

Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : présentation

Cette ressource est issue d'une séance de travaux pratiques portant sur l'étude d'un banc d'essai dédié à l'étude du comportement à la traction et/ou à la torsion d'éprouvettes métalliques.

Le dimensionnement d'une structure implique la connaissance du comportement des matériaux sous différents types de chargement (traction, compression, flexion, torsion, ...). Que ce soit pour choisir un critère de résistance (pour réaliser un calcul numérique) et/ou une loi de comportement (pour dimensionner la structure), l'expérimentation représente une méthode fiable pour justifier le choix d'un modèle.

L'étude se focalise essentiellement sur le comportement d'éprouvettes cylindriques, pleines ou creuses, fabriquées à partir d'acier, d'aluminium ou de cuivre. Le cas d'une cornière en aluminium, dont la section, en forme de L, est soumise au phénomène de gauchissement (déformation de la section), a également été traité.



Figure 1: Les différentes éprouvettes après essais

Plusieurs objectifs ont été visés lors de ces travaux :

- Étudier expérimentalement le comportement mécanique d'éprouvettes cylindriques en acier, en aluminium et en cuivre sollicitées en torsion pure (phase élastiques linéaire et plastique) à partir de la courbe moment de torsion/rotation axiale $M_T(\theta_L)$;
- Étudier le comportement des matériaux sous chargement cyclique (hystérèse) ;
- Analyser les différents mécanismes de rupture en torsion, en fonction du type de section testée (section pleine ou creux) ;
- Identifier expérimentalement la contrainte de cisaillement τ_{max} à la limite d'élasticité, et la comparer aux valeurs données par les critères de Tresca et von Mises, pour différents niveaux de contraintes normales σ_{xx} ;
- Étudier l'évolution des contraintes principales dans la barre durant la phase de chargement (application du moment de torsion), ainsi que l'influence de l'effort normal sur celle-ci ;

- Étudier le comportement en torsion d'une cornière à ailes égales. Apparition du phénomène de gauchissement ;
- Comparer les résultats donnés par les différents systèmes de mesures employés (comparateur, montage en pont complet, et rosettes à 45°).

Ces différents points sont présentés dans trois ressources « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction* ». Cette ressource « *Présentation* » présente le banc d'essai et ses dispositifs de mesure, ainsi que les manipulations réalisées. La ressource « *Étude théorique* » [1] détaille les modèles employés et enfin la ressource « *Résultats expérimentaux* » [2] expose les résultats obtenus à l'issue de la campagne expérimentale.

1 – Le banc d'essai

Le banc d'essai est composé des éléments suivants :

- Une partie inférieure fixe ou bâti ;
- Une partie supérieure mobile permettant la mise en place des éprouvettes ;
- Deux mors manipulables avec une clé, pour maintenir l'éprouvette durant l'essai ;
- Une manivelle pour appliquer une rotation à la barre, créant un moment de torsion ;
- Un balancier et des poids, permettant d'appliquer un effort normal de torsion ;
- Un contrepoids permettant d'élargir la plage de mesure du moment de torsion ;
- Une goupille pour la mise à zéro du système de mesure du moment ;
- Un piston pour amortir les effets dynamiques du chargement.

