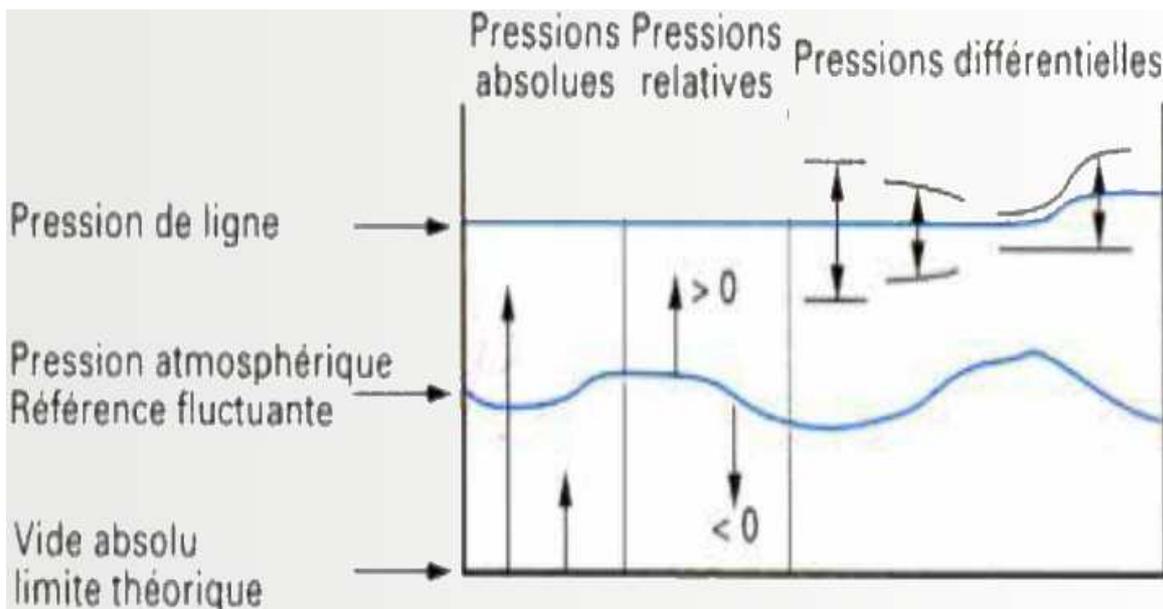


Figure I.1 : Référentiels de pression.

I.1.4 : Pression pour les fluides (liquide et gaz)

I.1.4.1 : Pression hydrostatique : à l'intérieur d'une colonne de fluide se crée une pression due au poids de la masse du fluide sur la surface considérée. Pour chacun des quatre récipients représentés sur la figure I.2, la pression au fond de ceux-ci est identique est égale à :

$$P_{(pa)} = \rho_{(kg/m^3)} \cdot g_{(m/s^2)} \cdot h_{(m)} \quad (I.4)$$

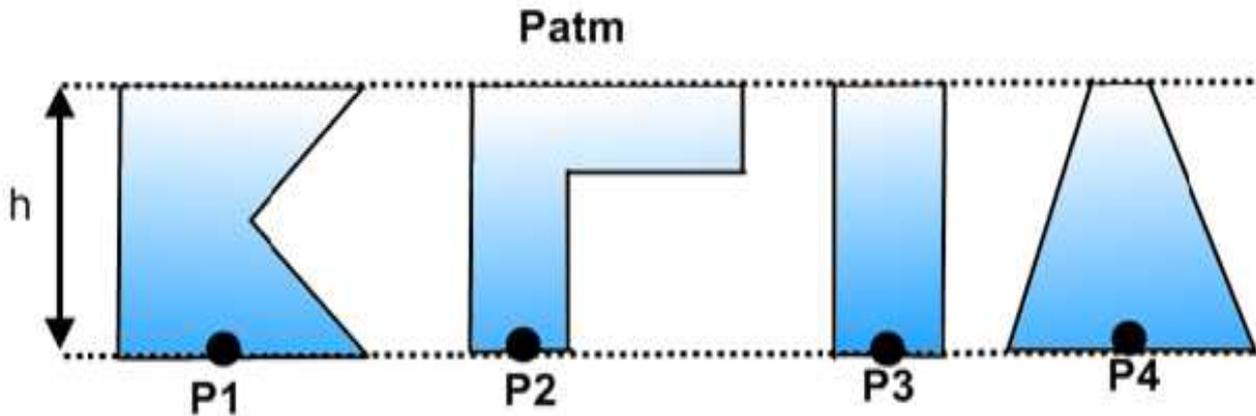


Figure I.2 : Pression hydrostatique.

I.1.4.2 : Pression due à des forces extérieures : Un fluide se déplaçant à une vitesse V crée une pression supplémentaire P :

$$P_{(pa)} = 0,5 \cdot \rho_{(kg/m^3)} \cdot V^2_{(m/s)} \quad (I.5)$$

I.1.4.3 : Pression totale Charge : C'est la somme de la pression hydrostatique, de la pression due aux forces extérieures et de la pression hydrodynamique. Celle-ci a la même valeur en tous points pour un fluide en mouvement horizontal (incompressible de viscosité négligeable), c'est le théorème de Bernoulli.

$$P_{(pa)} + \rho_{(kg/m^3)} \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho V^2_{(m/s)} = \text{constante le long de la trajectoire} \quad (I.6)$$

Sous cette forme, chaque terme est homogène à une pression.

La pression proprement dite, p , est appelée **pression statique** ; le groupement $p + \rho \cdot g \cdot h$ est appelé **pression motrice** ou **pression génératrice** (notée P_g) ; le terme $0,5 \cdot \rho V^2$ est la **pression dynamique** (notée P_d) ; la somme de la pression motrice et de la pression dynamique est appelée **pression totale** (notée P_t). La pression totale représente en fait l'énergie mécanique totale, par unité de volume, de la particule en mouvement.

I.2 Mesure de la pression

La mesure de pression est considérée comme la variable de procédé essentielle en ce qu'elle est utilisée pour la mesure du débit (différence de deux pressions), du niveau (différence de deux niveaux ou contre-pression) et même de la température. Tous les systèmes de mesure de pression sont constitués à la base de deux parties principales: **un élément primaire**, qui est directement ou indirectement en contact avec le milieu soumis à la pression et qui interagit avec les variations de la pression ; et **un élément secondaire**, qui traduit cette interaction en des valeurs qui pourront être utilisées dans des dispositifs indicateurs, enregistreurs et/ou régulateurs.

I.2.1 : Identification des instruments de mesure

L'évolution rapide des technologies et l'intégration toujours plus avancée des fonctions de la chaîne de mesure, par exemple les fonctions de transmission et de communication, rendent assez difficile une classification systématique des instruments existants. Nous proposons, ci-après, une classification qui tient compte à la fois de ces évolutions et des capacités de transmission des

instruments. Nous distinguons ainsi (figure I.3) trois grandes classes d'instruments : les capteurs, les transmetteurs et les manomètres.

I.2.1.1 : Le capteur de pression

C'est un ensemble transducteur qui transpose la pression suivant une loi déterminée et avec une exactitude spécifiée en une autre grandeur physique directement exploitable (souvent une tension). Il nécessite le plus souvent des unités séparées de conditionnement, qui en général ne permettent pas une exploitation du signal à longue distance. Le module primaire de transduction, parfois unique, constitue le **senseur** du capteur de pression. De telles entités mécano-déetectrices, appelées aussi **cellules de pression**, sont proposées à la vente, en l'état OEM (Original Equipment Manufacturer), pour des intégrations en grandes quantités.

I.2.1.2 : Le transmetteur

C'est un instrument qui, recevant la pression à mesurer, produit un signal de sortie **normalisé** pouvant être transmis et ayant une relation continue et définie avec la valeur de la pression mesurée (NF C 46.303). Il contient donc un senseur et des unités de conditionnement du signal. Il répond à la nécessité de centraliser les indications de pression, parfois à de longues distances des enceintes contrôlées et souvent dans des conditions d'environnement très difficiles. Ce composant d'automatisme est adapté à la circulation des informations entre les instruments et les organes de traitement (régulateurs ou systèmes numériques de contrôle commande SNCC).

I.2.1.2 : Le manomètre

C'est un instrument de mesure autonome qui fournit localement la valeur de la pression grâce à un dispositif indicateur (règle, cadran, afficheur numérique, etc.). Selon cette définition, les capteurs à afficheur peuvent être assimilés à des **manomètres électroniques**(ou numériques).

Les **manomètres mécaniques** sont des instruments à transduction entièrement mécanique plutôt réservés à la mesure de pressions permanentes(ou lentement variables) ; on distingue les **manomètres à liquide** et les **manomètres à déformation de solide** qui comportent donc un senseur mécanique.

Ces instruments sont généralement proposés dans des versions adaptées à la mesure des pressions absolues, ou relatives, ou différentielles. Cependant, la diversité ne s'arrête pas là puisque certains modèles, unidirectionnels, ne mesurent que dans un seul sens (positif ou négatif) les pressions relatives ; d'autres, bidirectionnels, sont indifférents au sens d'application de la pression. Enfin, tous ne sont pas nécessairement compatibles avec les liquides.

Notons que :

- un **vacuomètre** indique une pression relative négative ;
- un **manovacuumètre** mesure les pressions relatives positives et négatives ;
- il existe des modèles de capteur de pression différentielle liquide.liquide et gaz.liquide.

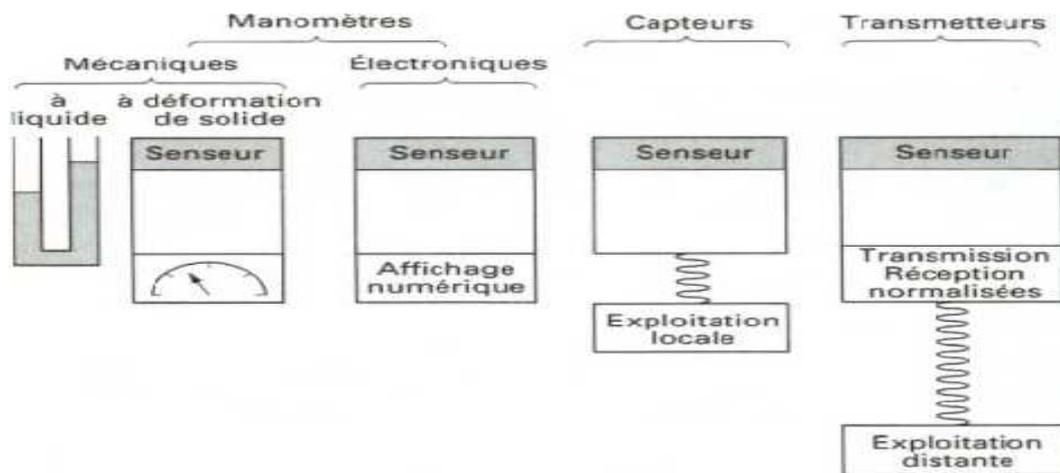


Figure I.3 : Classification des instruments de mesure de la pression.

I.3 Différentes parties d'un instrument de mesure

I.3.1 Le senseur

Le senseur est une entité mécano-déetectrice, composée d'un corps d'épreuve et d'un détecteur, sensible aux variations de pression. Le corps d'épreuve (poutre, coque, plaque ou membrane) traduit la pression à mesurer en un déplacement, des déformations ou des contraintes que le détecteur transpose à son tour en une grandeur mesurable électriquement. L'intégration corps d'épreuve-détecteur est fonction du principe physique de détection (ou de conversion) mis en œuvre. L'interface fluide-instrument est soit directement le corps d'épreuve, soit une membrane séparatrice placée devant ; le déplacement de cette membrane est alors transmis au corps d'épreuve par une liaison solide ou un volume de liquide.

I.3.2 Circuit de mesure

Le circuit de mesure constitue le premier niveau de transduction (voire de conversion) de l'instrument et/ou de la chaîne de mesure. Il comprend le(s) détecteur(s) et son conditionneur qui contient les circuits de compensation en température et de calibration.

I.3.3 Conditionneur de signal et traitement

L'ensemble détecteur-conditionneur constitue une source électrique que l'on peut modéliser sous forme d'un générateur.

Selon les cas, ce sera un générateur de tension, un générateur de courant ou un générateur de charges électriques. Il faut adapter cette source aux étages d'entrée des circuits de traitement analogique ou numérique par des interfaces de conditionnement du signal dont le rôle essentiel est d'éviter une détérioration du signal brut.

I.3.4 Intégration

L'avancée technologique permet maintenant de rapprocher de l'instrument une partie de l'électronique de conditionnement et de traitement, l'ensemble de très petites dimensions est intégré au boîtier même de l'appareil.

Le boîtier constitue l'enveloppe de l'instrument. Il contient notamment le senseur et assure par conception son isolement mécanique contre les chocs et les vibrations. En particulier, lors de l'implantation, les efforts de serrage ne doivent pas être ressentis par le corps d'épreuve.

II.1 introduction

Dans ce chapitre, nous allons rappeler brièvement le fonctionnement d'un capteur, son architecture générale, nous verrons ensuite quelques principes de détections et types de capteurs, puis nous finirons par citer quelques paramètres entrants dans le choix d'un capteur. Tout d'abord, un capteur est un dispositif qui transforme l'état d'une grandeur physique ou chimique observée (mesurande m) en une autre grandeur utilisable (signal s , le plus souvent électrique), tel que $s = F(m)$. La transformation de F se fait grâce à un corps d'épreuve sensible au mesurande qui assure une première traduction en une grandeur physique non électrique (mesurande secondaire). Grâce au transducteur, la mesurande secondaire est ensuite transformée en une grandeur électrique. [1]

L'information délivrée par un capteur pourra être logique (2 états), numérique (valeur discrète), ou analogique.

On peut caractériser les capteurs selon deux critères:

- **en fonction de la grandeur mesurée;** on parle alors de capteur de position, de température, de vitesse, de force, de pression, etc.
- **en fonction du caractère de l'information délivrée;** on parle alors de capteurs logiques appelés aussi capteurs tout ou rien (TOR), de capteurs analogiques ou numériques.

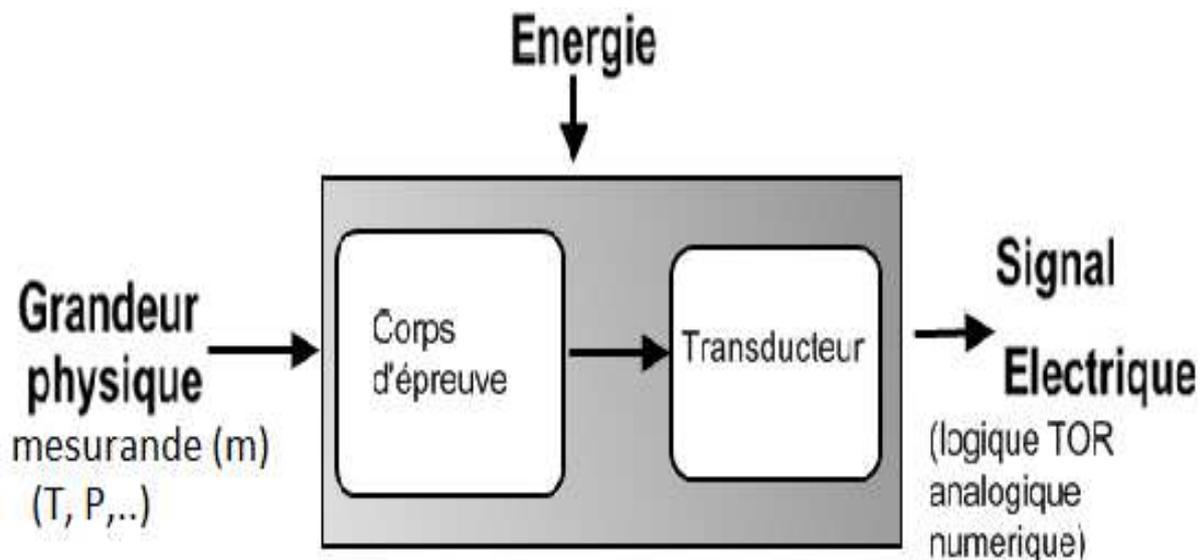


Figure II.1 : Schéma du principe d'un capteur.

II.2 Éléments de la chaîne de mesure

Les professionnels, utilisateurs et constructeurs de capteurs, ont défini dans un groupe de travail de la CIAME (Commission industrie-administration pour la mesure) le langage à utiliser :

II.2.1 Capteur. Élément d'un appareil mesureur servant à la prise d'informations relatives à la grandeur à mesurer. Selon cette définition, le capteur constitue nécessairement le premier élément transducteur.

II.2.2 Transducteur. Élément qui sert à transformer, suivant une loi déterminée, la grandeur mesurée (ou bien une grandeur déjà transformée de la grandeur mesurée) en une autre grandeur ou une autre valeur de la même grandeur avec une précision spécifiée et qui constitue un ensemble pouvant être utilisé séparément.

II.2.3 Transmetteur. Élément influencé par une grandeur physique mesurée, qui transmet un signal. Ce peut être un assemblage d'éléments constitué d'un capteur, d'un amplificateur ou d'un convertisseur qui modifie le signal suivant spécification.

