

TP Essai de traction

1. Introduction

Parmi tous les essais mécaniques utilisés pour caractériser les matériaux, l'essai de traction (inventé par Galilée !) est certainement le plus courant. Il permet de déterminer plusieurs des principales caractéristiques mécaniques d'un matériau telles que la **limite d'élasticité**, la **résistance à la rupture**, l'**allongement à la rupture** et le **coefficient de striction**.

Avec l'équipement adéquat (en particulier pour mesurer avec précision la déformation), on peut également mesurer le module de Young et le coefficient de Poisson. Une fois l'essai de traction bien monté et calibré, son exécution est relativement facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces ou structures mécaniques, allant du tout petit au très grand. Dans la recherche, on l'applique pour la caractérisation de nouveaux matériaux et dans l'industrie on s'en sert pour les contrôles périodiques servant à certifier ou vérifier la qualité des différents matériaux de structure, tels des alliages, des polymères et des composites.

Ce TP a comme objectifs de :

- Comprendre le fonctionnement d'une machine de traction
- Mesurer des courbes de traction sur différents matériaux : métaux et polymères
- Mesurer le module de Young, limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement à rupture et interpréter les résultats obtenus

2. Les éprouvettes

L'essai de traction est exécuté parfois sur des barres de section constante, généralement sur des éprouvettes présentant une **section réduite** où la déformation plastique est localisée (voir Fig. 1). Ces sections réduites sont prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation à la machine de traction et la minimisation des concentrations de contrainte. Ces têtes d'attache ont typiquement une section nettement plus grande que la section réduite afin d'assurer que la contrainte dans les têtes d'attache (contrainte nominale + concentration de contrainte engendrée par le système de fixation ou la transition vers la section réduite) reste toujours inférieure à la limite d'élasticité du matériau.

Il existe des standards relatifs à l'essai de traction qui définissent les dimensions que doivent avoir ces éprouvettes, cf. la bibliographie. Les éprouvettes de traction peuvent être soit **plates**, soit **cylindriques** (voir Fig. 1).

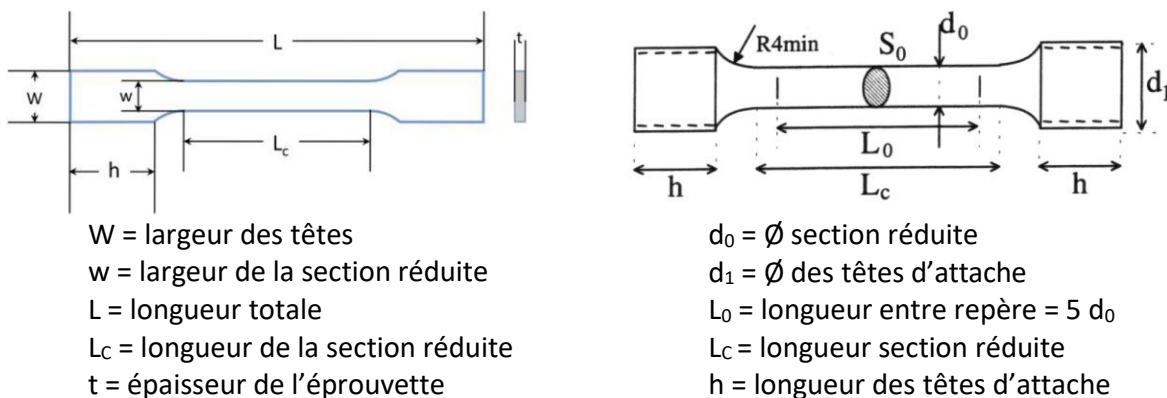


Fig. 1 : Deux exemples d'éprouvette de traction : éprouvette plate (à gauche) et éprouvette cylindrique (à droite).

3. Dispositif de mesure

Une machine de traction dispose d'un capteur de force, d'une traverse, d'un système de fixation adapté à la forme des échantillons et d'un système d'entraînement. La machine est contrôlée par un logiciel qui va définir les paramètres de l'essai et enregistrer la force exercée par la machine ainsi que la déformation de l'éprouvette tout au long de l'essai.

Il existe deux types principaux d'essai :

- Contrôle de déplacement : on assure une vitesse de déplacement constante de la traverse durant l'essai, lequel s'arrête quand on mesure une chute importante de la force (85% durant notre TP).
- Contrôle de force : on assure une vitesse d'augmentation de la force constante durant l'essai ; ceci présente l'inconvénient que l'essai ne s'arrête pas lorsque s'amorcent la striction ou la rupture : la force chute tandis que la machine continue d'essayer d'augmenter la force.