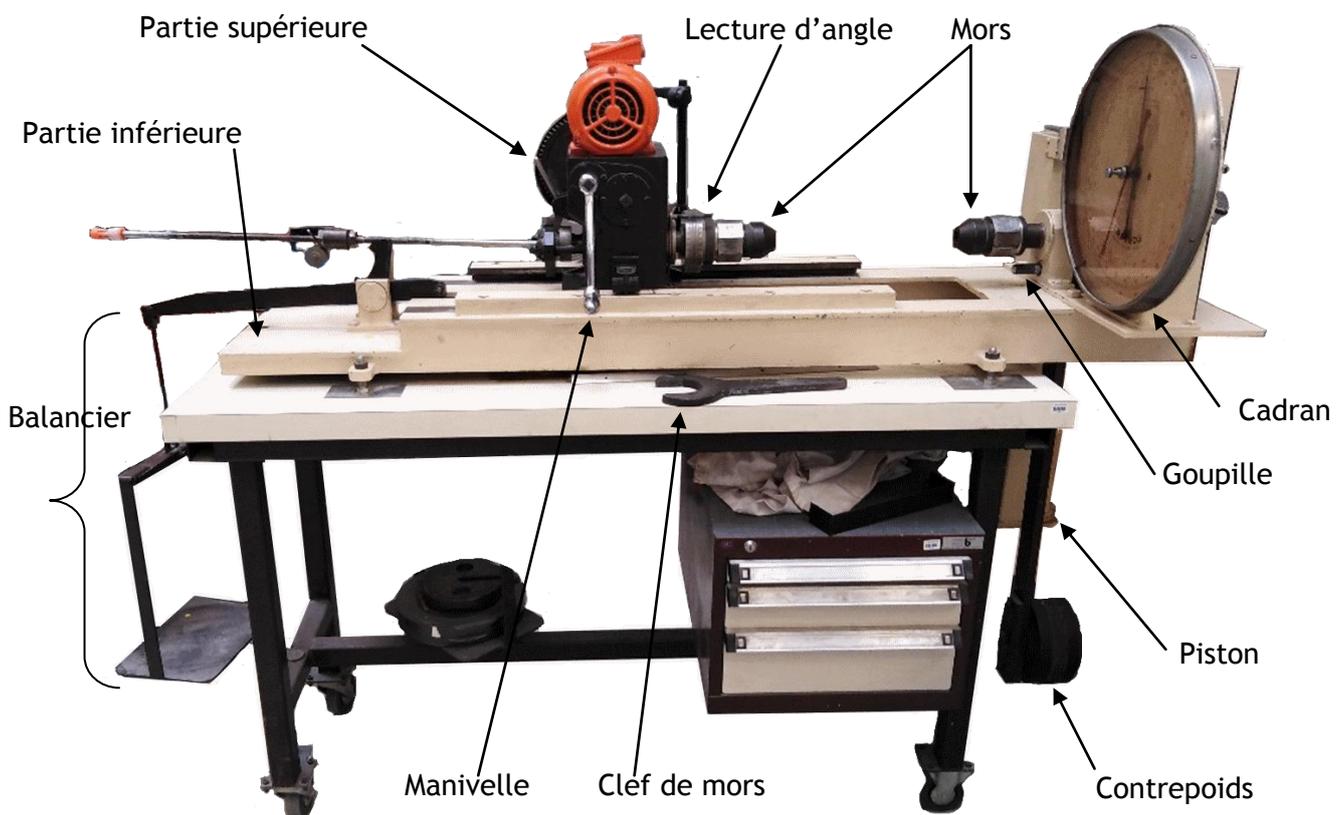


Figure 2 : Le banc d'essai

Différents corps d'essai ont été employés :

- Des tubes en aciers, en aluminium et en cuivre ($D_e = 8 \text{ mm}$ et $e = 1 \text{ mm}$) ;
- Des barres pleines en aciers, en aluminium et en cuivre ($D = 8 \text{ mm}$) ;

- Une barre pleine en acier ($D = 8 \text{ mm}$) instrumentée avec quatre jauges de torsion de résistance $R = 120 \Omega$ et de facteur de jauge $K = 2,10$;
- Une barre pleine en acier ($D_e = 8 \text{ mm}$) instrumentée d'une rosette à 45° de résistance $R = 120 \Omega$ et de facteur de jauge $K = 2,10$;
- Une cornière en aluminium ($L = H = 20 \text{ mm}$ et $e = 2 \text{ mm}$) instrumentée d'une rosette à 45° de résistance $R = 120 \Omega$ et de facteur de jauge $K = 2,10$.