II.2.4 Chaîne de mesure. Suite d'éléments transducteurs et d'organes de liaison d'un instrument de mesure allant du capteur, premier élément de la chaîne, au dispositif indicateur, de stockage ou de traitement qui en est le dernier élément.

II.2.5 Instrument de mesure. Ensemble de moyens techniques destinés à exécuter les mesures en atelier ou en laboratoire et à matérialiser les mesures.

II.2.6 Evaluation. L'évaluation consiste à constater, en utilisant des méthodes d'essais appropriées, les performances et les caractéristiques de l'instrument de mesure ou du capteur, objet de l'essai. [1]

II.3 Quelques caractéristiques métrologiques des capteurs

II.3.1 L'étendue de la mesure : c'est la différence entre le plus petit signal détecté et le plus grand perceptible sans risque de destruction pour le capteur.

II.3.2 La sensibilité : c'est la plus petite variation d'une grandeur physique que peut détecter un capteur.

II.3.3 La rapidité : c'est le temps de réaction d'un capteur entre la variation de la grandeur physique qu'il mesure et l'instant où l'information prise en compte par la partie commande.

II.3.4 La précision : c'est la capacité de répétabilité d'une information position, d'une vitesse,...

II.4 Conditions de fonctionnement d'un capteur

II.4.1 Domaine nominal d'emploi :

Le domaine nominal d'emploi est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver de façon permanente, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence, sans que les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient modifiées (les erreurs correspondantes ne dépassent pas les valeurs maximales tolérées).

II.4.2 Domaine de non détérioration :

Le domaine de non détérioration est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre et conserver, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence, sans que

les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur soient altérées après retour dans le domaine nominal.

II.4.3 Domaine de non destruction :

Le domaine de non destruction est défini par les valeurs limites que peuvent atteindre, d'une part la grandeur à mesurer, d'autre part les grandeurs d'influence sans qu'il y ait destruction du capteur, mais dans lequel les caractéristiques (en particulier métrologiques) du capteur peuvent être altérées plus ou moins profondément et d'une manière permanente (figure II.4).

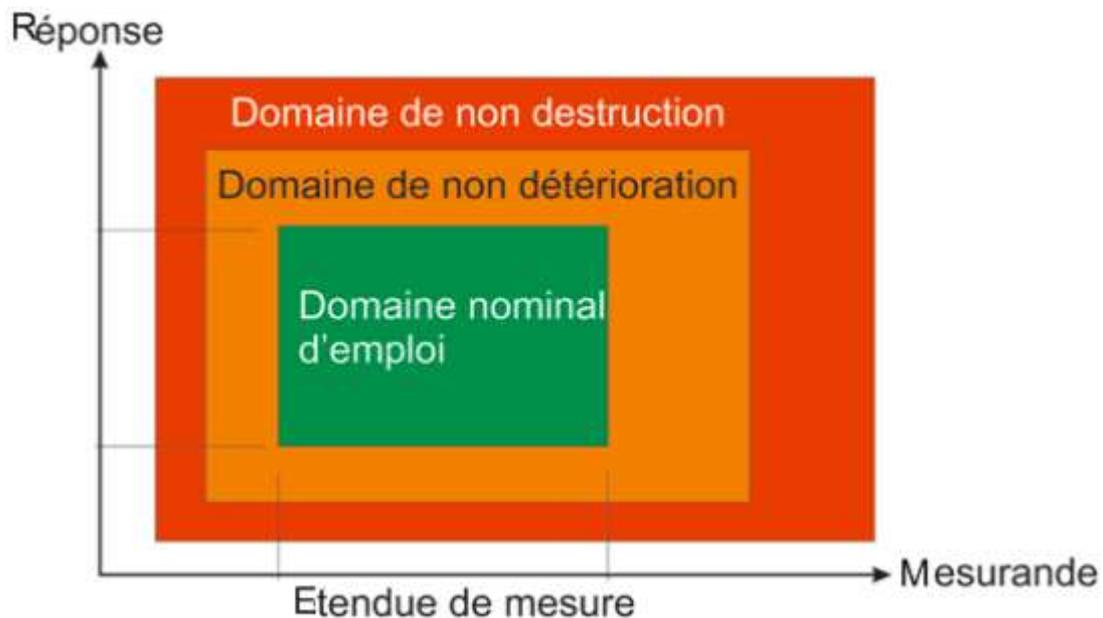


Figure II.2 : Domaines de fonctionnement du capteur.

II.5 Quelques types de capteurs

Si on se base sur le phénomène physique mis en jeu pour classer les capteurs, on peut citer :

II.5.1 les capteurs extensométriques

Les jauges de contraintes furent inventées pour mesurer les déformations des structures en vue d'en évaluer l'état de contraintes. Il s'agit de petits circuits électriques très fins qui, collés sur les pièces à étudier, subissent les déformations, ce qui entraîne les variations de leur résistance électrique. Les résistances électriques peuvent être très petites donc très sensibles. Les jauges extensométriques restent cependant très largement utilisées.

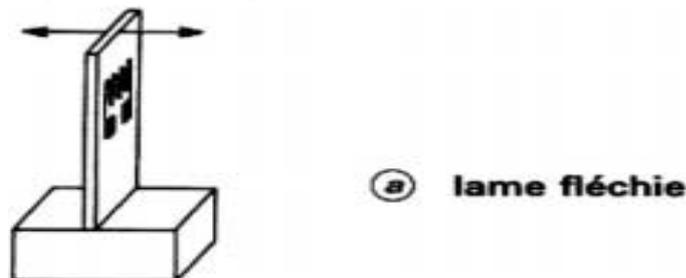


Figure II.3 : Principe d'un capteur à jauge de contrainte.

II.5.2 les capteurs à effet piézoélectrique

L'application d'une contrainte mécanique à certains matériaux dits piézo-électriques (le quartz par exemple) entraîne l'apparition d'une déformation et d'une même charge électrique de signe différent sur les faces opposées. Une force appliquée à une lame de quartz induit une déformation qui donne naissance à une tension électrique. La tension V_S de sortie sera proportionnelle à la force F (où k est une constante):

$$V_S = k \cdot (F+F) = 2k \cdot F$$

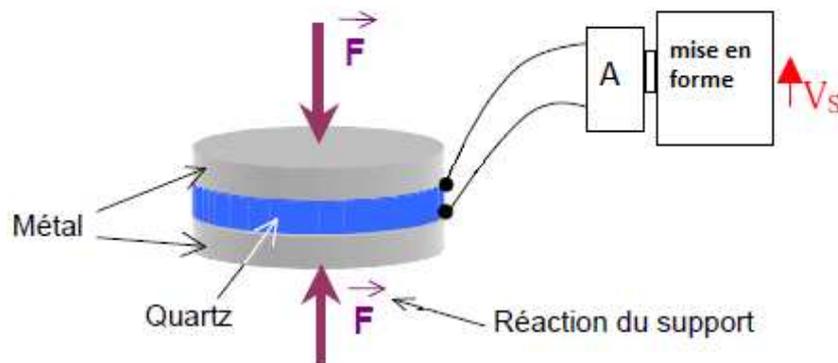
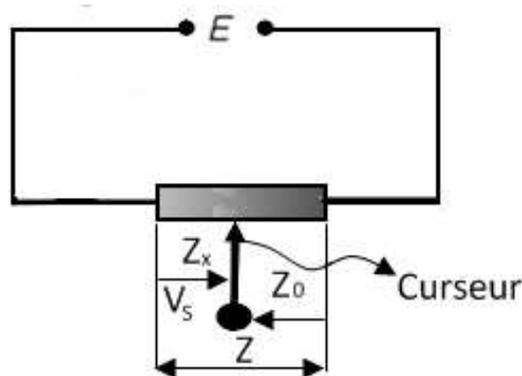


Figure II.4 : Principe d'un capteur à effet piézoélectrique.

II.5.3 les capteurs à effet Potentiométrique

En déplaçant un curseur conducteur sur un barreau de matière conductrice, on obtient un potentiomètre, élément électrique à trois bornes dont on peut varier continûment la résistance par le déplacement mécanique du curseur.



$$V_s = E \frac{Z_x}{Z_x + Z_0}$$

avec $Z_x + Z_0 = Z$ impédance totale fixée

Figure II.5 : Principe d'un capteur à effet Potentiométrique.

II.5.4 les capteurs à effet HALL

Un conducteur (généralement un semi-conducteur) est parcouru par un courant I constant ; si on le soumet à une induction magnétique B , on constate l'apparition d'une différence de potentiel transversale V_m , perpendiculaire aux lignes de courant, conséquence de la loi de Laplace appliquée aux charges électriques en mouvement (figure II.6). La tension de Hall est proportionnelle à l'induction B et au courant I ; elle peut donc constituer un signal de mesure V_m dans le cas où la pression peut agir sur la valeur de B (par exemple, si la déformation du corps d'épreuve déplace un aimant permanent au voisinage de la sonde de Hall).

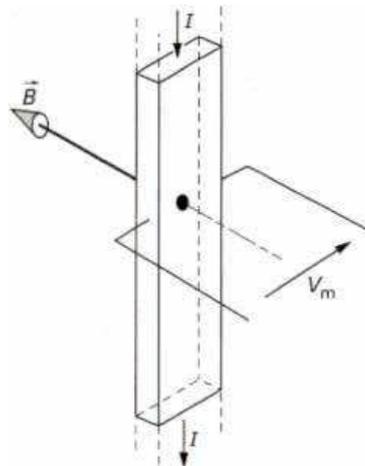


Figure II.6 : Principe d'un capteur à effet HALL.

II.6 Choix d'un capteur

Tous les capteurs dont les fonctionnements ont été décrits précédemment présentent deux parties distinctes. Une première partie qui a pour rôle de détecter un événement et une deuxième partie qui a pour rôle de traduire l'événement en un signal compréhensible d'une manière ou d'une autre par une partie PC. Pour choisir correctement un capteur, il faudra définir tout d'abord

- . Le type événement à détecter,
- . La nature de l'événement,
- . La grandeur de l'événement,
- . L'environnement de l'événement.

En fonction de ces paramètres on pourra effectuer un ou plusieurs choix pour un type de détection. D'autres éléments peuvent permettre de cibler précisément le capteur à utiliser :

- . Ses performances,
- . Son encombrement,
- . Sa fiabilité,
- . La nature du signal délivré par le capteur (électrique, pneumatique)
- . Son prix...

III.1 Introduction

Les extensomètres à fils résistants, que l'on désigne aussi sous le nom de jauges de contrainte, furent inventés pour mesurer les déformations des structures en vue d'en évaluer l'état de contraintes. Il s'agit de petits circuits électriques très fins (figure III.1) qui, collés sur les pièces à étudier, en subissent les déformations, ce qui entraîne une variation de leur résistance électrique. Les mesures électriques peuvent être très précises et très sensibles puisque l'on atteint facilement des déformations de l'ordre du micromètre par mètre ($\mu\text{m}/\text{m}$).

La fidélité des jauges permet dès l'origine d'envisager leur usage pour fabriquer des capteurs. Avec les mêmes jauges et la même instrumentation en aval, il est possible d'imaginer de nombreux types de capteurs.

Les jauges métalliques restent les plus utilisées actuellement en extensométrie.

III.2 Principe des jauges

Nous ne pouvons parler des capteurs à jauges de contraintes sans parler des jauges extensométriques. C'est pour quoi nous allons dans ce chapitre présenter brièvement les jauges extensométriques.

Les jauges de contraintes (ou jauges d'extensométrie) sont largement utilisées depuis de nombreuses années pour la mesure de déformations à la surface des structures. La pression, la force, l'accélération, le couple... bref toute grandeur mécanique dont l'action sur un corps d'épreuve entraîne sa déformation est mesurable par extensométrie.

Sous la forme la plus simple, une jauge est constituée d'un fil très fin (2 microns) conducteur collé sur un support. Cette feuille très mince est arrangée suivant la forme de la (Figure III.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.

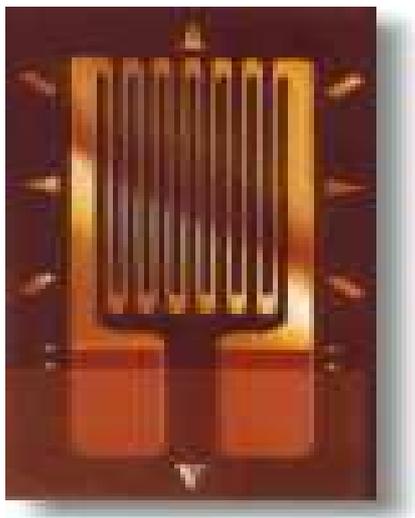


Figure III.1 : Jauge électrique de déformation.

Le fil est disposé de manière à former un ensemble de brins parallèles longs et fins (une dizaine de brins environ). Ces brins seront placés parallèlement à la direction de la contrainte à mesurer de manière à avoir un maximum de sensibilité longitudinale.

Soit RJ la résistance totale de la jauge :

$$RJ = RL + RT \quad (\text{éq.III.1})$$

RL étant la résistance des brins longitudinaux et RT étant la résistance des brins transversaux. Sous l'effet de la contrainte, les dimensions du fil de jauge vont varier avec des signes différents pour les brins longitudinaux et transversaux : on aura avantage à réduire le plus possible la contribution de RT à la résistance totale RJ de la jauge.

En fait, actuellement, on réalise surtout des jauges à trame pelliculaire suivant la technique de fabrication des circuits imprimés.

Cela permet :

- . D'obtenir des jauges de dimensions plus faibles, permettant des mesures plus localisées des contraintes ;
- . D'optimiser le dessin des jauges, avec, notamment, un élargissement des dimensions transverses pour diminuer RT et un accroissement, à résistance constante, de la surface des brins pour un meilleur contact thermique avec la structure et une meilleure dissipation thermique de l'effet Joule.

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

$$R = \rho \cdot L / s \quad (\text{éq.III.2})$$

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 :

$$\Delta R/R = (\Delta \rho / \rho) + (\Delta L/L) + (\Delta s/s) \quad (\text{éq.III.3})$$

Qui peut se réécrire :

$$\Delta R/R = K (\Delta L/L) \quad (\text{éq.III.4})$$

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

III.3 Quelques principes de capteurs à jauges de contraintes

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.). 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 (tableau III.1), on peut imaginer des capteurs dont le corps d'épreuve détecte *simultanément plusieurs paramètres*. Ceci par une disposition judicieuse des jauges, ces composantes sont mesurées séparément.

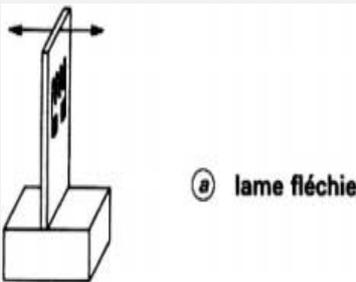
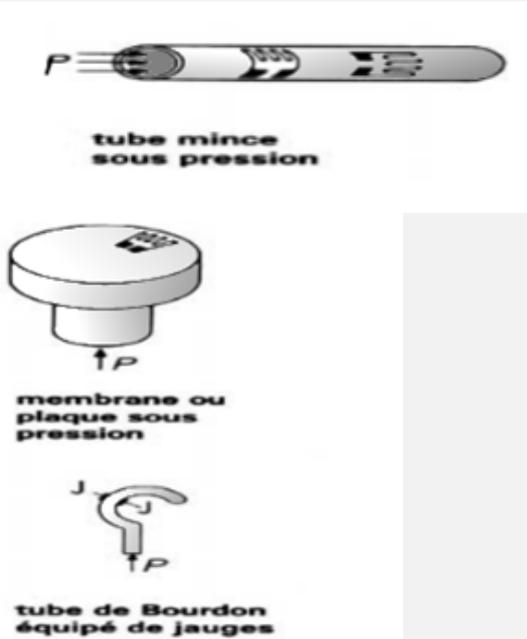
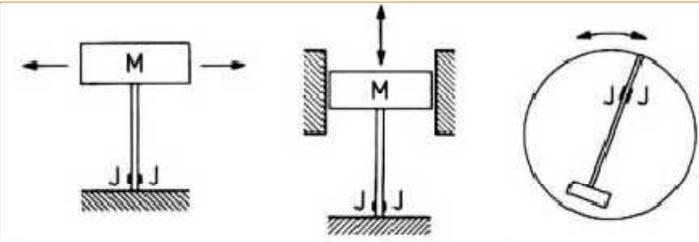
Gradeur mesurée	Schéma
Déplacement	 <p>a) lame fléchie</p>
Pression P	 <p>tube mince sous pression</p> <p>membrane ou plaque sous pression</p> <p>tube de Bourdon équipé de jauges</p>
Vibration Accélération	 <p>h) lame fléchie avec masse M</p> <p>i) lame en traction avec masse M</p> <p>j) analogue à h) pour accélérations angulaires</p>

Tableau III.1 : exemples de capteurs extensométriques.

Seulement quelques exemples de capteurs sont représentés sur le tableau. Cette liste n'est pas limitative. On voit bien qu'on peut imaginer une multitude de capteurs.

