

TP Essai de traction

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 à rupture et le coefficient de striction. Avec 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 l'industrie pour les contrôles périodiques servant à surveiller la qualité des alliages, des polymères et des céramiques.

Ce TP a comme objectifs :

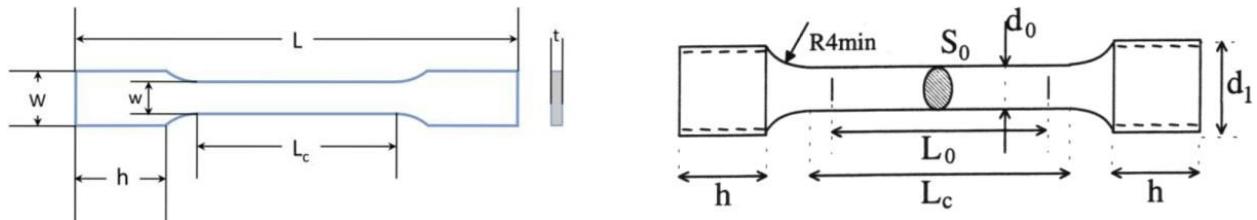
- Faire connaître le fonctionnement d'une machine de traction et des capteurs qui y sont appliqués
- Mesurer des courbes de traction charge-déplacement sur différents matériaux (métaux et polymères) et utiliser l'ensemble des données expérimentales enregistrées pour calculer les courbes contrainte-déformation, à partir desquelles les propriétés des matériaux peuvent être obtenues.
- Déterminer le module élastique ou de Young (E), la limite élastique conventionnelle ($R_{p0,2}$) ou limite élastique supérieure/inferieure ($R_{e,s}/R_{e,i}$), la résistance à la rupture, l'allongement à rupture (R_m), la déformation homogène (e_h), et l'allongement à rupture (e_r)
- Estimer l'incertitude des propriétés des matériaux mesurées expérimentalement par analyse de propagation d'erreur et interpréter les résultats finaux obtenus.

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. Ces têtes d'attache ont typiquement une section nettement plus grande que la partie centrale de l'éprouvette dite « de section réduite ». Ceci est pour s'assurer que la contrainte dans les têtes d'attache (contrainte nominale + concentration de contrainte engendrée par le système de fixation) reste toujours inférieure à la limite d'écoulement du matériau. Ainsi la déformation plastique est essentiellement limitée à la partie de l'éprouvette à section réduite. En outre, il faut veiller que les forces transmises par le système de fixation soient colinéaires pour minimiser les effets des forces latérales. Notez que ceci n'est pas un détail que l'on doit respecter seulement lorsque l'on effectue un essai de traction. Dans la pratique, on doit aussi garder à l'esprit que la limite d'écoulement plastique déterminée par un essai de traction ne tient compte que d'un état de contrainte uniaxiale.

Deux exemples typiques de géométrie d'éprouvettes sont montrés en Fig. 1: d'une part une éprouvette plate (typique pour la caractérisation de tôles) et d'autre part une éprouvette à symétrie rotationnelle (préférable si l'éprouvette peut être extraite dans la masse). Cette dernière peut être conçue avec des têtes filetées. 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 filetées présentent en plus l'avantage de se prêter parfaitement à des essais cycliques changeant d'un état de compression à un état de traction car le jeu lors de l'inversion du signe de la contrainte reste minimal, notamment si l'on utilise des contre-écrous.



W = largeur des têtes

$d_0 = \emptyset$ partie calibrée

w = largeur de la section réduite

$d_1 = \emptyset$ des têtes filetées

L = longueur totale

L_0 = longueur entre repère = $5 d_0$

L_c = longueur calibrée

L_c = longueur calibrée

t = épaisseur de l'éprouvette

h = longueur des têtes

Figure 1 : Exemple de deux éprouvettes de traction typiques : éprouvette plate (à gauche) et éprouvette à symétrie rotationnelle (à droite).

Des fourchettes pour les rapports entre les différentes dimensions caractérisant la géométrie des éprouvettes sont typiquement données par des standards relatifs à l'essai de traction, cf. la bibliographie.