En raison de la **complaisance** inhérente de la machine d'essai, une partie du déplacement de la traverse est absorbée par la déformation élastique du cadre et de la ligne de charge, ce qui ralentit la vitesse de déformation de l'éprouvette dans le domaine élastique par rapport au domaine plastique. Cette influence rend la simple mesure du déplacement de la traverse insuffisante pour déterminer l'allongement réel, en particulier sur les éprouvettes courtes et résistantes.

Il est donc toujours recommandé, et parfois indispensable, d'utiliser un **extensomètre** fixé directement sur la section de référence de l'éprouvette et d'utiliser son signal de déplacement pour tracer les courbes contrainte-déformation et calculer avec précision le module de Young.

4. Courbes de traction

Les valeurs brutes mesurées directement lors d'un essai de traction sont la **force F** et l'**allongement ΔL** qui sont rapportées dans un diagramme force-allongement.

Cependant, ces courbes force-allongement ne dépendent pas uniquement du matériau qui est testé mais également de la géométrie des échantillons. Afin de normaliser la courbe et donc de la rendre indépendante de la taille des échantillons, on convertit les données en courbe contrainte-déformation (voir Fig. 2) qui reflète, elle, les propriétés intrinsèques du matériau.

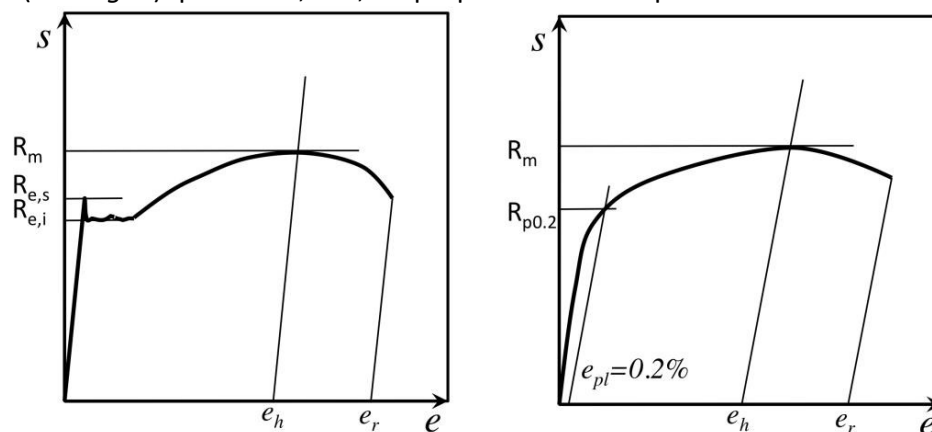


Fig. 2 : Schéma représentant 2 types différents de courbes contrainte-déformation nominale obtenues à partir d'un essai de traction : Courbe de traction d'un acier au carbone avec une limite élastique supérieure et inférieure (à gauche); Courbe de traction typique pour des alliages à réseau cfc avec écoulement graduel (à droite).

La contrainte nominale s , d'une courbe de traction, est la force divisée par l'aire de la section

transverse initiale S_0 de la zone réduite de l'éprouvette :

$$s = \frac{F}{S_0} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ [%]}$$

Ces courbes contraintes nominales-déformation nominales ne donnent exactement ni la contrainte ni la déformation au sens où on les définit en mécanique des milieux continus. En effet, elles supposent que la section S du matériau reste constante durant l'essai de traction. Or, ce n'est pas vrai puisque la section diminue quand le matériau s'allonge.

Afin de prendre en compte l'évolution de la section au cours du test, on transforme les contraintes et déformations nominales en **contraintes et déformations vraies**. La contrainte vraie, σ , est obtenue en divisant la force par la section actuelle, tandis que la déformation vraie, ε , est l'intégrale sur les incréments d'allongement divisés par la longueur à chaque instant. On trouve :

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dl}{l} = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = \ln(1 + e)$$

Avec l'hypothèse que le volume de l'éprouvette reste constant lors de l'essai de traction (donc, $L_0 A_0 = LA$, ce qui est une bonne approximation pour autant que la déformation plastique soit nettement plus grande que la déformation élastique et que le matériau ne s'endommage pas par formation de cavités internes) la contrainte vraie peut être écrite comme :

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{FL}{A_0 L_0} = s \frac{L_0 + \Delta L}{L_0} = s(1 + e)$$

Une courbe contrainte-déformation typique des aciers à faible teneur en carbone (ou des polymères) est donnée en Fig. 3. Elle est divisée en 5 régions (OA, AB, BC, CD et DE) qui sont décrits ci-dessous.