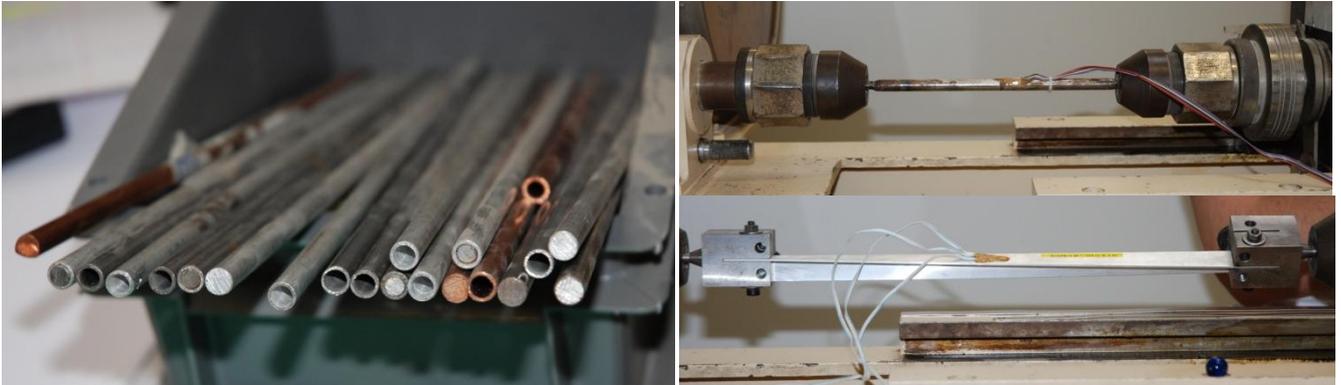


Figure 3 : Tubes et barres en acier, aluminium et cuivre ; barres et cornières instrumentées

2 – Dispositifs de mesure

Le banc d'essai est équipé de trois dispositifs de mesure :

- Un cadran permettant de mesurer le moment de torsion subit par le corps d'épreuve. L'aiguille noire donne la mesure instantanée du moment tandis que l'aiguille rouge donne le couple maximal appliqué. Deux systèmes de graduations sont indiquées (rouge et noir) en fonction du sens de rotation. Enfin deux plages de mesures sont possibles en fonction de la présence ou non du contrepoids ;

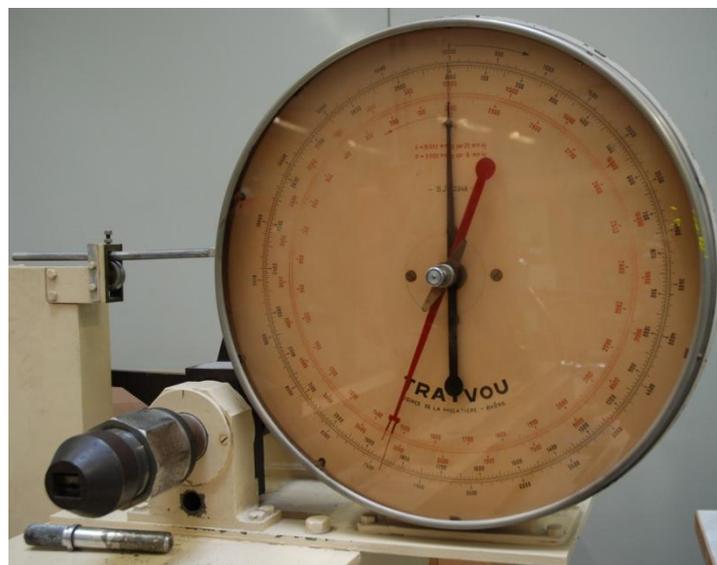


Figure 4 : Cadran permettant de mesurer le moment de torsion

- Une lecture d'angle et une butée permettant de mesurer la variation d'angle subit par le corps d'épreuve durant l'essai. La lecture d'angle identifie la rotation du mors où la rotation est imposée. La butée identifie la rotation de l'autre mors. La lecture obtenue correspond donc à la variation de rotation des deux mors ;