Mises à part les dimensions géométriques, le prélèvement des éprouvettes n'est pas sans influence sur la courbe de traction. Bien que le travail avec des monocristaux soit extrêmement rare, nous mentionnons ici que dans certains de ces cristaux les propriétés élastiques et plastiques sont fortement anisotropes, c.-à-d. dépendantes de la direction de traction par rapport aux axes cristallographiques. Pour les échantillons polycristallins, on admet habituellement que les axes cristallographiques des grains sont orientés aléatoirement et que, de ce fait, ils ont des propriétés isotropes. Or cette supposition n'est pas toujours justifiée. Notamment des produits laminés, emboutis, martelés ou tréfilés présentent souvent des textures importantes. Ceci les place entre les monocristaux et les polycristaux et la direction selon laquelle l'éprouvette est prélevée n'est donc pas sans importance.

3. Dispositif de mesure

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

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

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

La complaisance de la ligne de charge est aussi la raison pourquoi il ne suffit normalement pas de prendre le déplacement de la traverse comme mesure pour l'allongement. Notamment pour des éprouvettes courtes, l'allongement élastique du bâti de la machine et des dispositifs d'amarrage n'est d'habitude pas négligeable par rapport à celui de l'échantillon. Il est en ce cas incontournable, et dans le cas général préférable, de fixer un extensomètre mesurant l'allongement directement sur la longueur calibrée et d'utiliser ce signal pour tracer les courbes complètes. Pour la détermination du module de Young, donc dans la gamme des déformations élastiques et pour cela faibles, on peut également travailler avec des dispositifs de mesure ayant une longueur de mesure inférieure à la longueur calibrée. Notons que pour tout calcul de déformation à partir du signal d'allongement d'un extensomètre, c'est la distance entre les points d'attache de l'extensomètre qu'il faut prendre comme longueur de référence et non pas la longueur calibrée. En effet, pour autant que la déformation soit homogène, la valeur de déformation mesurée entre les deux points d'attache de l'extensomètre sera égale à la déformation de toute la longueur calibrée.

Au lieu d'imposer la vitesse de déplacement de la traverse, on peut aussi imposer le taux d'augmentation de contrainte ou la vitesse de déformation mesurée par l'extensomètre. Le réglage devient alors nettement plus difficile et peut même être dangereux : par exemple lors de la rupture la force chute brusquement et la machine continue à tout prix d'essayer d'augmenter la contrainte. De même le glissement du capteur de déformation sur l'éprouvette peut, dans le mode de contrôle de la vitesse de déformation, mettre en péril l'échantillon et le capteur.

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

4. Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte nominale s , (engineering stress, en

anglais) rapportée dans un diagramme de traction, est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette :

$$S = \frac{F}{S_0}$$

De même la déformation nominale e (*engineering strain*, en anglais) se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre:

$$e = \frac{\Delta L}{L_0}$$

On parle de diagrammes rationnels quand on détermine les contraintes et les déformations vraies. La contrainte vraie, σ , est obtenue en divisant la force par la section instantanée, tandis que la déformation vraie, ε , est l'intégrale sur les incrémentés d'allongement divisé 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, $L_0 A_0 = L A$, ce qui est une bonne approximation pour autant que la déformation plastique est nettement plus grande que la déformation élastique) la contrainte vraie peut être écrite comme :

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

Ici nous nous contentons du premier type de diagramme qui est d'ailleurs le diagramme d'usage commun. La figure 2 illustre l'allure que peuvent avoir les courbes de traction de différents matériaux. Le comportement à gauche est typique pour un acier au carbone recuit tandis que la courbe de traction à droite est caractéristique pour un matériau avec une structure cristalline cfc. L'apparition d'une limite élastique bien définie et du plateau montré à gauche est liée à une interaction entre des dislocations et le carbone en solution solide.