III.3.1 Schéma électrique des capteurs

III.3.1.1 Principe du montage en pont

Soit un circuit constitué par quatre résistances égales $R_1, R_2, R_3, R_4 = R_j$, montées en pont (figure III.2). Si nous l'alimentons par une source de courant V_e 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. Pour de très faibles variations de résistance (de l'ordre de quelques micros ohms 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 :

$$V_s = \frac{V_e}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \quad (\text{éq.III.5})$$

Le montage peut être:

1. Avec une seule jauge active: c'est un quart de pont.
2. Avec deux jauges active: demi-pont.
3. Avec quatre jauges active: pont complet.

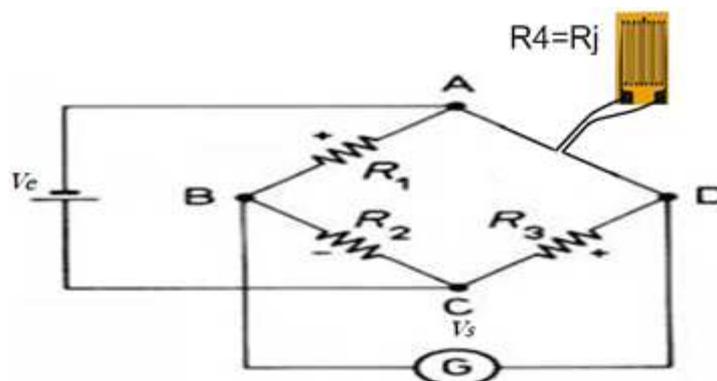


Figure III.2 : Montage en pont de Wheatstone.

Avec V_e 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 (éq.III.5), 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 (éq.III.5) 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 (éq.III.5) 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 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.

III.3.1.2 Disposition des jauges

D'après la relation (éq.III.5), 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 pièce soumise à une traction, subit un allongement dans le sens de la traction et une contraction, égale à environ 30 % du précédent allongement, dans le sens perpendiculaire (*effet de Poisson*). En conséquence, les jauges J1 et J3 sont disposées longitudinalement, et J2 et J4 transversalement (figure III-3 « A »). Cela est essentiellement théorique. Pratiquement, on dispose les jauges qui agissent dans le même sens le plus symétriquement possible : sur un cylindre par exemple, elles doivent être diamétralement opposées ; sur une lame, elles sont de part et d'autre. Ces montages symétriques ont pour effet, d'après la règle des signes de la relation (éq.III.1), d'éliminer des effets parasites (figure III-3 « B »).

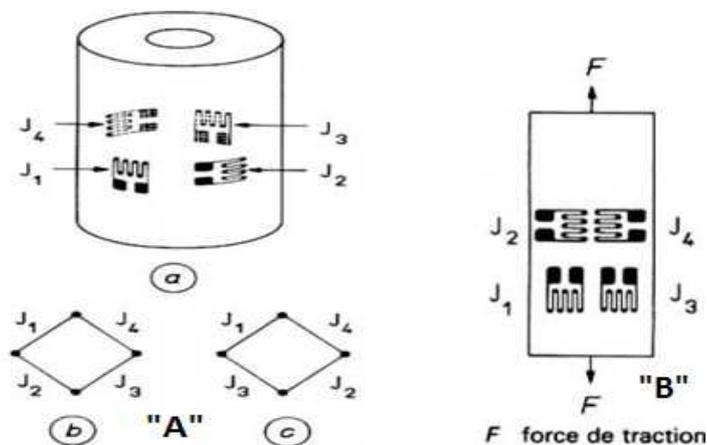


Figure III.3 : disposition des jauges sur un cylindre A, et pièce en traction B.

III.4 Conception mécanique des capteurs

III.4 .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). Il existe cependant des formules destinées à *simplifier le calcul des corps d'épreuve*. Ayant choisi l'emplacement des jauges, on peut calculer, pour chacune d'elles, la déformation ε (avec son signe). À celle-ci correspond une variation de résistance (avec son signe) :

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \varepsilon \quad (\text{éq.III.6})$$

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

En appliquant la formule (éq.III.5), on obtient le $\Delta R/R$ total d'où, éventuellement, le signal V_s / V_e (en mV/V).

III.4 .2 Métal du corps d'épreuve

III.4 .2.1 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 (éq.III.5) et (éq.III.6), 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.

III.4 .2.2 Phénomènes thermiques

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

Un autre phénomène thermique est la variation du module d'élasticité avec la température (tableau III. 2).

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 10^3kg/m^3)	7,80	8,25	2,80
Coefficient de dilatation.....(en $10^{-6}C^{0-1}$)	13	17	23,5
Module d'élasticité E (MPa)	220 000	130 000	72 000
Variations $\frac{\Delta E}{E}$ (en $10^{-6}C^{0-1}$)	- 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... ($\mu\text{m}/\text{m}$)	6 600	4 700	6 400
Traitements thermiques garantissant les caractéristiques ci-dessus (indications approximatives)	Trempe 890 C° à l'huile Revenu 2 h à 450C°	Trempe 780 C° à l'eau Revenu 2 h à 320C°	Trempe 460 C° à l'eau 30 à 50 C° Revenu 8 h à 130.140C°

Tableau III.2 : Exemples de métaux pour corps d'épreuve.

III.4 .3 Imperfections mécaniques des capteurs :

Les jauges, ainsi que les produits destinés à les mettre en œuvre (colles, protections, soudures, etc.), sont l'objet de recherches méticuleuses. Leurs anomalies sont fort bien dominées. Si, donc, ayant déjà obtenu des performances intéressantes sur un type de capteur, on ne les retrouve plus sur un modèle nouveau, c'est surtout vers la conception mécanique qu'il faut reporter ses recherches. Les anomalies des capteurs sont presque toujours dues à des imperfections mécaniques. Plutôt que de tenter de donner des règles, nous tenterons d'énumérer ces imperfections :

III.4 .3.1 Le frottement :

Caused par le contact entre les pièces, et souvent accentué par des défauts de fabrication, d'assemblage, ceci donne naissance a des erreurs lors de la récupération du signal.

III.4 .3.2 Les jeux :

La présence d'un jeu déplaçant l'application des charges sur le corps d'épreuve donne une discontinuité de la courbe d'étalonnage. Il y a donc lieu de *rattraper* les jeux, généralement par des montages précontraints.

III.4 .3.3 Instabilité élastique :

L'action d'une force F sur le bord et dans le plan d'une plaque encadrée d'un seul côté peut la faire dévier vers le haut comme vers le bas, sans qu'il soit possible d'en prévoir théoriquement le sens. Dans le même ordre d'idées, un tore cylindrique trop mince soumis à une compression F ne subit pas les déformations suivant la loi élémentaire : il se *fripe*.

Autant d'imperfections dus à des défauts souvent mécaniques, sur lesquels le concepteur doit se pencher avant la réalisation du capteur, afin bien sûr de minimiser sa marge d'erreur sur les résultats.

III.5 Recherche des formes optimales pour les capteurs

Compte tenu du fait que le capteur doit être assez *gros* pour tenir aux charges maximales, mais aussi assez *fin* pour que sa sensibilité soit celle que l'on recherche. Le dessin et dimensions du corps d'épreuve doit être suivant une **géométrie optimale**. Bien que ce travail puisse être exécuté sur prototype, avec des jauges éventuellement collées par un procédé rudimentaire, non définitif, la **photoélasticité** est utile pour obtenir les meilleurs dessins.

La figure III.4 est un modèle photoélastique bidimensionnel, servant à l'étude d'un capteur de traction. Le corps d'épreuve est du type *anneau dynamométrique* avec des prolongements taillés dans la masse, ce qui est le montage le plus prudent si l'on veut éviter des frottements, donc de l'hystérésis.

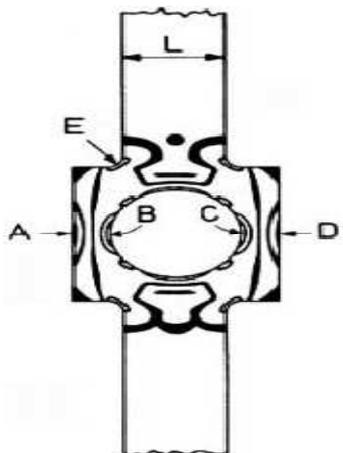


Figure III.4 : Étude photoélastique de la géométrie d'un corps d'épreuve représentable par une figure bidimensionnelle.

Une première considération doit être l'absence de contraintes néfastes, même dans les zones qui n'agiront pas sur les jauges.

Sur notre exemple, les quatre congés analogues à E ne doivent pas être des causes de contraintes qui seraient des amorces de fissures en fatigue. Il faut un certain rayon de congé, mais pas trop grand.

Ayant considéré les points faibles, nous nous proposons ensuite d'obtenir, aux emplacements futurs des jauges, des déformations donnant des signaux exploitables. La présence de points singuliers prouve que certaines zones de profil ne sont absolument pas contraintes et ne pourraient être des emplacements de jauges. Ayant donc en vue un principe d'anneau dynamométrique, c'est en A, B, C et D, suivant le diamètre horizontal, que nous centrerons nos quatre jauges. Nous avons, dans le voisinage de ces points, un maximum de franges, ce qui indique des déformations importantes. Néanmoins, il faut être bien sûr que les signes des déformations soient ceux que nous recherchons. Sur un anneau dynamométrique, nous devons avoir, lorsqu'il est en traction, des déformations négatives à l'extérieur (en A et D) et positives à l'intérieur (en B et C). C'est le cas pour notre exemple, encore que cela ne soit pas *a priori* évident sur la figure ; par contre, sur un photoélasticimètre, nous pouvons nous assurer d'avoir un montage efficace soit par l'observation des franges qui apparaissent lorsque l'on fait croître la charge, soit par la mesure du signe à l'aide d'un compensateur.

En résumé, une optimisation de la géométrie du corps d'épreuve est utile pour :

- éviter des contraintes néfastes hors des emplacements de jauges ;
- trouver pour les jauges des zones de déformations maximales, autant que possible de signes opposés et de mêmes valeurs absolues, afin d'avoir des signaux importants et une bonne linéarité ;
- éviter, malgré tout, les concentrations de contraintes, causes de déformations résiduelles et de mauvaises tenues en fatigue.

Malgré ces exigences, il faut parfois tenir compte des moyens dont on dispose. En particulier, pour usiner le corps d'épreuve, il peut être nécessaire de n'utiliser que des machines-outils classiques : tour, fraiseuse, perceuse, etc. La forme idéale peut être onéreuse. La réalisation définitive d'un type de capteur de série est un compromis.

Il est très facile de faire un capteur ; en faire un bon nécessite un peu de travail et beaucoup de bon sens.

III.6 Quelques terminologies usuelles relatives aux capteurs d'extensométrie

Lors de l'établissement d'un projet comportant des capteurs, on est amené à considérer leurs différentes caractéristiques dont voici ci-après une liste de certaines définitions consacrées par l'usage international. On trouvera [entre crochets] l'équivalent anglais.

- **Charge** [*load*]

Grandeur physique appliquée à un capteur en vue d'obtenir un signal électrique : force, poids, déplacement, accélération, pression, etc.

- **Charge nominale, ou capacité** [*full scale load*]

Valeur de la plus grande charge qu'il est recommandé d'appliquer à un capteur qui sera employé indéfiniment, avec des caractéristiques données.

- **Échelle totale de sortie** [*output full scale or span*]

Différence algébrique entre les signaux de sortie obtenus à charge nulle et à charge nominale.

- **Signal de sortie** [*output*]

Variations de la grandeur électrique donnée par un capteur lorsque la charge varie. Ce peut être une tension, une intensité, une variation de résistance.

- **Excitation** [*excitation*]

Force électromotrice de la source de courant destinée à alimenter un capteur.

- **Courbe d'étalonnage** [*calibration curve*]

Courbe représentative du signal de sortie en fonction de la charge appliquée, obtenue par l'application de charges connues prises comme étalons.

- **Zéro** [*zero*]

Valeur prise comme origine du signal de sortie du capteur. Elle peut correspondre à une charge nulle, ou bien à une charge quelconque prise comme référence.

- **Sensibilité** [*sensitivity*]

Rapport entre une variation du signal de sortie et la variation de charge qui l'a provoquée. C'est donc la pente de la courbe d'étalonnage.

- **Précision** [*tolerance*]

Plus petite grandeur dont on est sûr qu'elle est supérieure à la différence entre la charge réelle appliquée et la valeur évaluée d'après la courbe d'étalonnage. Elle s'exprime en pourcentage de la charge nominale.

- **Dérive de l'équilibre** [*zero drift*]

En l'absence de charge, et sans cause thermique, variations du déséquilibre initial pour une durée définie.

- **Erreur d'hystérésis** [*hysteresis*]

Écart maximal obtenu entre les signaux de sortie indiqués pour une même charge mais pour deux modes d'application différents : charge croissante à partir de zéro et charge décroissante à partir de la charge nominale. Est donnée, sauf indication contraire, pour une charge égale à la moitié de la charge nominale, et s'exprime en pourcentage de l'échelle totale de sortie. Ces mesures doivent être exécutées aussi rapidement que possible, afin de les distinguer du fluage.

IV.1 principe du capteur

Le capteur que nous allons concevoir est un capteur de force, constitué d'un corps d'épreuve soumis à la force inconnue, qui est dans ce cas la pression, et subissant de ce fait une déformation, (dans le domaine élastique, il y a proportionnalité entre déformation et contrainte). La déformation et donc la force appliquée peuvent être mesurées à l'aide de jauges de contraintes. C'est une méthode courante, fiable et précise pour la mesure de la force.

IV.2 Le corps d'épreuve

Le corps d'épreuve est la pièce maîtresse dans un capteur, le choix de sa géométrie dépend en grande partie du phénomène physique à mesurer. Ce choix c'est porté sur un cylindre métallique. Le calcul de ce corps d'épreuve nous a permis par la suite de trouver l'emplacement nous garantissant un signal électrique de grande amplitude pour la jauge de contrainte. La figure IV.1, montre le principe de ce capteur.

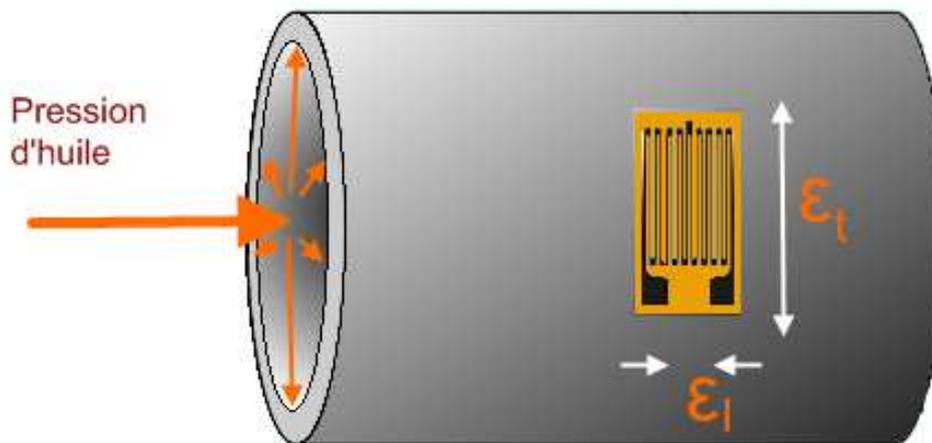


Figure IV.1 : le cylindre corps d'épreuve.

IV.2.1 Calcul du corps d'épreuve

IV.2.1.1 Calcul des contraintes principales

Afin de dimensionner le cylindre, on souhaite connaître l'état de contraintes en tout point M de la paroi de ce cylindre.

Supposons qu'on a un cylindre soumis à une pression interne P , de diamètre intérieur d , de longueur L , et d'épaisseur e . [3]

➤ *Isolons la partie (1) du cylindre*

Cette partie est une coupe longitudinale du cylindre, suivant l'axe \vec{GZ}

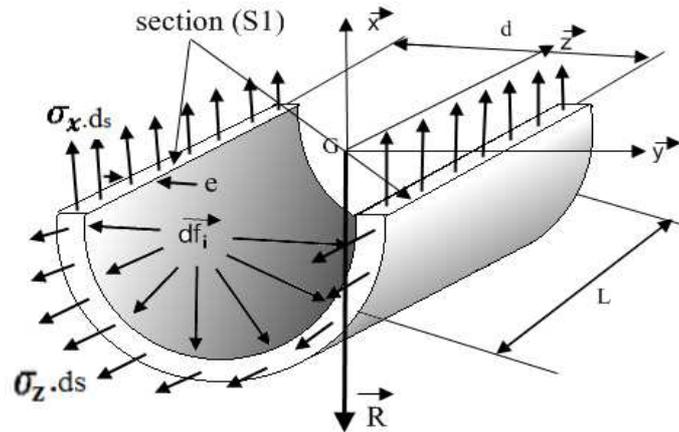


Figure IV.2 : Partie 1 (coupe suivant l'axe \vec{GZ}).