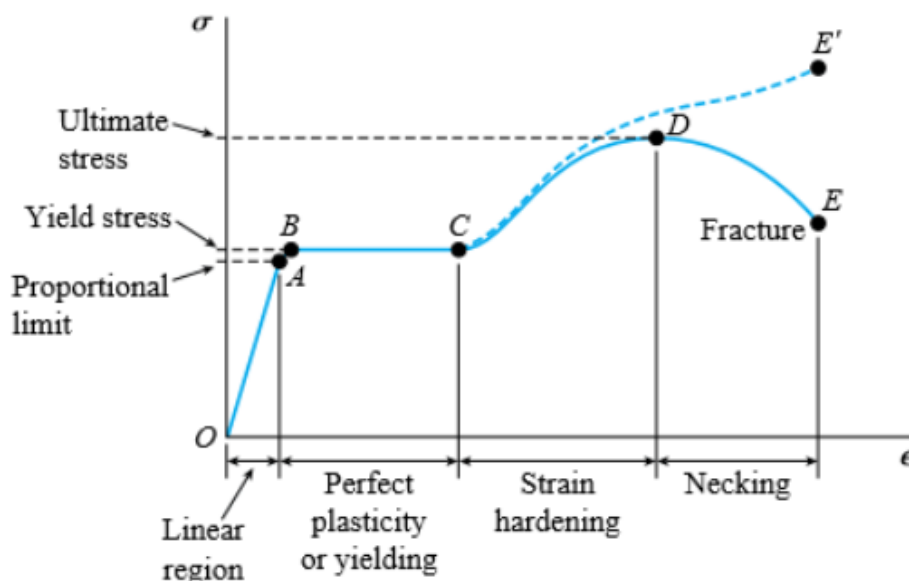


Fig. 3 : Représentation schématique d'une courbe contrainte-déformation pour un acier à faible teneur en carbone (ligne continue : nominale ; ligne pointillée : vraie) [4]

Région (OA) :

- Régime linéaire où la déformation est purement élastique, de pente égale (si la mesure de la déformation est précise) au module de Young.

Région (AB) :

- Changement significatif de la pente de la courbe qui (pour ces matériaux) devient presque nulle au point « B »
- « B » est la limite d'élasticité car on passe de la déformation élastique (réversible) à une déformation plastique (no-réversible).

Région (BC) :

- Après la limite d'élasticité, certains matériaux présentent une augmentation de la déformation de « B » à « C » sans augmentation de la contrainte.

Région (CD) :

- Déformation (principalement) plastique du matériau qui s'accommode par divers mécanismes irréversibles (par le mouvement des dislocations dans les métaux, le glissement mutuel des macromolécules dans les polymères thermoplastiques, ...). La contrainte nécessaire pour déformer le matériau augmente avec la déformation, par exemple dans les métaux car les dislocations s'accumulent et se font obstacles entre elles : c'est l'écroutissage.

Région (DE) :

- Au point « D » la contrainte nominale (pas vraie) atteint sa valeur maximale ; ici s'amorce la striction, qui est une localisation de la déformation plastique en une région limitée de la section réduite, laquelle continue en s'accroissant jusqu'à la rupture du matériau au point « E ».

4.1. Propriétés mécaniques

Module d'élasticité (module de Young) (E)

Il est défini comme étant la pente de la partie linéaire partant de l'origine du diagramme. Sa détermination par un essai de traction nécessite impérativement une mesure précise de la déformation, le plus souvent avec un extensomètre de bonne précision car la déformation élastique finie du restant du montage sous la force appliquée, même avec la machine d'essai la plus grande et robuste, est susceptible de modifier cette pente sensiblement.

$$E = \frac{\Delta F \cdot L_0}{\Delta L \cdot S_0} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad [\text{GPa}]$$

Limite conventionnelle d'élasticité ($R_{p0.2}$)

Elle est définie comme la contrainte conduisant après décharge à un allongement de 0.2 % de L_0 .

$$R_{P0.2} = \frac{F_{0.2}}{S_0} \quad [\text{N/mm}^2]$$

La limite apparente d'élasticité supérieure/inférieure ($R_{e,s}/R_{e,i}$)

L'apparition d'une chute de la contrainte, après dépassement de la limite d'élasticité supérieure

$R_{e,s}$ (voir Fig. 3), est un phénomène qui s'observe dans certains matériaux, dont les aciers doux, des polymères ou les alliages Al-Mg.