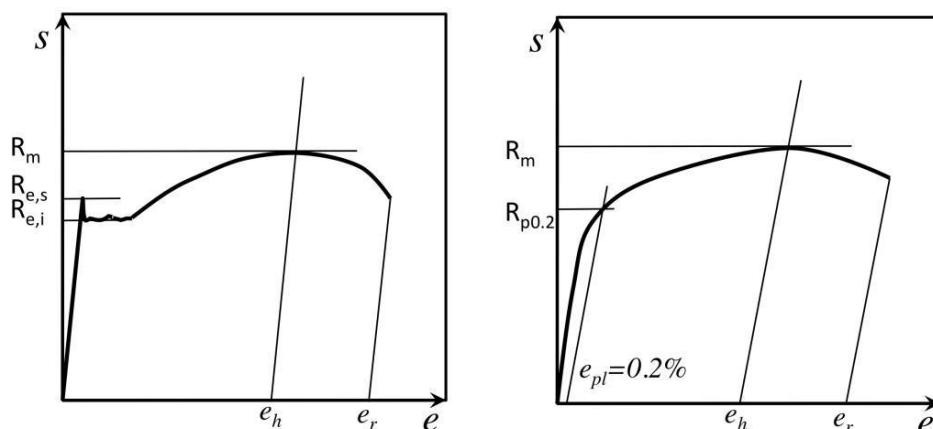


Figure 2 : Schéma représentant 2 types différents de courbes de traction. A gauche: diagramme de traction d'un acier au carbone avec une limite élastique supérieure et inférieure; à droite: courbe de traction avec écoulement graduel typique pour des alliages à réseau cfc.

4.1. Régions de la courbe contrainte-déformation

Une courbe contrainte-déformation concerne la façon dont un matériau particulier se comporte sous différents niveaux de contraintes jusqu'à ce qu'il se casse. Il peut être divisé en 5 régions illustrées dans le schéma d'exemple ci-dessous (OA, AB, BC, CD et DE).

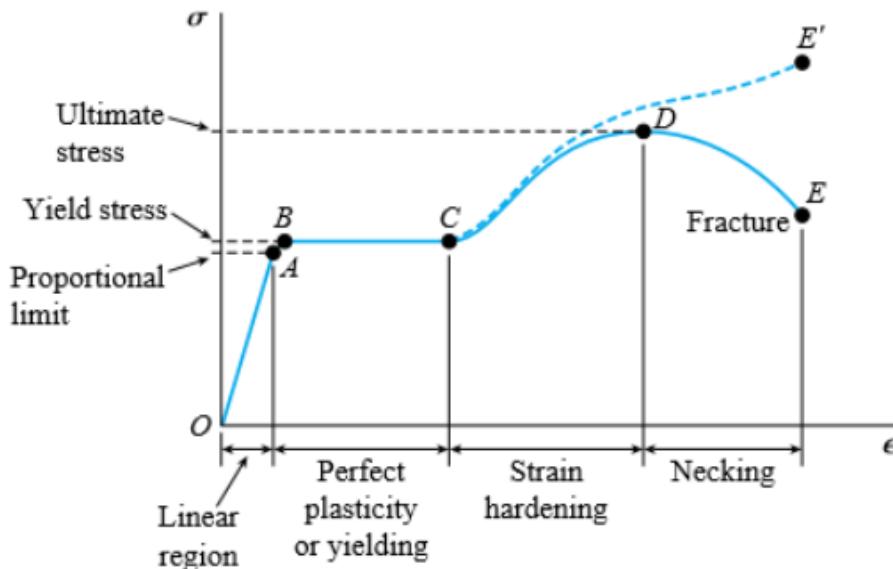


Figure 3 : Représentation schématique d'une courbe contrainte-déformation pour un acier à faible teneur en carbone (ligne continue : nominale ; ligne pointillée : vraie) [4]

(a) Région (OA):

- Le début de la courbe est une ligne allant de O à A. Ici, le graphique est linéaire et montre la proportionnalité comme indiqué dans la loi d'élasticité de Hooke.
- « A » est connu comme la limite proportionnelle car au-delà de ce point, le matériau ne se comporte pas selon la loi de Hooke.
- La proportionnalité entre la contrainte et la déformation disparaît après ce point.

(b) Région (AB):

- La pente du graphique change radicalement au-delà de A et devient presque nulle lorsqu'elle atteint le point B.
- Après la limite proportionnelle, le matériau affiche une grande quantité de déformation même avec de petits incrément de contrainte.
- 'B' est connu comme la limite élastique car l'élasticité du matériau se termine à ce point et il montre une déformation plastique par la suite.

(c) Région (BC):

- Comme nous l'avons vu, le point « B » est connu sous le nom de limite d'élasticité et la valeur de contrainte en « B » est connue sous le nom de limite d'élasticité. A cette valeur de contrainte, la déformation augmente de B à C sans aucune augmentation du paramètre de contrainte.

(d) Région (CD):

- Après C, le matériau devient plastique. Il commence à durcir dans la portion CD. Alors, que se passe-t-il exactement dans "Strain-Hardening"… ? Chaque solide cristallin a sa propre structure cristalline. Cette structure cristalline présente également des défauts, mais ils sont en très petit nombre par rapport à l'ensemble du solide.