La résultante des forces de cohésion dans la partie (S1) est :

$$N = \sum_{(s1)} \sigma_x \cdot ds$$

$$\vec{N} + \vec{R} = \vec{0} \quad : \quad \text{SUR } (0, \vec{x}) \quad \sum_{(s1)} \sigma_x \cdot ds - P_0 \cdot l \cdot d = 0$$

$$\sigma_x = cst \quad \text{D'où} \quad \sigma_x \sum_{(s1)} ds - P_0 \cdot l \cdot d = 0$$

$$\sum_{(s1)} ds = 2 \cdot e \cdot l \quad \sigma_x \cdot 2 \cdot e \cdot l - P_0 \cdot l \cdot d = 0$$

La valeur de la contrainte tangentielle est :

$$\sigma_x = P_0 \cdot \frac{d}{2e} \tag{IV - 1}$$

Avec :

σ_x ; Contrainte normale selon (G, \vec{x}) (Mpa).

e : épaisseur du tube (mm) d : diamètre du tube (mm) et P_0 : pression effective (MPa)

➤ **Isolons la partie (2) du cylindre**

C'est la coupe suivant l'axe \vec{GX} .

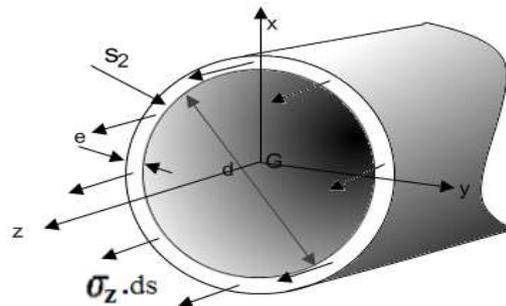


Figure IV.3 : Partie 2 (coupe suivant l'axe \vec{GX}).

La résultante des forces de cohésion dans la partie (2) est :

$$N = \sum_{(s_2)} \sigma z. ds$$

Sur l'axe (\vec{OZ}) :

$$\sum_{(s_2)} \sigma z. ds = P_0 . S \quad ; \quad S = \pi . \frac{d^2}{4}$$

Supposons que $\sum_{(s_2)}. ds = \pi . d . e$ (figure III.4).

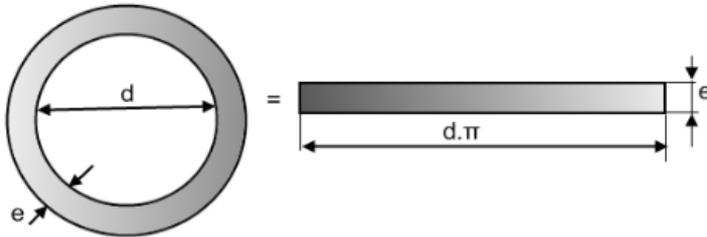


Figure IV.4 : surface de la paroi du cylindre \approx surface d'un rectangle.

La valeur de la contrainte longitudinale est :

$$\sigma_Z = P_0 . \frac{d}{4e} \quad (\text{éq. IV-2})$$

IV.2.1.2 Calcul de l'épaisseur du cylindre

La contrainte circonférentielle est deux fois plus importante que la contrainte longitudinale. Alors pour le calcul de l'épaisseur du cylindre et pour des raisons de sécurité, nous prendrons la contrainte maximale, soit σ_X .

$$\text{On a} \quad \sigma_x = P_0 . \frac{d}{2e} \leq \sigma_{ad} \quad ; \quad \sigma_{ad} = \frac{\sigma_e}{n}$$

Donc :

$$e \geq \frac{P_0 . d}{2 . \sigma_{ad}} \quad (\text{éq. IV.3})$$

Avec

e ; épaisseur du tube (mm)

σ_{ad} : Contrainte admissible (Mpa)

σ_e : Limite élastique du matériau (Mpa)

n : coefficient de sécurité

IV.2.1.3 Hypothèse de modélisation

Dans de nombreux ouvrages [5], une enveloppe est considérée comme étant mince si :

$$\frac{r}{e} \gg 1 \quad (\text{éq. IV.4})$$

Si l'hypothèse n'est pas vérifiée, on change la modélisation géométrique. Pour les enveloppes épaisses, avec :

$$P_0 \cdot \frac{D_i^2 + D_e^2}{D_e^2 - D_i^2} \leq \sigma_e \text{ avec } \frac{D_i}{e} < 10. \quad (\text{éq. IV.5})$$

Avec :

D_i : Diamètre intérieur du cylindre (mm) D_e : Diamètre extérieur du cylindre (mm)

P_0 : Pression max donnée par le constructeur, e : épaisseur du cylindre

σ_e : Limite élastique du matériau.

IV.2.2 Applications numériques

➤ *Données*

- Force maximale qu'engendre la machine : $F=120\text{KN}$, soit $P_{max} = 25\text{MPa}$.
- diamètre intérieur du cylindre $D= 25\text{mm}$.
- Longueur utile du cylindre $L=40\text{mm}$
- Matériau utilisé : XC48, de limite élastique $\sigma_e= 375 \text{ MPa}$.

➤ *La contrainte admissible*

$$\sigma_{ad} = \frac{\sigma_e}{n} = \frac{375}{1,5} = 250 \text{ Mpa} \quad n: \text{coefficient de sécurité.}$$

Connaissant la pression qu'engendre la machine :

$$P_0 = 25\text{MPa.}$$

➤ *Calculons l'épaisseur du cylindre*

De la relation (IV.3) :

$$e \geq \frac{P_0 \cdot d}{2 \cdot \sigma_{ad}} = \frac{25 \cdot 25}{2 \cdot 250} = 1,25\text{mm} \quad \longrightarrow \quad e \geq 1,3: \text{ Pour un meilleur signal}$$

des jauges on prend :

$$e = 1,3 \text{ mm}$$

➤ *Vérification de l'hypothèse de modélisation*

De la relation (éq. IV.4) :

$$\frac{r}{e} = \frac{25}{2.1,3} \approx 10, \text{ donc la condition de l'épaisseur mince est vérifiée.}$$

Les dimensions utiles de ce cylindre sont donc :

- diamètre, $d=25\text{mm}$
- Epaisseur du cylindre, $e = 1,3\text{mm}$

IV.2.3 Déformations dues aux forces de pression

Les relations suivantes nous donnent un aperçu des valeurs des déformations dues à la pression interne avant fabrication du cylindre.



I) Pour de petites longueurs

$$\epsilon_1 = \frac{PR}{E \cdot e} \left(\frac{L}{L+2R} - \frac{\nu}{2} \right) \tag{IV-6}$$

$$\epsilon_2 = \frac{PR}{Ee} \left(\frac{1}{2} - \nu \frac{L}{L+2R} \right) \tag{IV-7}$$

II) Pour une longueur infinie :

$$\epsilon_1 = \frac{0,85 PR}{Ee}$$

$$\epsilon_2 = \frac{0,20 PR}{E \cdot e}$$

- ϵ_1 indication jauge latérale
- ϵ_2 indication jauge longitudinale
- L longueur
- P pression appliquée
- R rayon
- e épaisseur (faible devant R)

- On se trouve dans le cas des petites longueurs.
- Le calcul des déformations nous renseignera sur la qualité du signal des jauges extensométriques.

Soit maintenant une pression quelconque P_i , située dans le domaine de fonctionnement de la machine, c'est-à-dire entre 0 et 25MPa et calculons ses déformations.

Pour	$E = 210\,000\text{ MPa}$	$R = 13\text{mm}$
	$e = 1,3\text{ mm}$	$\nu = 0,3$
	$L = 40\text{ mm}$	$P_0 = 25\text{ MPa}$

- σ_1 Étant deux fois plus importante que σ_2 . on se limite dans les calculs à ϵ_1 .

$$\epsilon_1 = \frac{25 \cdot 25}{2.210\,000 \cdot 1,3} \left(\frac{40}{40+(25)} - \frac{\nu}{2} \right)$$

On trouve $\epsilon_1 = 5,3 \cdot 10^{-4}$

On se trouve bien dans le domaine élastique du XC48.

Dans ce domaine, il n'y a pas de risque d'éclatement du capteur, puisque celui-ci ne travaille que dans le domaine élastique.

Une jauge extensométrique peut détecter des déformations de l'ordre de 10^{-7} .

Donc la déformation peut être théoriquement détectée dans ce cas.

IV.2.3 Représentation graphique des déformations

Soit un petit élément de paroi isolé soumis aux contraintes σ_z et $\sigma_x = 2 \cdot \sigma_z$.

Remarque : ce petit élément est aussi soumis à une pression p suivant la direction y perpendiculaire au plan (x, z) , correspondant à une contrainte normale. Il ne s'agit donc pas ici en toute rigueur d'un état plan de contraintes. Cependant, compte tenu de l'hypothèse d'un réservoir à paroi mince, caractérisé par $\frac{r}{e} \gg 1$, la relation $\sigma_x = 2 \cdot \sigma_z = \frac{P_0 \cdot d}{2e}$ indique alors que :

$$\sigma_x \text{ et } \sigma_z \gg P.$$

L'effet transversal de la pression P peut être donc négligé devant σ_x et σ_z et on se retrouve dans le cadre de l'état plan de contraintes.

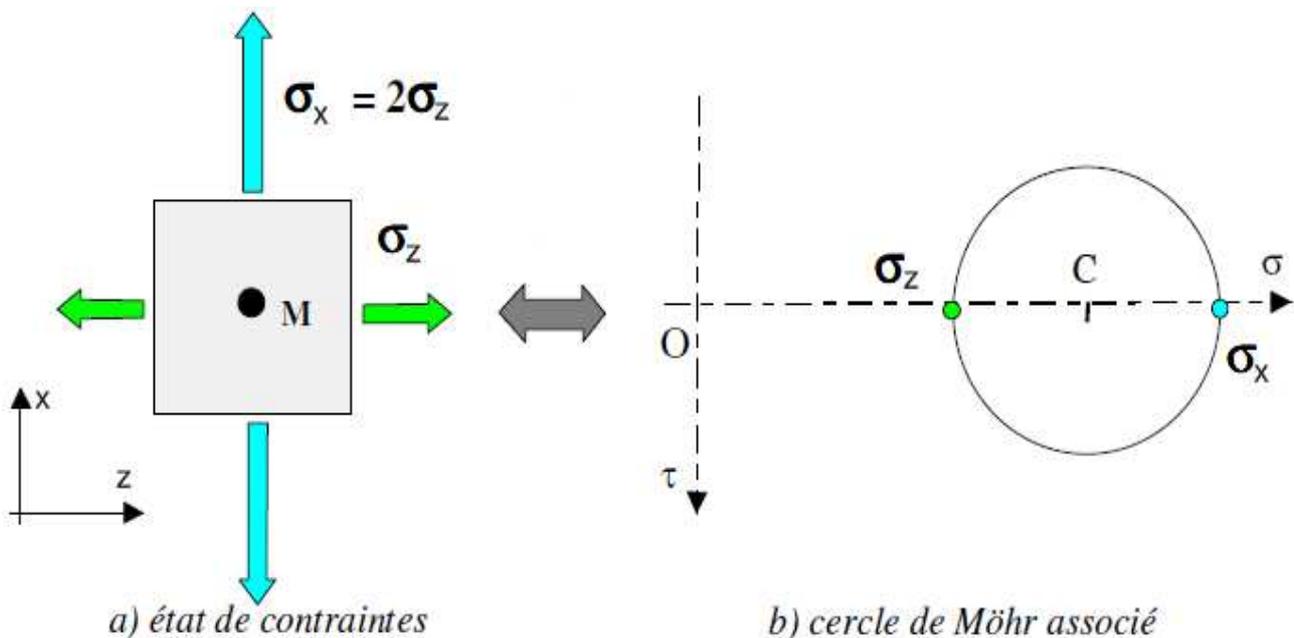


Figure IV.5 : Représentation graphique des contraintes.

On peut remarquer que les directions x et z sont ici les directions principales (absence de contrainte tangentielle), à cette représentation est associée le tracé du cercle de Mohr.

IV.3 Collage de la jauge

Les jauges de contraintes sont collées sur le corps d'épreuve qui subit les déformations, la tendance veut qu'on obtienne des jauges de contraintes un signal de grande amplitude. La connaissance des contraintes principales et des directions principales nous offre cette possibilité, car par principe les directions principales sont ces directions où les contraintes

sont plus importantes. Sur un cylindre soumis à une pression interne, nous connaissons ses directions principales. La jauge sera donc collée transversalement à l'axe du cylindre, soit dans la direction (X), étant donné que $\sigma_x = 2 \cdot \sigma_z$ (figure IV.5).

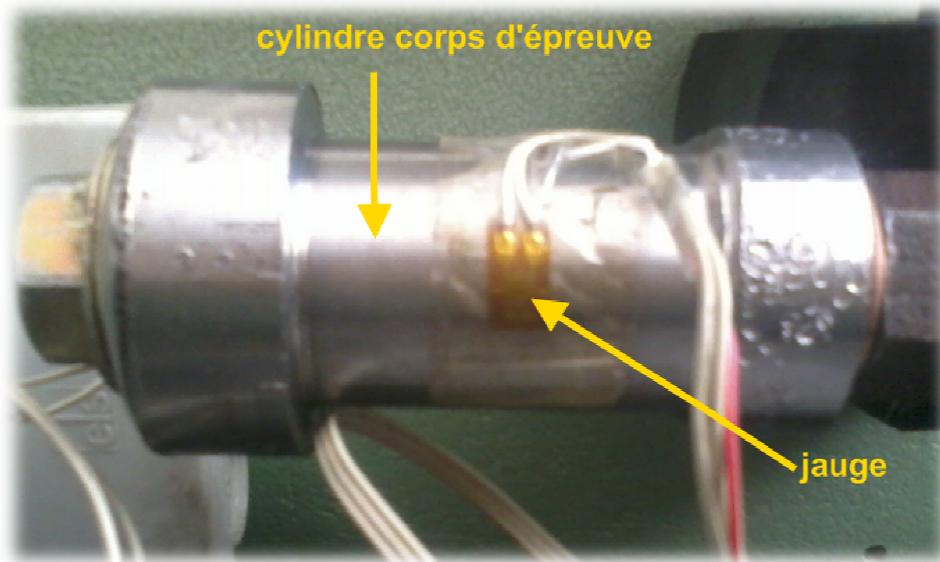


Figure IV.6 : Disposition de la jauge sur le capteur.

Après collage de la jauge, le capteur est ensuite monté dans la canalisation hydraulique de la machine. L'endroit est judicieusement choisi. Le capteur étant adapté à la machine, se devait non seulement de fonctionner en traction et en compression, mais aussi ne pas gêner le fonctionnement de la machine. L'image (figure IV.5) montre cet emplacement. Le capteur est vissé à un répartiteur qui assure la répartition d'huile vers le capteur mais aussi vers le manomètre de pression.

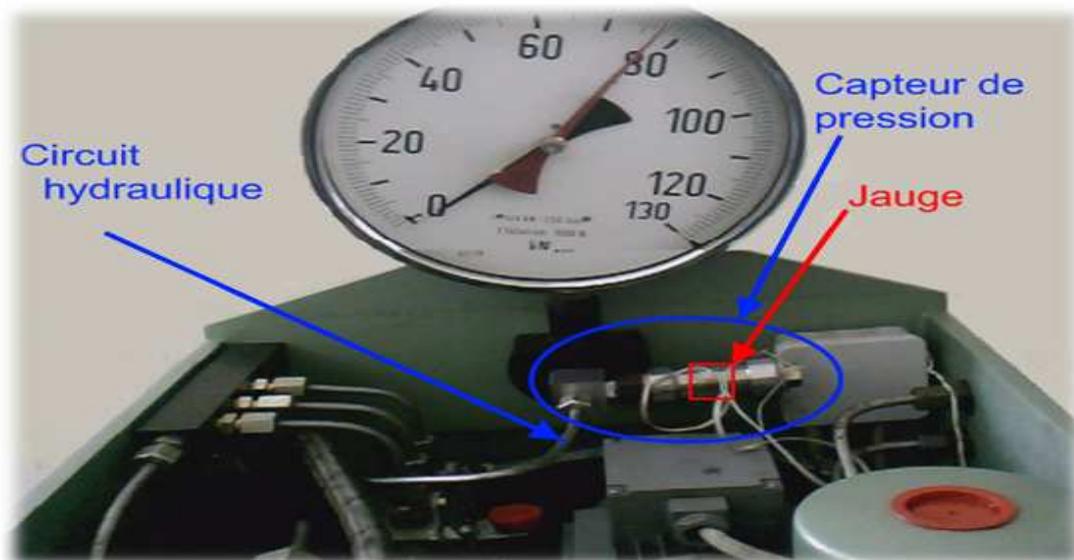


Figure IV.7 : Emplacement du capteur dans la machine.

Pour afficher les résultats des essais, la jauge est liée à une chaîne d'acquisition pour l'amplification du signal électrique, celui-ci est ensuite acheminé vers un micro ordinateur doté d'un logiciel (ESAM1000) pour l'affichage et l'enregistrement du signal électrique (figure IV.8).