$R_{e,l}$ est ensuite la contrainte correspondant à l'ordonnée du premier palier de la courbe, à condition que ce palier ne soit pas le maximum absolu du diagramme.

La résistance à la traction (R_m)

Elle est définie comme la contrainte correspondant à l'ordonnée du maximum absolu du diagramme

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

Déformation homogène (e_h)

Elle est définie comme la déformation nominale homogène maximale, atteinte avant que la déformation supplémentaire se localise dans la zone de striction (voir Fig. 3).

L'allongement à la rupture (e_r)

$$e_r = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%]$$

Il est défini comme la déformation nominale après rupture, parfois notée A, exprimée en %. L'allongement est mesuré entre repères définissant la longueur initiale L_0 , par rapport à la longueur ultime entre repères au moment de la rupture L_u . Comme passé le maximum de la courbe l'incrément d'allongement ΔL ne dépend plus de la longueur initiale L_0 de la section réduite, la déformation nominale se met à dépendre de L_0 ; de ce fait elle n'a de valeur que si on définit la géométrie de l'éprouvette de traction, par exemple par le biais d'une norme. D'où la définition d'éprouvettes proportionnelles (*i.e.*, de même forme géométrique normalisée); on en distingue deux principaux dépendant de la longueur initiale relative choisie :

$$A_5 \text{ correspondant à : } L_0 = 5 \cdot D_0 = 5.65 \cdot \sqrt{S_0}$$

$$A_{10} \text{ correspondant à : } L_0 = 10 \cdot D_0 = 11.3 \cdot \sqrt{S_0}$$

5. Expérience

Nous proposons dans ce TP d'étudier l'influence de la composition et des traitements thermiques sur la courbe de traction et les caractéristiques mécaniques que l'on en déduit pour plusieurs matériaux. Les matériaux étudiés sont :

Métaux

- Cuivre, recuit
- Laiton (CuZn₃₈Pb₂), recuit
- Al 6082 (0.6-1.2%Mg, 0.4-1.0%Mn, 0.7-1.3%Si, ≤0.5%Fe), états T6 et O
- Acier S235 (0.35%C, 0.9%Mn, 0.04%P, 0.15-0.4%Si, 0.05%S), recuit

Polymères

- Polystyrène (PS)
- Polypropylène (PP)
- Polypropylène contenant 50% de fibres de verre (PPG50)

Une éprouvette plate de chaque matériau est à tester en traction à température ambiante. Pour permettre de mesurer le module de Young, l'essai est effectué avec un extensomètre de précision.

Sur toutes les éprouvettes, la section initiale dans la section réduite de l'éprouvette est à mesurer avant le début de l'essai. Une mesure des dimensions après la rupture dans la partie de la section

réduite loin de l'endroit de striction permettra de vérifier si la déformation dans la section réduite a vraiment été homogène avant d'atteindre la valeur maximale dans la courbe $s = f(e)$.

Les résultats sont à rapporter sous forme de graphiques en mettant ensemble les courbes de $s = f(e)$ pour les matériaux testés. En outre, les valeurs de $R_{p0.2}$, $R_{e,i}$, $R_{e,s}$, R_m , E et e_h sont à rassembler sous forme de tableau.

6. Bibliographie

[1] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Test, p. 329-377, Internatl. Student Edition McGraw-Hill, 1976. Mechanical Metallurgy, M.A. Meyers, K.K. Chawla, chap. 16, Tensile Testing, p. 559-599, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1984.

[2] Metals Handbook, A.S.M., 9th edition, vol. 8, Mechanical Testing, p. 19-51 : Tensile Testing, Tension Testing Machines, Extensometers.

[3] Theory of flow and fracture of solids, A. Nadai, Chap. 8, Theory of the tensile test, Edition McGraw-Hill, 1950.

[4] *The Engineering Stress-Strain Curve (Fully Explained)* from https://zapsience.com/stress-strain-curve/#True_Stress-Strain_Curve

Normes

Suisse: VSM 10921

Allemagne: DIN 50 125, 50 145

U.S.A.: ASTM E8 : "Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials"

Norme ISO 6892 : Matériaux métalliques – Essai de traction