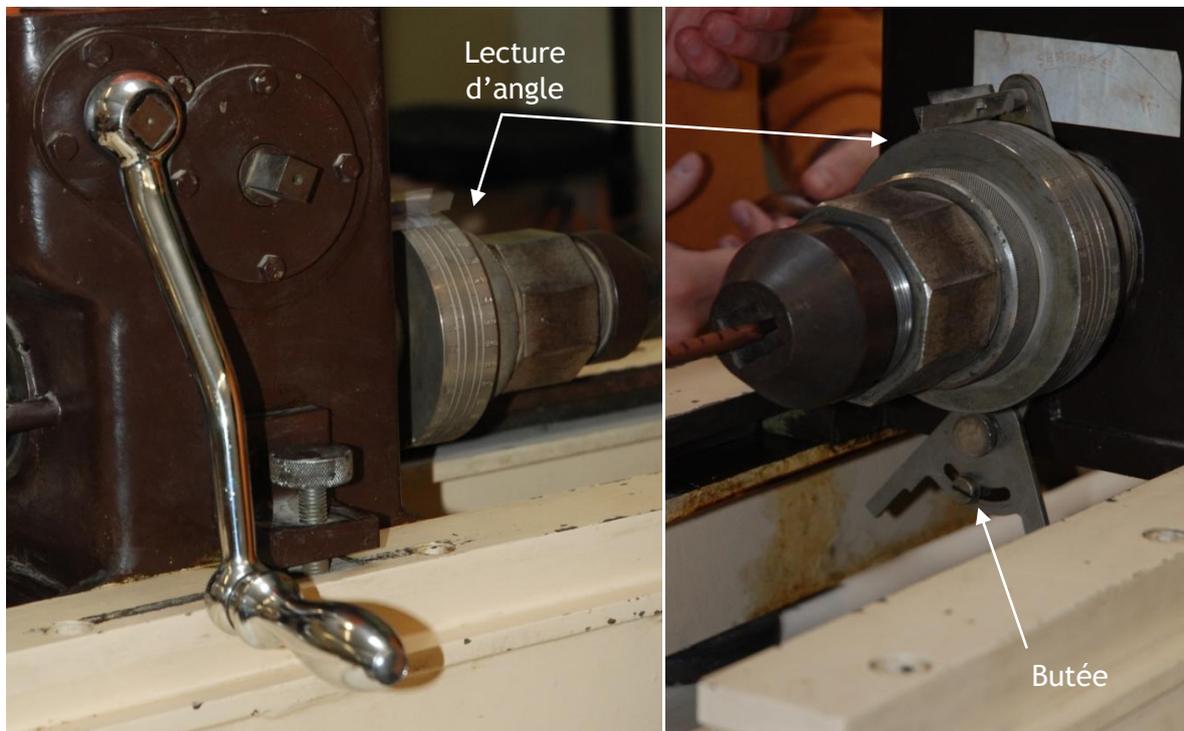


Figure 5 : Lecture d'angle et butée

- Un indicateur de déformation. Avec ses quatre pistes, il permet la lecture simultanée d'au maximum quatre déformations. Il prend également en compte l'influence du facteur du jauge.

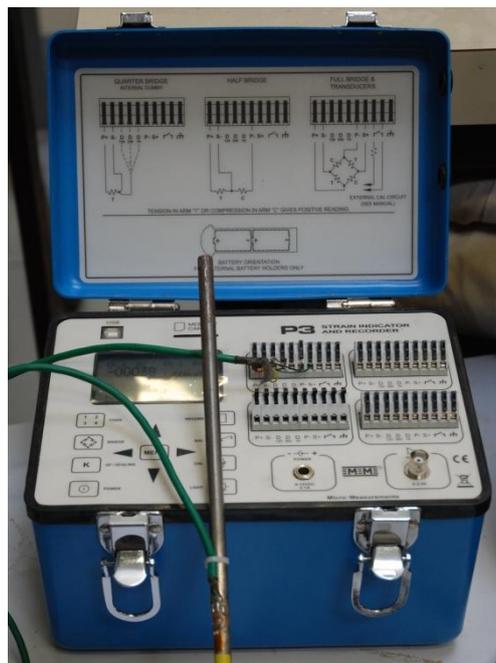


Figure 6 : Indicateur de déformation

3 – Manipulations

Ce paragraphe détaille les caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés, le mode opératoire employé afin de mener à bien la réalisation des différents essais, les branchements à réaliser pour mettre en place les montages en pont complet et les rosettes à 45°, ainsi que les hypothèses considérés pour le calcul des incertitudes.