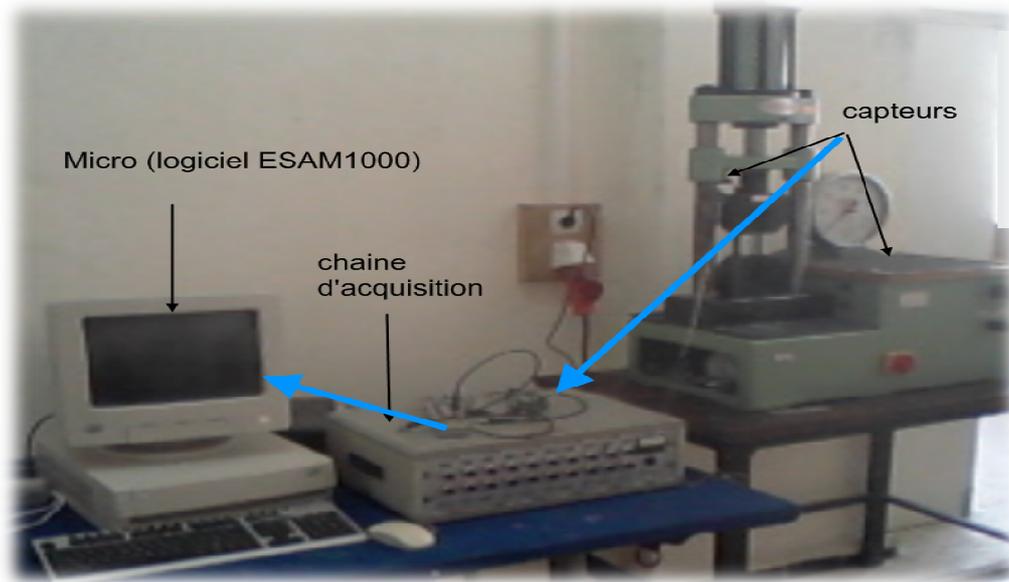


Figure IV.8 : Chaîne d'acquisition.

IV.4 Etalonnage du capteur

IV.4.1 Principe

Lorsque l'expression mathématique rigoureuse de la caractéristique de transfert régissant le fonctionnement de l'instrument de mesure n'est pas connue (comme pour les capteurs, les transmetteurs), il faut recourir à une détermination expérimentale que l'on appelle étalonnage. Elle consiste à comparer la réponse de l'appareil de mesure à celle d'un appareil plus exact que l'on appelle étalon. Dans notre cas, l'étalon est le dynamomètre. Cette opération consiste à réaliser un essai de traction au cours duquel nous relevons les forces lues sur le dynamomètre ainsi que le signal transmis par la jauge de déformation lue sur micro.

Les valeurs ainsi obtenues (tableau IV.1) sont exploitées dans le but de tracer la courbe d'étalonnage du capteur et par la suite déduire l'équation donnant les valeurs des forces appliquées.

Ceci dit, l'étalonnage devrait se faire fréquemment afin d'éviter les dérives des instruments de mesure.

IV.4.2 Déroulement de l'étalonnage

Nous soumettons une éprouvette à un essai de traction au cours duquel nous prélevons les valeurs des charges appliquées et celle du signal correspondant. Ces données (tableau IV.1), serviront à dessiner le graphe charge en fonction du signal électrique (figure suivante) qui représente la courbe d'étalonnage de notre capteur, et nous permet aussi de déduire son coefficient d'étalonnage.

Signal électrique (mv/v)	Charges lues sur le dynamomètre(KN)
0	0
290	5000
490	10000
690	15000
900	20000
1011	22

Tableau IV.1 : valeurs du signal et charges lues.

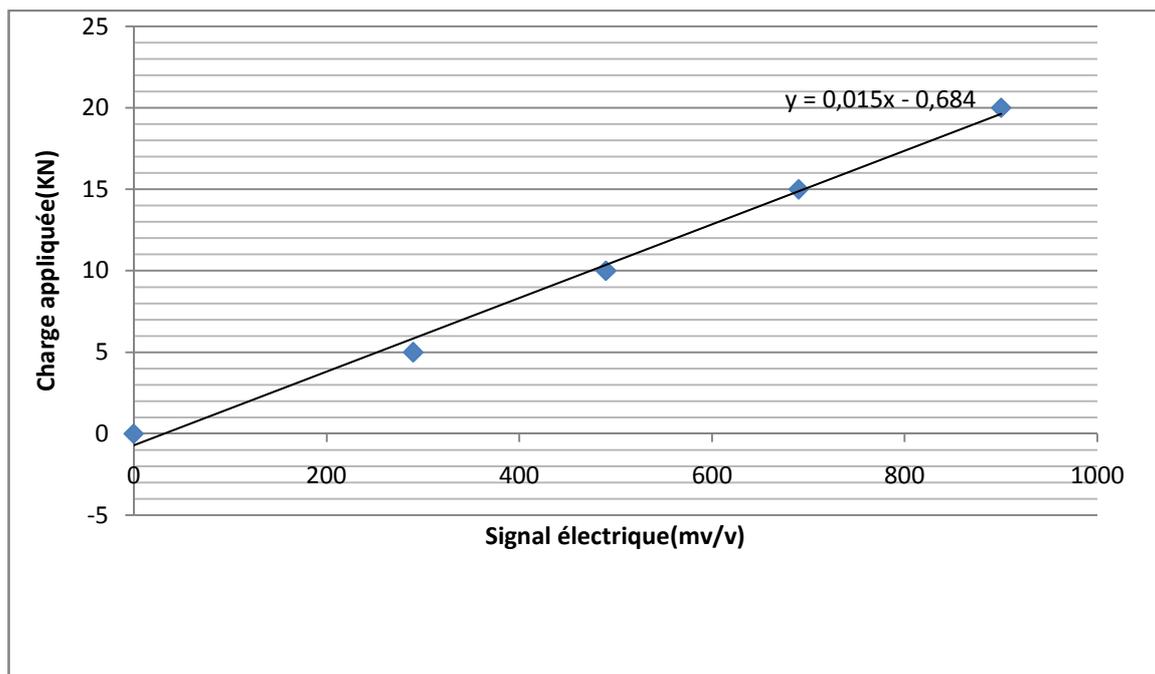


Figure IV.9 : courbe d'étalonnage du capteur.

La fonction (f) représente la loi nous permettant de calculer pour chaque valeur lue du signal la valeur de la charge (pression) correspondante.

$$F(x) = y = 0,015x - 0,684$$

tan $\varphi=0,015$, représente le coefficient d'étalonnage du capteur.

Donc pour chaque valeur de **x** correspond une valeur de **y**. Où **x** et **y** représentent respectivement le signal lu et la charge appliquée.

V.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 de 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. [4]

Ce chapitre a comme objectif :

- de faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués;
- de tracer la courbe de traction pour le matériau utilisé;
- d'interpréter les résultats obtenus: déterminer la limite élastique, l'allongement à rupture, etc.
- d'estimer la précision de mesure.

V.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.



Figure V.1 : les éprouvettes de traction.

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 fixent ce rapport à $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 5,65$ soit, $L_0 = 5 \cdot d_0$ pour les éprouvettes cylindriques (diamètre d_0), ou alternativement $\frac{L_0}{\sqrt{S_0}} = 11,3$ soit, $L_0 = 10 \cdot d_0$.

La figure V.2 montre un exemple d'éprouvette avec têtes fileées. Ce type est très souvent utilisé en raison de sa fixation simple et sûre, en particulier lorsqu'il s'agit d'effectuer des essais de traction avec des extensomètres de précision. Les éprouvettes fileées présentent en plus l'avantage de se prêter parfaitement à des essais cycliques, changeant d'un état de compression à un état de traction. Le jeu lors du passage reste minimal.

V.2.1 Dimension des éprouvettes

La dimension des éprouvettes de traction diffère selon l'épaisseur du produit testé :

.ép. <3 mm : largeur 20mm et longueur 80 mm

.ép. >3 mm : largeur 30mm et longueur $5,65 \cdot S_0$, avec $S_0 = \text{largeur} \times \text{épaisseurs}$.

La dimension des éprouvettes varie aussi selon les pays : Japon (norme JIS) USA (norme ASTM)

Ces variations de taille d'éprouvettes se traduisent par des **valeurs de caractéristiques mécaniques non comparables**, mais qui peuvent cependant être converties d'une norme à l'autre sur la base de corrélations largement vérifiées.

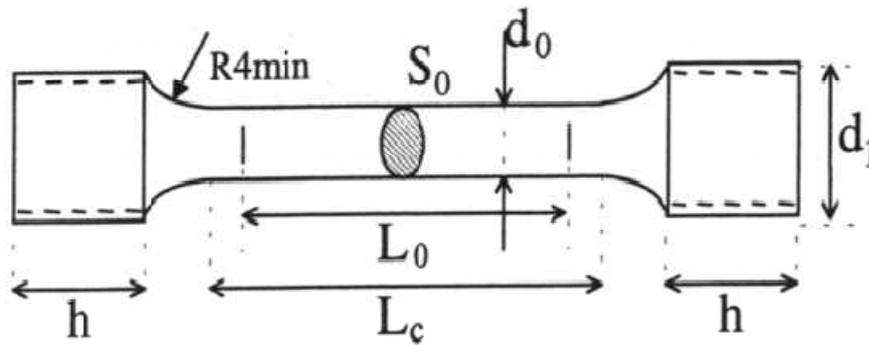


Figure V.2 : éprouvette de traction avec tête filetée.

$d_0 = \varnothing$ partie calibrée

$d_1 = \varnothing$ des têtes filetées

$L_0 =$ longueur entre repère = $5 \cdot d_0$

$L_c =$ longueur calibrée

$h =$ longueur des têtes

V.3 Les machine de traction

Lors de la conception ou de la fabrication d'un nouveau produit, il est bien souvent nécessaire d'en contrôler les caractéristiques mécaniques : sa résistance à la rupture, sa réponse à une sollicitation statique ou dynamique, ses caractéristiques d'élasticité, ou encore ses limites en compression. Pour cela, on utilise des machines d'essais mécaniques. Employées en laboratoire ou en production, elles permettent, suivant les accessoires utilisés, de réaliser des essais de traction, de compression ou de flexion. Pour choisir la machine d'essais la mieux adaptée à l'application, il faut prendre en compte de nombreux critères. Parmi eux, la nature du matériau à contrôler et le type de sollicitations que l'on souhaite appliquer sont déterminants.

En laboratoire de recherche ou en production, les machines d'essais mécaniques sont souvent incontournables. Destinées à une très large variété d'applications, elles permettent aussi bien d'évaluer le comportement d'un nouveau matériau lorsqu'il est soumis à une sollicitation mécanique, que de contrôler la résistance à la rupture d'un produit fini. Les machines d'essais de traction se composent généralement d'un bâti rigide, constitué d'une ou de deux colonnes de guidage et de deux traverses horizontales (l'une fixe, l'autre mobile). La traverse mobile et le plateau de base sont dotés de mâchoires entre lesquelles on attache la pièce à tester (figure V.3).

Le plus souvent, le même bâti peut aussi être utilisé pour réaliser des essais de **compression**. Il suffit pour cela de remplacer les accessoires de serrage de la pièce par des outils adaptés à ce type d'essai (tels que des plateaux de compression). Quant à l'essai de **flexion**, il peut être considéré comme un essai de compression un peu particulier. Dans ce cas, la pièce ne prend pas appui sur un plateau dans l'axe d'application de la charge, mais sur des appuis excentrés formant un banc de flexion. Au lieu de mesurer l'allongement de la pièce, comme dans le cas d'un essai de traction, on mesure alors la déformation (ou flèche) correspondant à la charge appliquée... Enfin, on peut même ajouter à certaines machines de traction une tête de torsion, pour réaliser des essais combinés de traction et torsion.

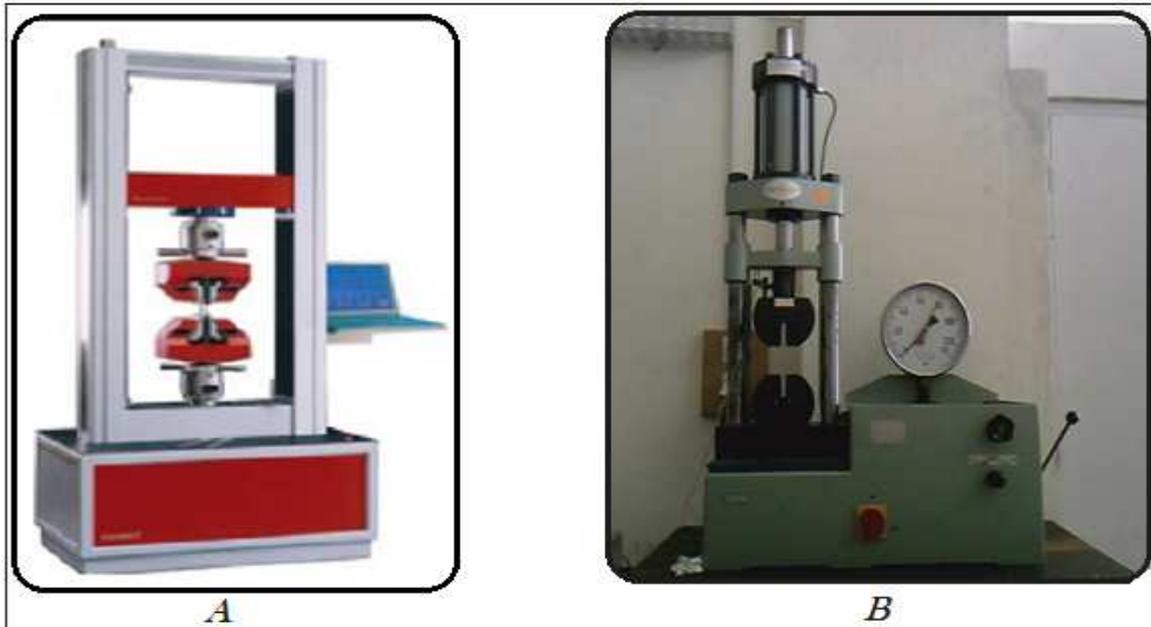


Figure V.3 : Machine de traction ADAMEL(A), et OEHLGASS(B).

Le choix d'une machine d'essais ne se limite pas à la sélection d'un bâti, d'un système d'entraînement et des accessoires appropriés. Avant de faire son choix, il faut prendre en compte toutes les contraintes de l'application et se poser de multiples questions : Quelle est la nature du matériau ? A-t-on une idée de la force à laquelle il sera soumis ? A-t-on besoin d'en mesurer précisément la déformation ? A quelle vitesse et à quelle fréquence se déroulera l'essai ? Utilisera-t-on la machine dans un laboratoire de recherche ou en production ? Souhaite-t-on associer la sollicitation mécanique à un essai en température ? Quel type de résultats recherche-t-on ? A-t-on besoin d'un pilotage manuel ou automatique ?

Ce sont ces questions, et d'autres encore, qui permettent de bien cerner son besoin. Pour y répondre, il faut prendre en compte des critères très spécifiques.

V.3.1 Vitesse de l'essai

La vitesse de l'essai est limitée et dépend du matériau :

Acier $V_{MAX} \leq 0,15.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 30N/mm^2/sec$

Aluminium $V_{MAX} \leq 0,009.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 10N/mm^2/sec$

Cuivre $V_{MAX} \leq 0,006.L_0$ (mm/mn) ou $\leq 10N/mm^2/sec$

V.3.2 Machine de traction « OEHLGASS »

La machine OEHLGASS, est Comme toute machine de traction hydraulique dotée d'un vérin de traction (de type MP12) et d'un porte outil sensée recevoir la tête de serrage supérieur, de deux colonnes et une traverse mobile ainsi qu'une partie inferieure fixe laquelle recevras la tête de serrage inferieure.

C'est une machine de traction manuelle, donc le contrôle de la course du vérin se fait à l'aide d'une manivelle ou soupape de levage. Pour l'indication de la force appliquée aux éprouvettes, la machine est équipée d'un dynamomètre sur lequel sont indiqués les devisions de force allant de 0KN à 120KN, sans toutefois dépasser cette valeur (120KN), afin bien sur de préserver la machine de tout imprévus.

Elément	désignation	/	désignation
1	Presse hydraulique MP12	8	Soupape de levage
2	Colonnes	9	Vitesse de levage
3	Porte- outil filetage M 40x 1,5	10	Soupape de limitation de force et levier de blocage
4	Comparateur	11	Traverse
5	Tige	12	Partie inferieure
6	Soupape de guidage	13	Indicateur de force
7	Interrupteur		

Tableau V.1 : Eléments de la machine de traction OEHLGASS.

○ 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 hydraulique

- . Débit max: 1cm³/tour
- . Puissance absorbée: 0,55kW

Plages de mesure

- . Force: 0...120kN
- . Déplacement: 0...150mm
- . 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 la commande du débit d'huile.

À vide descente ou 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 de 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.

V.3.2 dimensions utilisées sur machine de traction « OEHLGASS »

La machine est conçue pour recevoir des éprouvettes de traction standards de forme cylindriques ou plates pour des gammes de matériaux différents, à l'exception des éprouvettes trempées et de dimensions suivantes.