- Lorsque la structure subit une plastification, les défauts ont tendance à augmenter rapidement. Lorsque ces dislocations s'accumulent, il devient difficile pour le matériau de se déformer et nécessite une force supplémentaire pour obtenir la déformation. Ce phénomène est connu sous le nom de « Strain-Hardening ».
- Cette région se termine au point 'D' qui est le point de contrainte ultime. C'est la contrainte maximale que le matériau peut supporter.

(e) Région (DE):

- Le phénomène de "Necking" se produit avec une diminution de la charge et une augmentation de la quantité de déformation.
- Tout se termine au point 'E' qui est connu comme le point de fracture. Il s'agit de la quantité maximale de contrainte que le matériau peut supporter.

4.2. Propriétés mécaniques

Module d'élasticité (E)

Le *module d'élasticité E* ou *module de Young* est défini comme le rapport entre contrainte et déformation :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \lim_{e \rightarrow 0} \frac{s}{e}$$

ou en d'autres mots comme la pente de la partie gauche 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. D'autre part, notamment dans les matériaux de structure cfc, le phénomène de microplasticité entre en jeu à des contraintes inférieures à la limite élastique. Ainsi, le standard indique que le module de Young est à déterminer dans la partie de la pente pour laquelle $0.1R_{p0.2} < s < 0.5R_{p0.2}$. Le tableau 1 rassemble les valeurs typiques du module d'élasticité pour différents alliages. 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'écrouissage. Par contre, la texture, i.e. l'orientation préférentielle de certains axes cristallographiques par rapport à l'axe de l'éprouvette, peut apporter une déviation sensible de la valeur typique pour un matériau polycristallin avec orientation aléatoire, et ceci surtout si le métal de base a une forte anisotropie élastique tel que le cuivre, le nickel et le fer.

Tableau 1 : Valeur typique du module d'élasticité pour différents métaux polycristallins.

Matériaux	Module d'élasticité [GPa]
Acier au carbone	205-215
Alliages de cuivre	100-130
Alliages d'aluminium	65-75

Limite élastique conventionnelle ($R_{p0.2}$)

La fixation d'un seuil d'écoulement plastique n'est pas possible sans convention car, même à des contraintes largement en dessous de $R_{p0.2}$, on observe à l'aide des instruments hautement précis

des déformations irréversibles. Pour la plupart des constructions mécaniques, des déformations aussi faibles sont insignifiantes. On préfère donc une limite plus élevée et aussi plus facilement déterminable. Ainsi on fixe la limite conventionnelle d'élasticité à la contrainte maximum applicable qui laisse, après décharge, une déformation permanente (plastique) de 0.2 %. Pour la mécanique de précision les exigences sont plus poussées, et on détermine parfois de manière analogue $R_{p0.02}$. La valeur s'obtient en augmentant graduellement la force de traction jusqu'à ce qu'après déchargement l'allongement résiduel atteigne la valeur recherchée, ou on peut aussi tracer une ligne parallèle à la droite élastique passant par $e= 0.2\%$.

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, est un phénomène que présente le fer, les aciers doux, la plupart des métaux ayant une structure cubique centrée et contenant des impuretés interstitielles, ainsi que plusieurs autres alliages, notamment l'Al-Mg. On y trouve une limite d'élasticité supérieure suivie d'une chute de la contrainte. A partir de là, la déformation augmente à une valeur de contrainte constante, appelée limite d'élasticité inférieure (palier de la courbe). A la fin du palier, la déformation se poursuit suivant le mode habituel. Notons que durant ce palier la déformation s'accumule par propagation de bandes d'écoulement, appelées bandes de Lüders, et n'est donc pas homogène.

La résistance à la traction (R_m)

C'est la charge appliquée au maximum de la courbe $F = f(\Delta L)$ divisée par la section initiale (= maximum de la contrainte nominale). Après le maximum de la force, la déformation commence à se localiser (phénomène de striction).

Déformation homogène (e_h)

C'est la déformation nominale homogène atteinte dans la longueur calibrée avant que la déformation supplémentaire se localise dans la zone de striction.

L'allongement à la rupture (e_r)

C'est la déformation nominale (allongement divisé par la longueur initiale) après rupture exprimée en %, parfois aussi notée « A ». 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 e_r est donc d'autant plus petite que la longueur calibrée de l'éprouvette, ou plutôt la distance entre les points d'attache de l'extensomètre, est longue. Pour cela, et aussi parce que la valeur e_r est techniquement moins importante que les valeurs définies précédemment, nous n'allons pas rapporter cette valeur dans ce TP. Notons encore que si l'on indique une valeur de e_r alors on doit mentionner le rapport L_0/d_0 avec la valeur de l'allongement. On désigne par A_5 et A_{10} l'allongement obtenu sur des éprouvettes ayant un rapport L_0/d_0 de respectivement 5 et 10. Pour des éprouvettes plates c'est le rapport $L_0/(S_0)_{0.5}$ qui est à annoter.