3.1 - Caractéristiques mécaniques des matériaux étudiés

Cette campagne d'essais a pour but de caractériser le comportement à la torsion d'éprouvettes en acier, en aluminium et en cuivre. Les caractéristiques mécaniques de ces trois matériaux sont détaillées dans le tableau 1.

| Matériaux | E [GPa] | ν [-] | μ [GPa] | λ [GPa] | f_y [GPa] |
|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------------|-------------|
| Aluminium | 73 | 0,32 | 28 | 49 | 210 |
| Cuivre | 123 | 0,33 | 46 | 90 | 240 |
| Acier | 210 | 0,30 | 81 | 121 | 400 |

Tableau 1 : caractéristiques mécaniques de l'aluminium, du cuivre et de l'acier

3.2 - Protocole expérimental

Les étapes ci-dessous présentent le mode opératoire à suivre pour réaliser un essai de torsion avec traction.

Étape 0 : contrôles préalables

- Vérifier la présence de la goupille. Permet de mettre à zéro le système de mesure ;
- Vérifier qu'il n'y est pas de poids sur le balancier du chargement en traction.

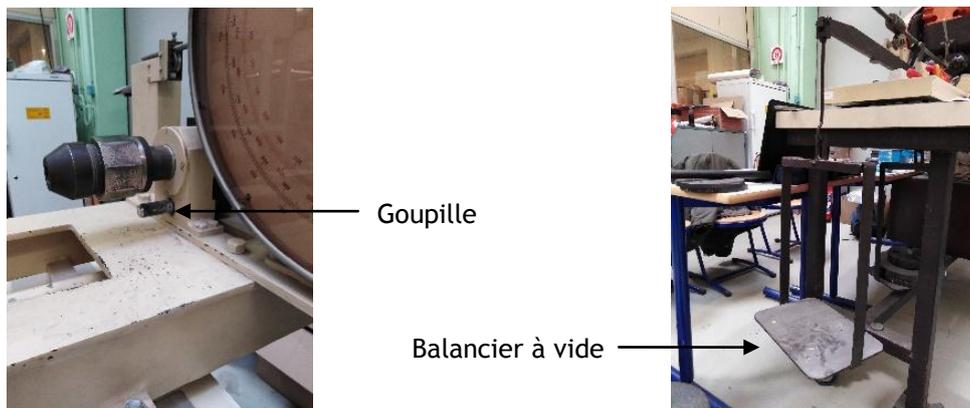


Figure 7 : Étape 0 - contrôle préalable

Étape 1 : installation de la barre testée

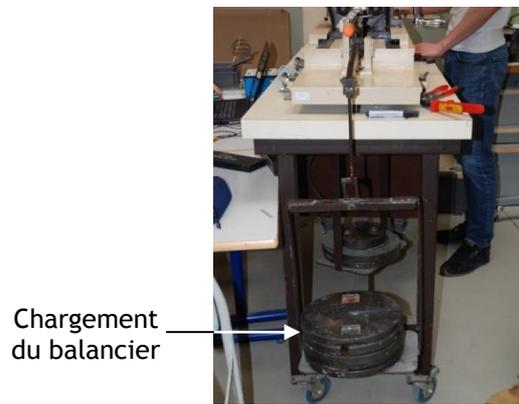
- Fixer la barre d'essai sur le premier mors ;
- Faire glisser la partie supérieure de la machine vers le second mors ;
- Fixer la barre au second mors ;
- Mesurer la longueur à vide de la barre.



Figure 8 : Étape 1 - installation de la barre testée

Étape 2 : application de l'effort normal

- Charger le balancier avec les poids pour appliquer un effort normal.