Eprouvettes plates	<i>Largeur maximale</i>	40 mm (larg. idéale)
	<i>Epaisseur maximale</i>	8mm
Eprouvettes rondes	<i>Diamètre de serrage</i>	8 à 10mm

Tableau V.2 : Dimensions des éprouvettes utilisées sur la machine OEHLGASS.

V.4 Exploitations de l'essai

V.4.1 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).

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (\text{éq.V.1})$$

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (\text{éq.V.2})$$

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

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

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

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

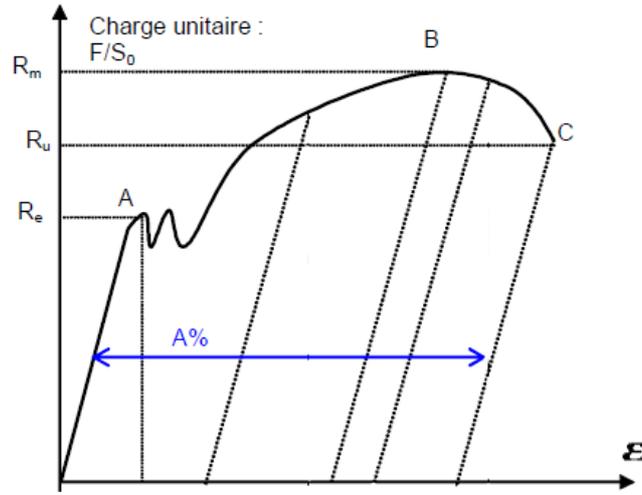


Figure V.5 : Diagramme de traction.

Voici quelques unes des allures des courbes de traction de certains matériaux :

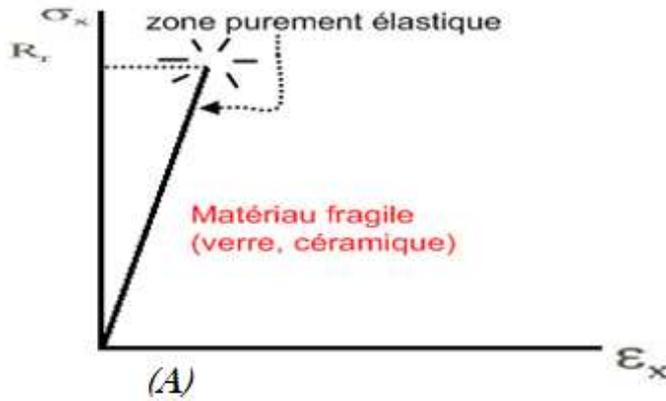


Figure V.5.1 : Matériau fragile.

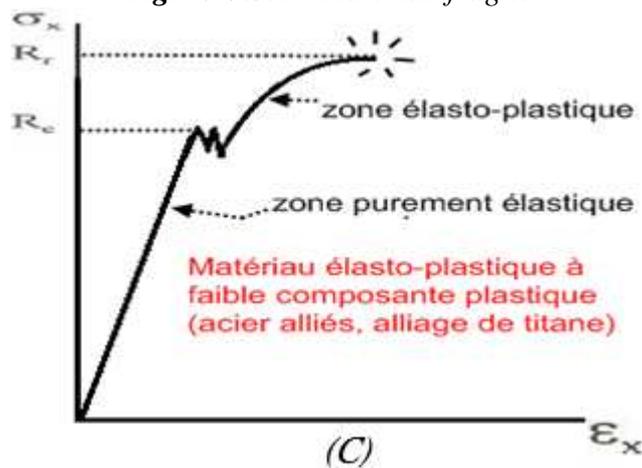


Figure V.5.2 : Matériau élasto-plastique.

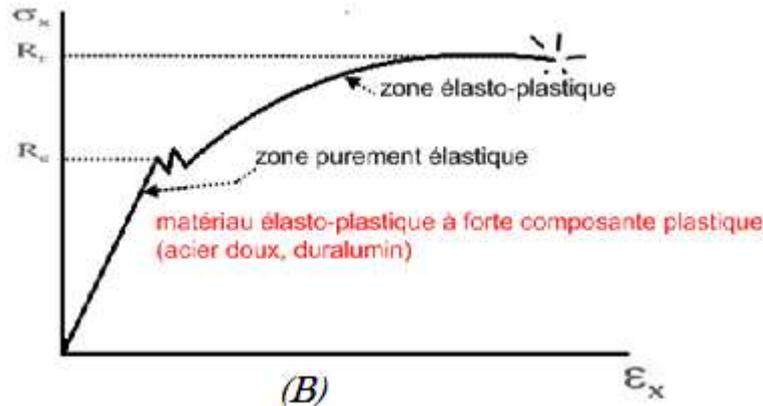


Figure V.5.3 : Matériau élasto-plastique à forte composante plastique.

V.4.2 Caractéristiques mécaniques

V.4.2.1 module de Young

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 (V.2) 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.

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

Tableau V.3 : Module d'élasticité de certains matériaux.

V.4.2.2 Limite élastique conventionnelle $R_{p0,2}$

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

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

V.4.2.3 Resistance à la traction R_m

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

V.4.2.4 L'allongement à la rupture A

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

Dans cette figure, sont représentés les caractéristiques mécaniques telles R_m , R_e , $R_{e0,2}$, ou l'allongement A .

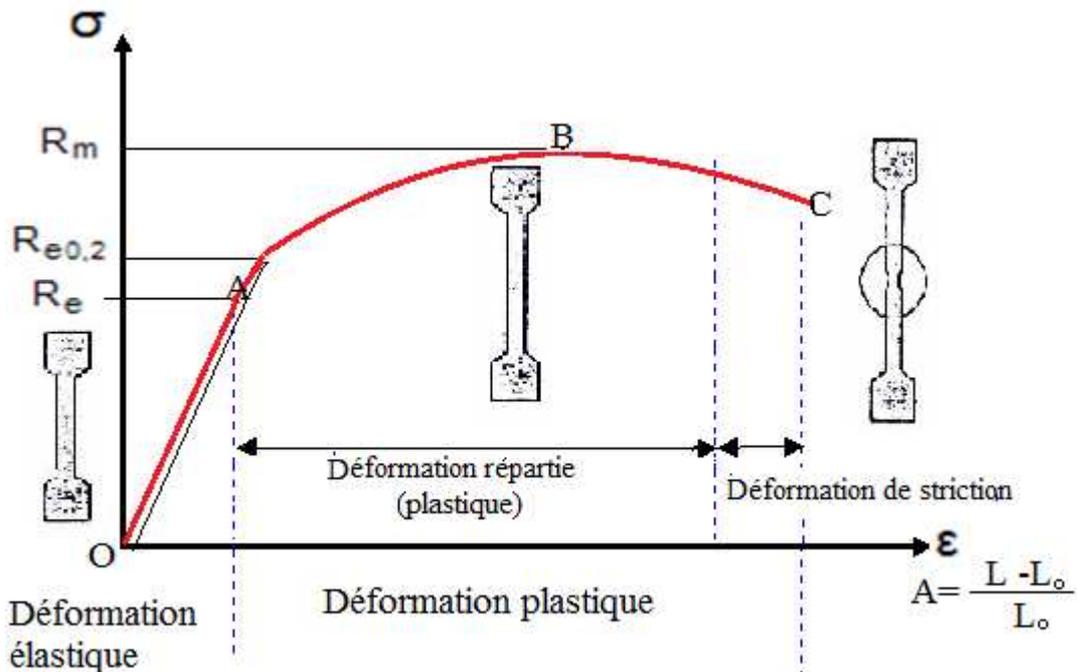


Figure V.6 : Déformation élastique et plastique visualisées sur une courbe de traction.

A ces caractéristiques mécaniques, on peut ajouter :

V.4.2.5 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) :

$$Z\% = (S_0 \cdot S_u / S_r) \cdot 100 \quad (\text{éq.V.3})$$

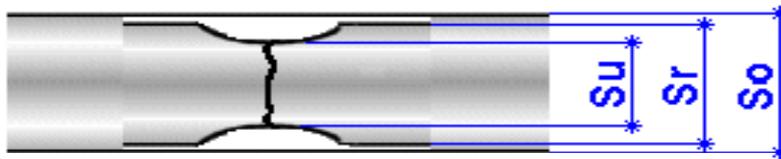
2. allongement de striction(Z_u) :

$$Z_u\% = (S_0 \cdot S_u / S_u) \cdot 100 \quad (\text{éq.V.4})$$

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



S_0 : Dimension éprouvette initiale

S_r : Dimension éprouvette après rupture

S_u : Dimension de la striction après rupture

Figure V.7 : localisation de la striction dans une éprouvette en traction.

V.4.2.6 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. A 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 (figure V.8).

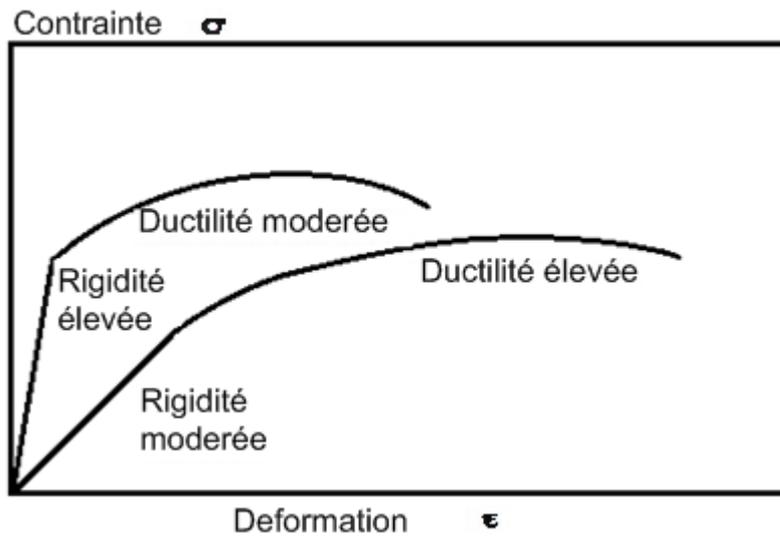


Figure V.8 : courbe de déformation pour matériaux ductile et fragile.

V.4.2.7 La ténacité

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.

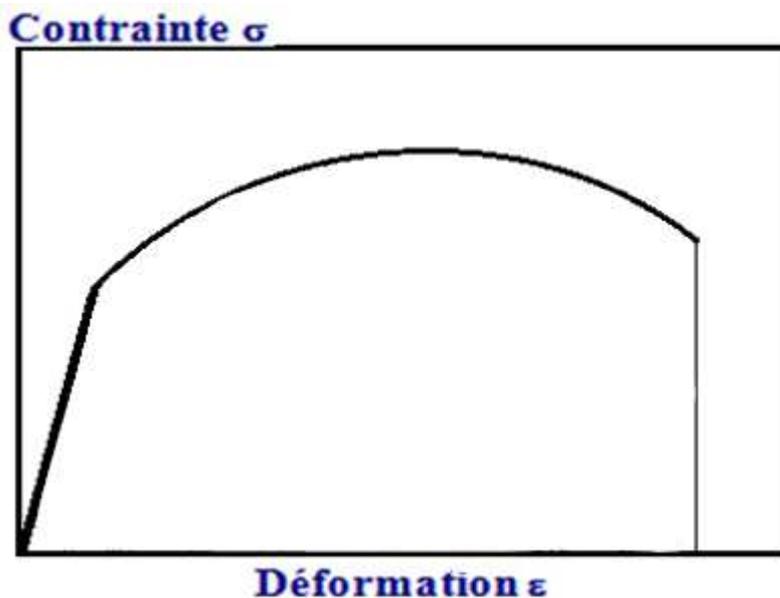


Figure V.9 : Ténacité = aire sous la courbe.

V.4.2.8 La rigidité

Elle 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.

V.5 Réalisation d'un essai de traction

Après avoir monté les deux capteurs (capteur de pression et de déplacement) sur la machine OEHLGASS, et branché les jauges à la chaîne d'acquisition puis étalonné les deux capteurs. Nous étions enfin prêts à réaliser un essai complètement assisté par ces deux capteurs.

L'essai à réaliser est l'essai de traction. Les éprouvettes sont plates, en acier, usinées à l'atelier, et de dimensions suivantes :

- Longueur totale, $L= 176\text{mm}$
- Longueur utile (entre repères), $l= 74\text{mm}$
- Largeur, $A= 12\text{mm}$
- Epaisseur, $e=4\text{mm}$

L'essai est réalisé à une vitesse d'environ 1mm/mn.

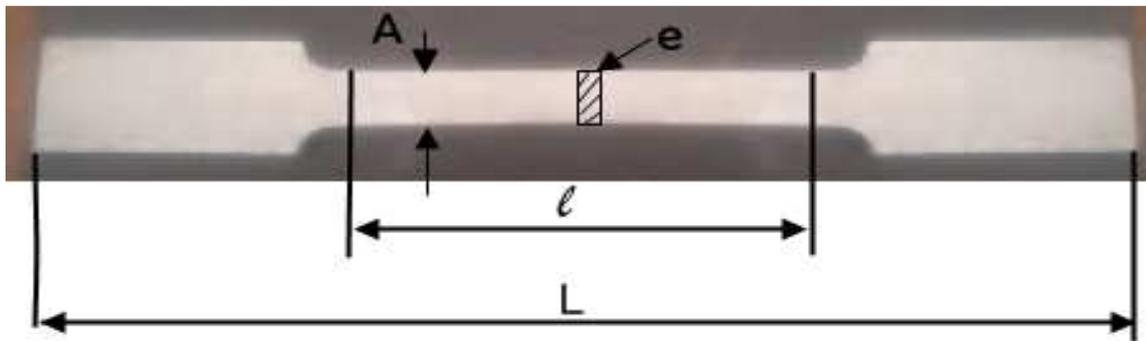


Figure V.10 : Dimensions de l'éprouvette utilisée.

Les résultats de l'essai de traction sont donnés dans le tableau suivant:

Signale de force mv/v	signale déplacement m v/v	ΔL (mm)	F (N)	σ (N/mm ²)	ϵ
0	0	0	0	0	0,00
66,7	458,15	4,5815	1013,84	21,12	1,01E-04
67,6	458,9	4,589	1027,52	21,40	2,03E-04
68,2	459,65	4,5965	1036,64	21,59	3,04E-04
71,5	460,4	4,604	1086,8	22,64	4,05E-04
80,3	461,15	4,6115	1220,56	25,42	5,07E-04
90,6	461,9	4,619	1377,12	28,69	6,08E-04
102	462,65	4,6265	1550,4	32,30	7,09E-04
114,7	463,4	4,634	1743,44	36,32	8,11E-04
128,9	464,15	4,6415	1959,28	40,81	9,12E-04
144,8	464,9	4,649	2200,96	45,85	1,01E-03
162,8	465,65	4,6565	2474,56	51,55	1,11E-03
182,4	466,4	4,664	2772,48	57,76	1,22E-03

205,2	467,15	4,6715	3119,04	64,98	1,32E-03
231,5	467,9	4,679	3518,8	73,30	1,42E-03
261,7	468,65	4,6865	3977,84	82,87	1,52E-03
296	469,4	4,694	4499,2	93,73	1,62E-03
333,7	470,15	4,7015	5072,24	105,67	1,72E-03
375	470,9	4,709	5700	118,75	1,82E-03
420,2	471,65	4,7165	6387,04	133,06	1,93E-03
468,8	472,4	4,724	7125,76	148,45	2,03E-03
520,8	473,15	4,7315	7916,16	164,92	2,13E-03
576	473,9	4,739	8755,2	182,4	2,23E-03
633,6	474,65	4,7465	9630,72	200,64	2,33E-03
693,4	475,4	4,754	10539,68	219,57	2,43E-03
756,5	476,15	4,7615	11498,8	239,55	2,53E-03
824,2	476,9	4,769	12527,84	260,99	2,64E-03
893,8	477,65	4,7765	13585,76	283,03	2,74E-03
964,5	478,4	4,784	14660,4	305,42	2,84E-03
1035,5	479,15	4,7915	15739,6	327,90	2,94E-03
1105,3	479,9	4,799	16800,56	350,01	3,04E-03
1171,9	480,65	4,8065	17812,88	371,10	3,14E-03
1223,5	481,4	4,814	18597,2	387,44	3,24E-03
1238	482,15	4,8215	18817,6	392,03	3,34E-03
1255,9	482,9	4,829	19089,68	397,70	3,45E-03
1257,6	483,65	4,8365	19115,52	398,24	3,55E-03
1256,8	484,4	4,844	19103,36	397,98	3,65E-03
1245	494,3	4,943	18924	394,25	4,99E-03
1249,9	503,1	5,031	18998,48	395,80	6,18E-03
1259,4	512,5	5,125	19142,88	398,81	7,45E-03
1253,8	522,2	5,222	19057,76	397,03	8,76E-03
1257,1	531,7	5,317	19107,92	398,08	1,00E-02
1251,9	541,6	5,416	19028,88	396,4	1,14E-02
1252,7	549,7	5,497	19041,04	396,68	1,25E-02
1249,6	559,5	5,595	18993,92	395,70	1,38E-02
1247,3	569,3	5,693	18958,96	394,97	1,51E-02
1250	578,7	5,787	19000	395,83	1,64E-02
1261,8	587,3	5,873	19179,36	399,57	1,76E-02
1260,9	596,6	5,966	19165,68	399,28	1,88E-02
1242,6	606,8	6,068	18887,52	393,49	2,02E-02
1236,4	616,7	6,167	18793,28	391,52	2,15E-02
1242,1	626,2	6,262	18879,92	393,33	2,28E-02
1249,6	635,5	6,355	18993,92	395,70	2,41E-02
1268,5	644,3	6,443	19281,2	401,69	2,53E-02
1289,4	652,9	6,529	19598,88	408,31	2,64E-02
1304,1	661,3	6,613	19822,32	412,96	2,76E-02
1318	670,1	6,701	20033,6	417,36	2,87E-02
1329,4	678,6	6,786	20206,88	420,97	2,99E-02
1339,5	687,7	6,877	20360,4	424,17	3,11E-02
1348,9	696,7	6,967	20503,28	427,15	3,23E-02
1357,8	705,7	7,057	20638,56	429,97	3,36E-02
1366,2	714,4	7,144	20766,24	432,63	3,47E-02