5. Expérience

Dans ces travaux pratiques, nous proposons d'étudier l'influence de la composition et des traitements thermiques sur les matériaux ci-dessous à partir de l'analyse de leur courbe de traction et des propriétés mécaniques qui en résultent :

Métaux

- Cuivre, recuit (1h15min à 815 °C, sous formier gaz, trempé à l'eau)
- Laiton ($CuZn_{38}Pb_2$), recuit (1h15min à 500 °C, sous formier gaz, trempé à l'eau)

- Al 6082 (0.6-1.2%Mg, 0.4-1.0%Mn, 0.7-1.3%Si, \leq 0.5%Fe) état O (1h30 à 415 °C, sous Ar gaz, refroidissement lent)
- Al 6082 (0.6-1.2%Mg, 0.4-1.0%Mn, 0.7-1.3%Si, \leq 0.5%Fe), état T6 (2h à 540°C, sous Ar gaz, trempé à l'eau, après : 1h30 à 180°C, sous Ar gaz)
- Acier S235 (0.35%C, 0.9%Mn, 0.04%P, 0.15-0.4%Si, 0.05%S), recuit (1h15 à 700 °C sous Ar, refroidissement dans four jusqu'à 450 °C, refroidissement à l'air)

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, le test est effectué avec un extensomètre de précision basésur des jauge résistives.

Sur toutes les éprouvettes la section initiale dans la partie calibrée de l'éprouvette est à mesurer avant le début de l'essai. Une mesure des dimensions après la rupture dans la partie de la longueur calibrée loin de l'endroit de striction permettra de vérifier si la déformation dans la partie calibrée a vraiment été homogène avant d'atteindre la valeur maximale dans la courbe $s = f(e)$.

5.1. Propagation de l'incertitude

La propagation de l'erreur (ou propagation de l'incertitude) est définie comme les effets sur une fonction de l'incertitude d'une variable. Il s'agit d'un calcul statistique dérivé d'un calcul conçu pour combiner les incertitudes de plusieurs variables afin de fournir une mesure précise de l'incertitude. Lorsque les variables sont les valeurs de mesures expérimentales, elles présentent des incertitudes dues aux limitations de mesure, qui se propagent en raison de la combinaison de variables dans la fonction. Les formules suivantes montrent comment l'erreur de différentes variables se propage pour des opérations mathématiques courantes.

Tableau 2 : Règles de propagation de l'incertitude [5].

Process	Value	Uncertainty
Average	$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_N}{N}$	$\sigma_x = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_N - \bar{x})^2}{N-1}}$
Addition	$\bar{z} = \bar{x} + \bar{y}$	$\sigma_z = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2}$
Subtraction	$\bar{z} = \bar{x} - \bar{y}$	$\sigma_z = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2}$
Multiplication	$\bar{z} = \bar{x} * \bar{y}$	$\sigma_z = \bar{z} * \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2}$
Division	$\bar{z} = \bar{x} \div \bar{y}$	$\sigma_z = \bar{z} * \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{\bar{x}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{\bar{y}}\right)^2}$

En supposant que l'erreur de force machine ($\Delta F/F$) est de 0,1 % et que l'extensomètre n'introduit aucune erreur ($\Delta \varepsilon/\varepsilon = 0$), utilisez les formules pour calculer :

1. L'erreur dans la section transversale de l'échantillon
2. L'erreur dans les valeurs de résistance ($R_{p0.2}$, $R_{e,i}$, $R_{e,s}$, R_m)
3. L'erreur dans le module de Young (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 , e_h et e_r sont à rassembler sous forme de $\bar{x} \pm \Delta x$ (\bar{x} : moyenne; Δx : écart type) dans un tableau.

6. Bibliographie

[1] Mechanical Metallurgy, G.E. Dieter, chap. 9, The Tension Test, p. 329-377, Internat. 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://zapscience.com/stress-strain-curve/#True_Stress-Strain_Curve

[5] Clemson University – Error propagation (Physics Lab Tutorials), 2006

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