1374,7	722,6	7,226	20895,44	435,32	3,58E-02
1382,8	731,8	7,318	21018,56	437,88	3,71E-02
1390,4	740,8	7,408	21134,08	440,29	3,83E-02
1398	749,2	7,492	21249,6	442,7	3,94E-02
1405,1	757,4	7,574	21357,52	444,94	4,05E-02
1412,3	766,4	7,664	21466,96	447,22	4,18E-02
1418,9	775,3	7,753	21567,28	449,31	4,30E-02
1425,7	784,3	7,843	21670,64	451,47	4,42E-02
1432,1	793	7,93	21767,92	453,49	4,54E-02
1438,2	802	8,02	21860,64	455,40	4,66E-02
1444,1	810,7	8,107	21950,32	457,29	4,77E-02
1449,8	819,5	8,195	22036,96	459,10	4,89E-02
1455,5	828,4	8,284	22123,6	460,90	5,01E-02
1460,9	837,2	8,372	22205,68	462,61	5,13E-02
1466,2	844,2	8,442	22286,24	464,29	5,23E-02
1471,6	853	8,53	22368,32	466,00	5,35E-02
1476,8	862	8,62	22447,36	467,65	5,47E-02
1481,8	870,5	8,705	22523,36	469,23	5,58E-02
1486,9	878,6	8,786	22600,88	470,85	5,69E-02
1491,6	887,1	8,871	22672,32	472,34	5,81E-02
1496,3	895,6	8,956	22743,76	473,82	5,92E-02
1500,8	904,1	9,041	22812,16	475,25	6,04E-02
1503,9	912,5	9,125	22859,28	476,23	6,15E-02
1507,8	920,7	9,207	22918,56	477,47	6,26E-02
1511,4	929,1	9,291	22973,28	478,61	6,37E-02
1515,1	937,2	9,372	23029,52	479,78	6,48E-02
1518,7	945,5	9,455	23084,24	480,92	6,60E-02
1522,4	954,2	9,542	23140,48	482,09	6,71E-02
1526,3	962,6	9,626	23199,76	483,32	6,83E-02
1530,1	970,9	9,709	23257,52	484,53	6,94E-02
1533,6	979,5	9,795	23310,72	485,64	7,06E-02
1540,6	996,3	9,963	23417,12	487,85	7,28E-02
1544,1	1004,6	10,046	23470,32	488,96	7,39E-02
1547,4	1012,8	10,128	23520,48	490,01	7,51E-02
1550,6	1021	10,21	23569,12	491,02	7,62E-02
1553,7	1029,4	10,294	23616,24	492,00	7,73E-02
1556,5	1037,8	10,378	23658,8	492,89	7,84E-02
1559,4	1045,9	10,459	23702,88	493,81	7,95E-02
1562,1	1054,2	10,542	23743,92	494,66	8,06E-02
1564,7	1062,5	10,625	23783,44	495,48	8,18E-02
1567,4	1071	10,71	23824,48	496,34	8,29E-02
1569,9	1079,4	10,794	23862,48	497,13	8,41E-02
1572,3	1087,8	10,878	23898,96	497,89	8,52E-02
1575,1	1096,2	10,962	23941,52	498,78	8,63E-02
1577,5	1104,4	11,044	23978	499,54	8,74E-02
1580,1	1112,4	11,124	24017,52	500,36	8,85E-02
1582,33	1120,4	11,204	24051,416	501,07	8,96E-02
1584,5	1128,9	11,289	24084,4	501,75	9,07E-02
1586,7	1137,1	11,371	24117,84	502,45	9,19E-02

1588,8	1145,4	11,454	24149,76	503,12	9,30E-02
1590,8	1153,8	11,538	24180,16	503,75	9,41E-02
1593,1	1162,1	11,621	24215,12	504,48	9,52E-02
1594,9	1170,2	11,702	24242,48	505,051	9,63E-02
1596,8	1176,8	11,768	24271,36	505,65	9,72E-02
1598,8	1185	11,85	24301,76	506,28	9,83E-02
1600,6	1193,5	11,935	24329,12	506,85	9,95E-02
1602,5	1201,7	12,017	24358	507,45	1,01E-01
1604,3	1209,4	12,094	24385,36	508,02	1,02E-01
1605,9	1216,8	12,168	24409,68	508,53	1,03E-01
1607,6	1225,1	12,251	24435,52	509,07	1,04E-01
1609,1	1233,4	12,334	24458,32	509,54	1,05E-01
1610,7	1241,1	12,411	24482,64	510,05	1,06E-01
1612,5	1249	12,49	24510	510,62	1,07E-01
1614,2	1257,3	12,573	24535,84	511,16	1,08E-01
1615,5	1265	12,65	24555,6	511,57	1,09E-01
1617	1273	12,73	24578,4	512,05	1,10E-01
1618,6	1281	12,81	24602,72	512,55	1,11E-01
1620,2	1289,1	12,891	24627,04	513,06	1,12E-01
1621,5	1297,2	12,972	24646,8	513,47	1,13E-01
1622,9	1305,3	13,053	24668,08	513,91	1,15E-01
1624	1313,5	13,135	24684,8	514,26	1,16E-01
1625,6	1321,3	13,213	24709,12	514,77	1,17E-01
1627	1329,3	13,293	24730,4	515,21	1,18E-01
1628,3	1337,2	13,372	24750,16	515,62	1,19E-01
1629,5	1345,2	13,452	24768,4	516,00	1,20E-01
1630,8	1352,8	13,528	24788,16	516,42	1,21E-01
1632,4	1360	13,6	24812,48	516,92	1,22E-01
1633,6	1368,3	13,683	24830,72	517,30	1,23E-01
1634,8	1376,3	13,763	24848,96	517,68	1,24E-01
1635,6	1384,4	13,844	24861,12	517,94	1,25E-01
1636,6	1392,4	13,924	24876,32	518,25	1,26E-01
1637,3	1399,2	13,992	24886,96	518,47	1,27E-01
1638,2	1407,4	14,074	24900,64	518,76	1,28E-01
1639,5	1415,3	14,153	24920,4	519,17	1,29E-01
1640	1423,5	14,235	24928	519,33	1,31E-01
1640,7	1431,2	14,312	24938,64	519,55	1,32E-01
1641,6	1438,5	14,385	24952,32	519,84	1,33E-01
1642,7	1446,6	14,466	24969,04	520,18	1,34E-01
1643,8	1454,5	14,545	24985,76	520,53	1,35E-01
1644,7	1462,5	14,625	24999,44	520,82	1,36E-01
1645,7	1470,6	14,706	25014,64	521,13	1,37E-01
1646,5	1477,9	14,779	25026,8	521,39	1,38E-01
1647,1	1485,2	14,852	25035,92	521,58	1,39E-01
1647,6	1492,9	14,929	25043,52	521,78	1,40E-01
1648,1	1500,4	15,004	25051,12	521,89	1,41E-01
1648,5	1507,8	15,078	25057,2	522,02	1,42E-01
1648,6	1515,9	15,159	25058,72	522,05	1,43E-01
1649	1523,5	15,235	25064,8	522,18	1,44E-01

1649,5	1531,7	15,317	25072,4	522,34	1,45E-01
1649,9	1539,5	15,395	25078,48	522,46	1,46E-01
1650,7	1547,2	15,472	25090,64	522,72	1,47E-01
1651,5	1554,8	15,548	25102,8	522,97	1,48E-01
1651,9	1562,3	15,623	25108,88	523,10	1,49E-01
1651,9	1570,5	15,705	25108,88	523,10	1,50E-01
1652	1577,7	15,777	25110,4	523,13	1,51E-01
1652,2	1585,7	15,857	25113,44	523,19	1,52E-01
1652,3	1593,9	15,939	25114,96	523,22	1,54E-01
1652,3	1601,5	16,015	25114,96	523,22	1,55E-01
1652,6	1609,2	16,092	25119,52	523,32	1,56E-01
1652,7	1617,2	16,172	25121,04	523,35	1,57E-01
1652,8	1625,1	16,251	25122,56	523,38	1,58E-01
1652,8	1632,7	16,327	25122,56	523,38	1,59E-01
1652,7	1639,6	16,396	25121,04	523,33	1,60E-01
1653	1647,6	16,476	25125,6	523,45	1,61E-01
1653	1655,7	16,557	25125,6	523,45	1,62E-01
1652,9	1663,6	16,636	25124,08	523,41	1,63E-01
1652,9	1671,4	16,714	25124,08	523,41	1,64E-01
1652,8	1679,4	16,794	25122,56	523,38	1,65E-01
1652,6	1687,3	16,873	25119,52	523,32	1,66E-01
1652	1695	16,95	25110,4	523,13	1,67E-01
1650,7	1710,8	17,108	25090,64	522,72	1,69E-01
1650	1718,7	17,187	25080	522,50	1,70E-01
1649,4	1726,6	17,266	25070,88	522,31	1,72E-01
1648,3	1734,3	17,343	25054,16	521,96	1,73E-01
1647,2	1742,1	17,421	25037,44	521,61	1,74E-01
1646,1	1750,1	17,501	25020,72	521,26	1,75E-01
1644,6	1758,1	17,581	24997,92	520,79	1,76E-01
1642,7	1766,2	17,662	24969,04	520,18	1,77E-01
1640,4	1774,1	17,741	24934,08	519,46	1,78E-01
1637,7	1782	17,82	24893,04	518,60	1,79E-01
1634,7	1790	17,9	24847,44	517,65	1,80E-01
1631,8	1797,8	17,978	24803,36	516,73	1,81E-01
1628,6	1805,5	18,055	24754,72	515,72	1,82E-01
1624,8	1812,7	18,127	24696,96	514,52	1,83E-01
1620,8	1820,1	18,201	24636,16	513,25	1,84E-01
1616,4	1828,4	18,284	24569,28	511,86	1,85E-01
1611,5	1836,6	18,366	24494,8	510,30	1,86E-01
1606,1	1844,8	18,448	24412,72	508,58	1,87E-01
1600,5	1853,1	18,531	24327,6	506,82	1,89E-01
1594,2	1861,2	18,612	24231,84	504,83	1,90E-01
1587,6	1869,4	18,694	24131,52	502,74	1,91E-01
1580,7	1877,3	18,773	24026,64	500,55	1,92E-01
1573,3	1885,3	18,853	23914,16	498,21	1,93E-01
1565,6	1893,6	18,936	23797,12	495,77	1,94E-01
1557,4	1901,8	19,018	23672,48	493,17	1,95E-01
1548,4	1909,9	19,099	23535,68	490,32	1,96E-01
1538,7	1918,2	19,182	23388,24	487,25	1,97E-01

1528,5	1926,6	19,266	23233,2	484,02	1,99E-01
1517,5	1935	19,35	23066	480,54	2,00E-01
1505,8	1943,3	19,433	22888,16	476,83	2,01E-01
1492,9	1952	19,52	22692,08	472,75	2,02E-01
1479,4	1960,6	19,606	22486,88	468,47	2,03E-01
1465,1	1968,9	19,689	22269,52	463,94	2,04E-01
1449,7	1977,7	19,777	22035,44	459,07	2,05E-01
1433,6	1986,5	19,865	21790,72	453,97	2,07E-01
1415,8	1995,4	19,954	21520,16	448,33	2,08E-01
1396,7	2004,2	20,042	21229,84	442,28	2,09E-01
1375,8	2013,6	20,136	20912,16	435,67	2,10E-01
1352,2	2023,3	20,233	20553,44	428,19	2,12E-01
1326	2033,2	20,332	20155,2	419,90	2,13E-01
1296,1	2041,9	20,419	19700,72	410,43	2,14E-01

Tableau V.4 : valeurs de forces et déformations de l'essai de traction.

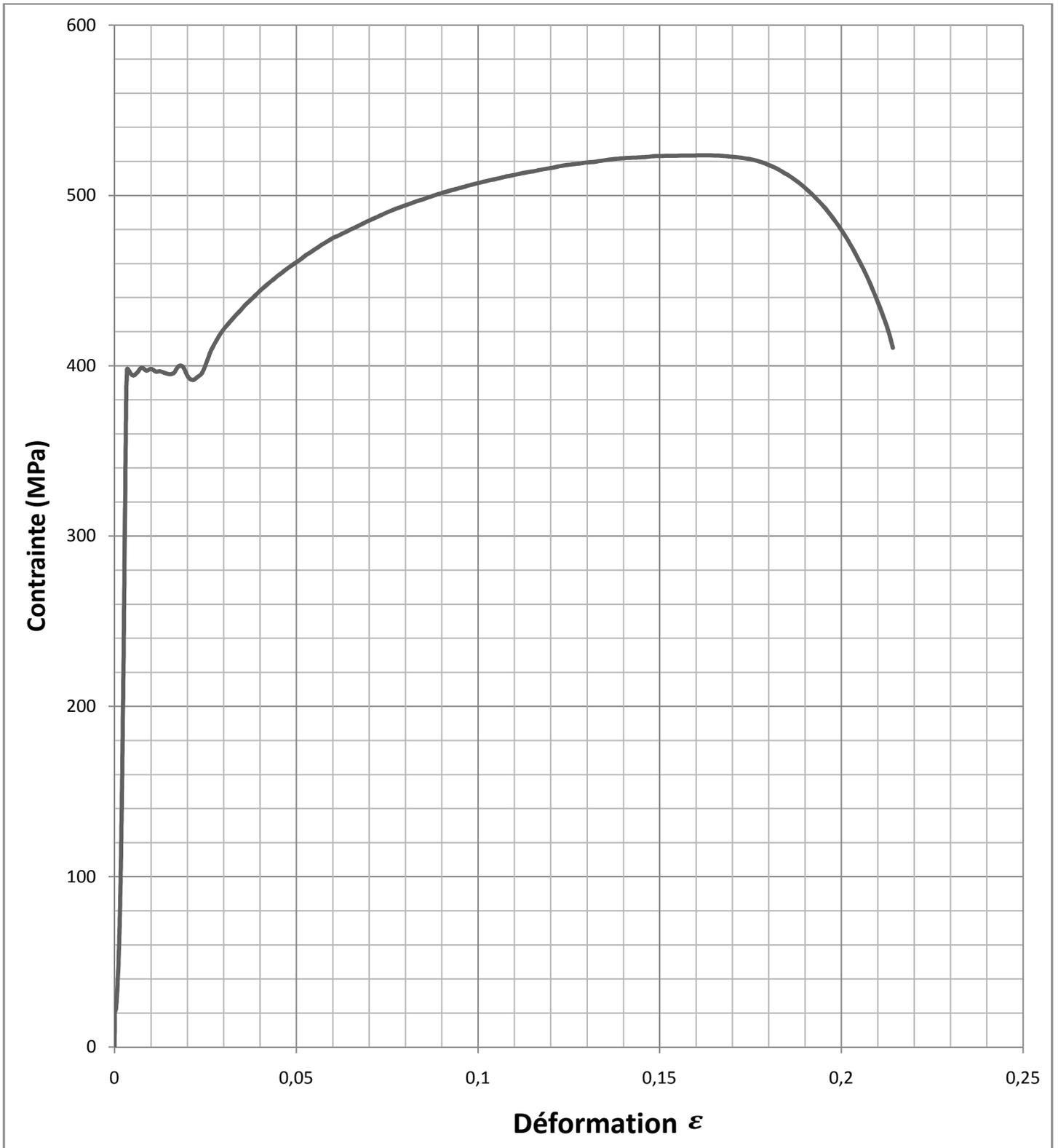


Figure V.11 : graphe contrainte-déformation du matériau.

V.5.1 Interprétation des données

○ **Le module de Young E:**

Correspond à la pente de la droite de traction et vaut :

$$E = 202 \text{ GPa.}$$

○ **La résistance à la traction :**

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

$$R_m = 479 \text{ MPa.}$$

○ **La limite élastique**

Du graphe on trouve que la limite élastique est d'environ:

$$R_e = 525 \text{ MPa.}$$

○ **L'allongement à la rupture :**

$$A = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{89,51 - 74}{74} = 0,20$$

$$A\% = 20\%$$

Sur le graphe ce résultat ne peut être vérifié à cause du glissement.

V.5.2 Estimation de la précision des résultats

Comparons les résultats obtenus avec celles données par les caractéristiques de l'acier

doux [6] :

Caractéristiques mécaniques	Acier XC 38	Acier de l'éprouvette Utilisée
Module de Young E	210 000 MPa	202 000 MPa
Limite élastique R_e	335 à 490 MPa	400 MPa
Resistance à la traction R_m	570 à 830 MPa	525 MPa
Allongement à la rupture A%	16 à 20%	20%

Tableau V.5 : valeurs normalisées de l'acier CX38.

Du tableau on remarque que :

- Le module de Young est proche de la valeur réelle.
- La limite élastique est légèrement supérieur à lamite normalisée, soit 400MPa au lieu de 365MPa.
- La résistance à la traction $R_m = 525 \text{ MPa}$, se situe entre les valeurs maxi et mini des valeurs normalisées (570 et 830 MPa).



Figure V.13 : Eprouvette de traction après rupture.

V-5 CONCLUSION

On a pu appréhender lors de cette recherche tout l'étendu d'utilisation des jauges de contraintes dans l'imagination et l'élaboration des capteurs à jauges extensométriques. Mais aussi le rôle centrale qu'occupe la RDM dans le calcul et la recherche des formes optimales de leurs corps d'épreuves.

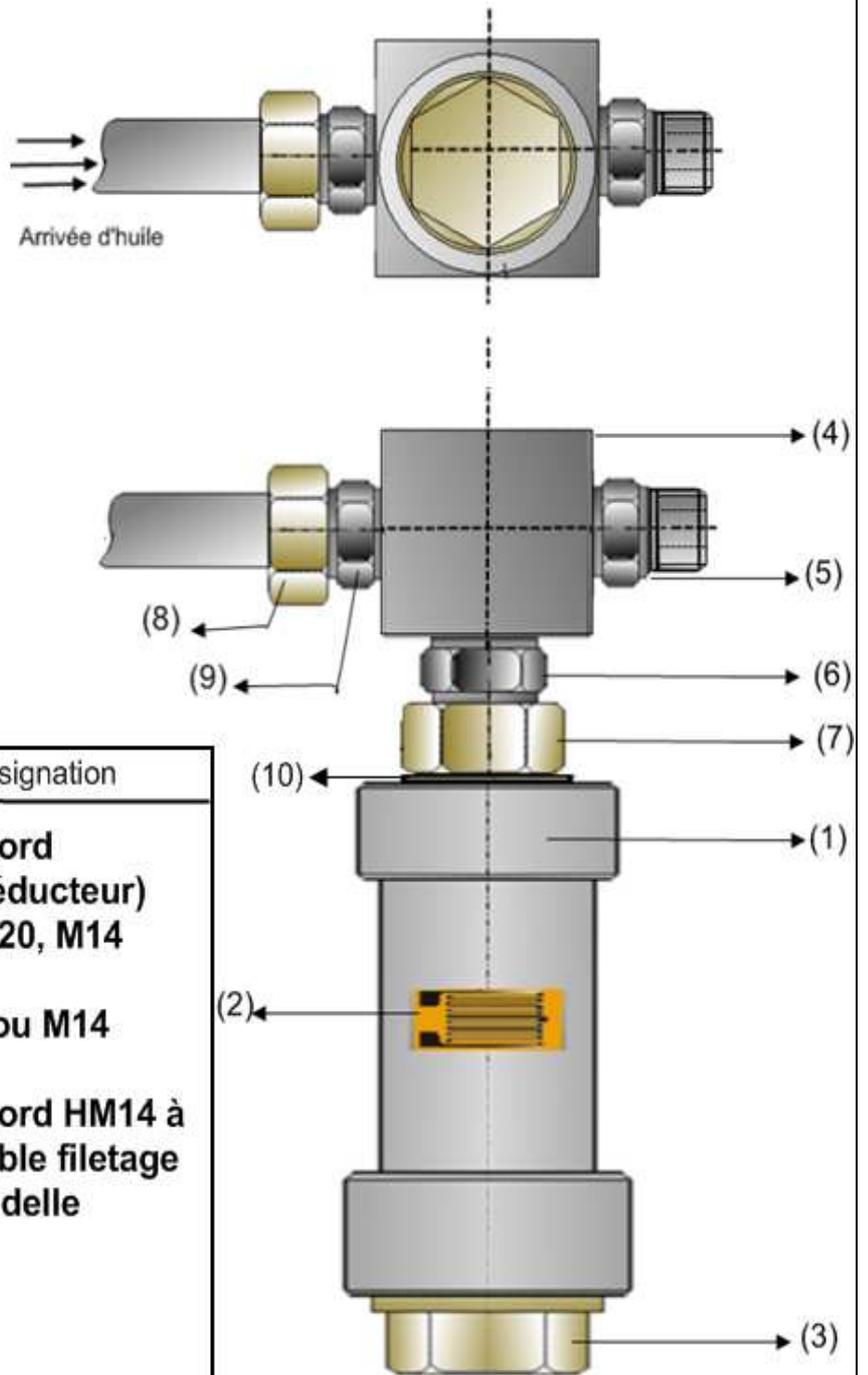
L'essai de traction nous a permis de connaître toutes les informations qu'on peut rechercher sur un matériau.

Outre les limites élastique et plastique, l'allongement à la rupture, nous pouvons également déduire le module d'Young.

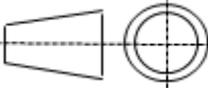
Cependant, il est nécessaire de prendre un certain nombre de précautions qui peuvent influencer sur la qualité des essais à mesurer. Par exemple :

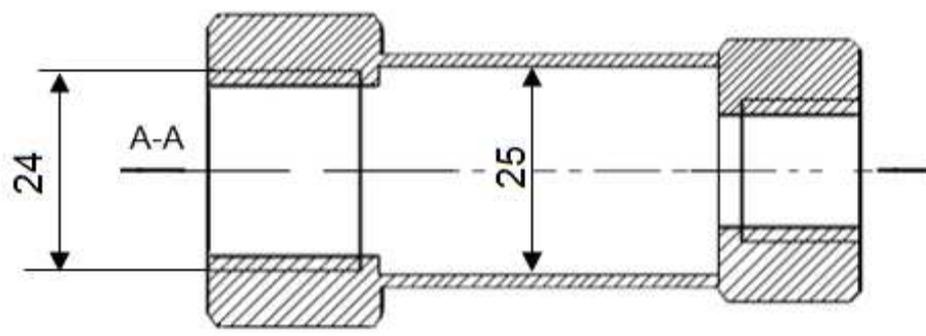
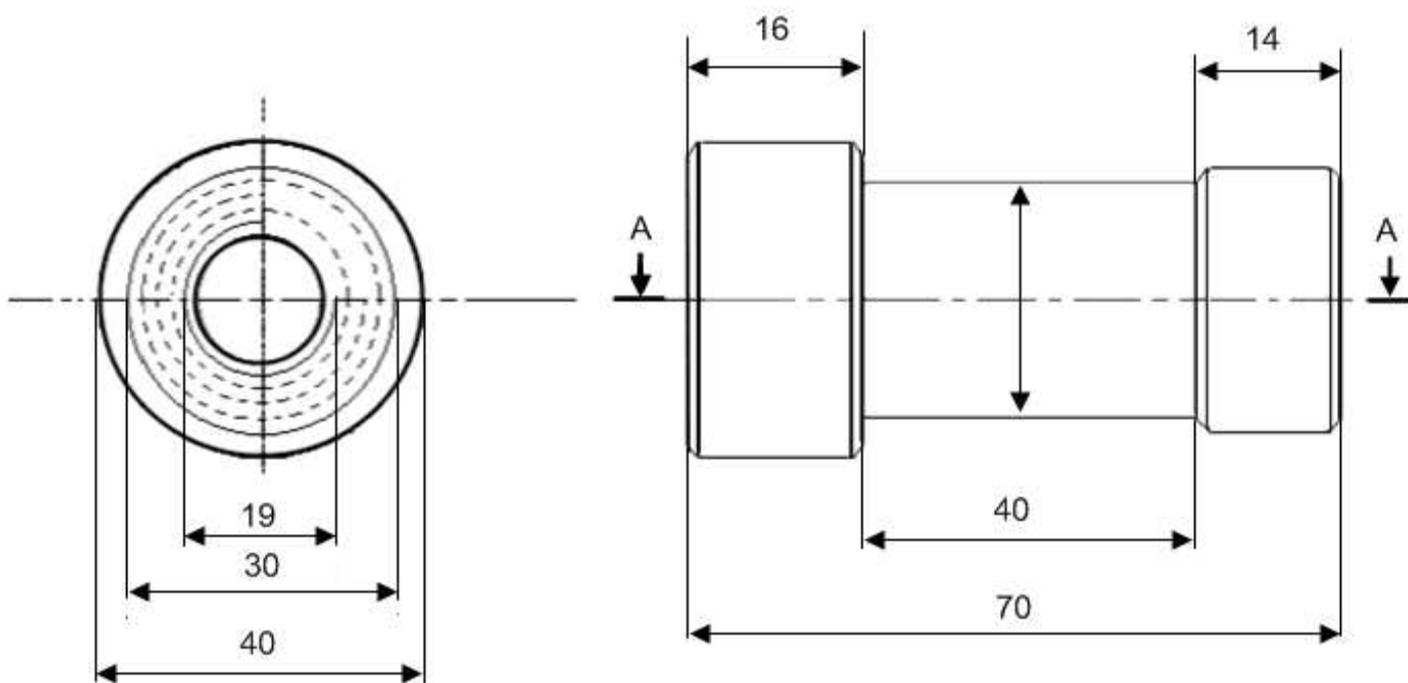
-La qualité de découpage de l'éprouvette, l'ajustement des jauges extensométriques, la vitesse de mise en charge, l'alignement des mors de la machine de traction. (Afin de tirer dans l'axe de l'éprouvette).

Enfin pour de meilleurs résultats, nous proposons la conception d'un capteur de position qui permettra de mesurer directement l'allongement de l'éprouvette, ce capteur sera placé sur l'éprouvette, de manière à éviter à l'essai toute erreur de glissement.



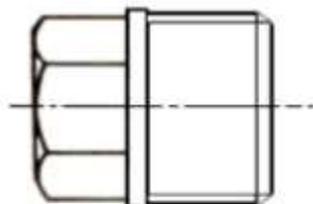
N°	Désignation	N°	Désignation
1	Capteur	7	Racord (réducteur) HM 20, M14
2	Jauge de contraintes	8	Ecrou M14
3	Vis HM 24-20-3.6	9	Racord HM14 à double filetage
4	Répartiteur d'huile	10	Rondelle
5	Racord HM14 à deux filetages		
6	Racord HM14 à deux filetages		

	<p>CAPTEUR DE PRESSION</p>	
<p>A4</p>		

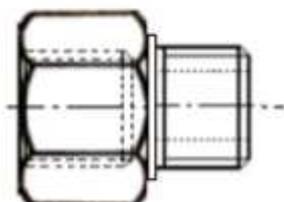


	CYLINDRE CORPS D'EPREUVE	
A4		

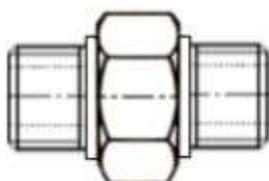
Pièces utilisées pour adapter le capteur à la machine de traction.



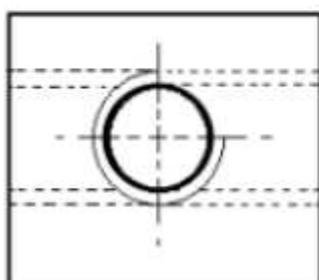
-Vis HM 24-20-3.6
cette vis est utilisée
comme bouchon.



-Raccord, réducteur
de dimension:
HM 20 pour le filetage
M14 pour le taraudage.



-Raccord à double filetage
de dimension:
HM 14
HM 14



-Répartiteur d'huile(T)
de dimensions:
M14

Chapitre I : la pression

<i>Figure I.1 : Référentiels de pression</i>	3
<i>Figure I.2 : Pression hydrostatique</i>	4
<i>Figure I.3 : Classification des instruments de mesure de la pression</i>	6

Chapitre II : Les capteurs

<i>Figure II.1 : Schéma du principe d'un capteur</i>	8
<i>Figure II.2 : Domaine de fonctionnement du capteur</i>	10
<i>Figure II.3 : Principe d'un capteur à jauge de contrainte</i>	10
<i>Figure II.4 : Principe d'un capteur à effet piézoélectrique</i>	11
<i>Figure II.5 : Principe d'un capteur à effet potentiométriques</i>	11
<i>Figure II.6 : Principe d'un capteur à effet HALL12</i>	

Chapitre III : Les capteurs à jauges extensométriques

<i>Figure III.1 : Jauge électrique de déformation</i>	13
<i>Figure III.2 : Montage en pont de Wheatstone</i>	16
<i>Figure III.3 : Disposition des jauges sur un cylindre A, et pièce en traction B</i>	18
<i>Figure III.4 : Étude photoélastique de la géométrie d'un corps d'épreuve représentable par une figure bidimensionnelle</i>	20

Chapitre VI : Conception du capteur

<i>Figure IV.1 : Le cylindre corps d'épreuve</i>	23
<i>Figure IV.2 : Partie 1 (coupe suivant l'axe \vec{GZ})</i>	24
<i>Figure IV.3 : Partie 2 (coupe suivant l'axe \vec{GX})</i>	24
<i>Figure IV.4 : surface de la paroi du cylindre \approx surface d'un rectangle</i>	25
<i>Figure IV.5 : Représentation graphique des contraintes</i>	28
<i>Figure IV.6 : Disposition de la jauge sur le capteur</i>	29
<i>Figure IV.7 : Emplacement du capteur dans la machine</i>	30
<i>Figure IV.8 : Chaîne d'acquisition</i>	30
<i>Figure IV.9 : Courbe d'étalonnage</i>	31

Chapitre V : Essai de traction

<i>Figure V.1 : Les éprouvettes de traction</i>	33
<i>Figure V.2 : Eprouvette de traction avec tête filetée</i>	34
<i>Figure V.3 : Machine de traction ADAMEL(A), et OEHLGASS(B)</i>	35

<i>Figure V.4: Machine de traction OEHLGASS</i>	36
<i>Figure V.5: Diagramme de traction</i>	39
<i>Figure V.5.1: Matériau fragile</i>	39
<i>Figure V.5.2: Matériau élasto-plastique</i>	39
<i>Figure V.5.3: Matériau élasto-plastique à forte composante plastique</i>	40
<i>Figure V.6: Déformation élastique et plastique visualisées sur une courbe de traction</i>	41
<i>Figure V.7: Localisation de la striction dans une éprouvette en traction</i>	42
<i>Figure V.8: Courbe de déformation pour matériaux ductile et fragile</i>	43
<i>Figure V.9: Ténacité = aire sous la courbe</i>	43
<i>Figure V.10: Dimensions de l'éprouvette</i>	44
<i>Figure V.11: Graphe contrainte-déformation du matériau</i>	50
<i>Figure V.12: de traction après rupture</i>	51

Chapitre III : Les capteurs à jauges extensométriques

Tableau III-1 : exemples de capteurs extensométriques 15

Tableau III-2 : Exemples de métaux pour corps d'épreuve 19

Chapitre VI : Conception du capteur

Tableau IV-1 : valeurs du signal et charges lues 30

Chapitre V : Essai de traction

Tableau V-1 : Eléments de la machine de traction OEHLGASS 37

Tableau V-2 : dimensions des éprouvettes utilisées sur la machine OEHLGASS 38

Tableau V-3 : module d'élasticité de certains matériaux 40

Tableau V-4 : valeurs de forces et déformations de l'essai de traction 44

Tableau V-5 : valeurs normalisées de l'acier doux 51

[1]- Technique de l'ingénieur R 2 040, par :

Christian RIBREAU

Docteur des Sciences Institut Universitaire de Technologie de Cachan

Marc BONIS

Docteur ès Sciences Université de Technologie de Compiègne

Jean-Paul GLIGNY

Ingénieur CESTI et ISMCM () Institut Universitaire de Technologie de Cachan et **Jacques***

BEAUFONT

Ingénieur conseil

() CESTI : Centre d'Études supérieures des Techniques Industrielles*

ISMCM : Institut Supérieur des Matériaux et de la Construction Mécanique

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

[3]- GUIDE DU CALCUL EN MECANIQUE. Edition HACHETTE technique

Par **D. SPENLE** : agrégé de mécanique, membre du comité U.N.M 08 à l'union de la normalisation de la mécanique.

Et **R.GOURHANT** : ingénieur arts et métiers, agrégé de mécanique.

[4]- C- Essai de traction

Documentation Internet.

[5]- Dimensionnement des structures

Exercices de perfectionnement sur les bases du comportement élastique

Exemple de réservoir sous pression.doc/version du 01/11/2010/JG

(Géni mécanique et productique techniques aérospatiales, université de Toulouse III).

[6]- guide des sciences et technologies industrielles

Nouvelle édition complétée- AFNOR NATHAN, par Jean-Louis FANCHON.