Chargement
du balancier

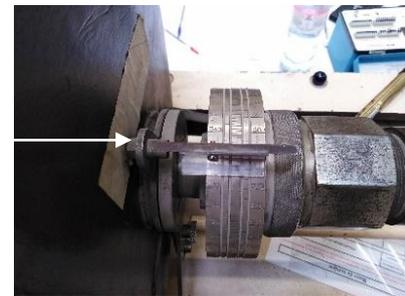
Figure 9 : Étape 2 - application de l'effort normal

Étape 3 : mise à zéro de la mesure d'angle

- Calage de la butée ;
- Mise à zéro de la mesure d'angle.



Calage butée



Alignement du zéro
cadran avec le trait

Figure 10 : Étape 3 - mise à zéro de la mesure d'angle

Étape 4 : choix de la plage de mesure du moment de torsion

- Deux plages de mesure du moment de torsion appliqué sont possibles (de 0 à 3000 mm.kg ou de 0 à 12000 mm.kg). Un poids permet d'appliquer un couple plus ou moins important et donc de changer de plage de mesure.



Moment de 0 à 3000 mm.kg
sans le poids



Moment de 0 à 12 000 mm.kg
avec le poids

Figure 11 : Étape 4 - choix de la plage de mesure du moment de torsion

Étape 5 : réalisation de l'essai

- Application du couple de torsion avec la manivelle ;
- Lecture du moment de torsion sur le cadran ;
- Lecture de l'angle.



Figure 12 : Étape 5 - réalisation de l'essai

Remarque : pour réaliser un essai de torsion pure, il suffit de ne pas réaliser l'étape 2.

3.3 - Branchement des extensomètres

Différents montages existent pour mesurer des déformations à partir d'extensomètres. Chacun d'entre eux possède ses propres atouts et permet d'aboutir à une mesure différente. Les montages utilisés durant ce TP sont présentés ci-dessous.

a) Montage en pont complet

Un schéma de principe du branchement en pont complet ainsi qu'un exemple sont présentés figure 13. Ce montage réalise une opération sur la mesure des déformations. Il renvoie directement la valeur de deux fois la distorsion γ .

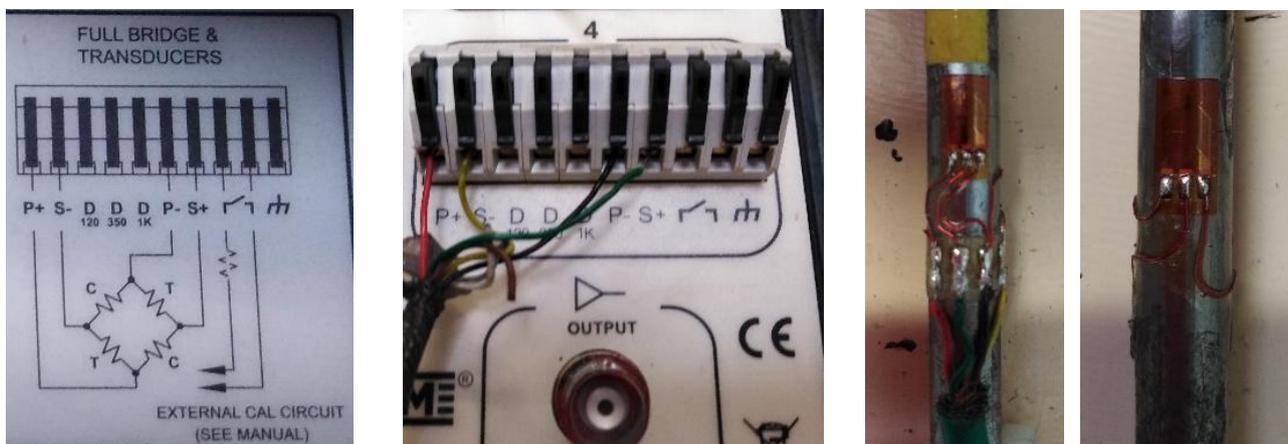


Figure 13 : Branchement en pont complet

Le pont complet présente notamment les avantages suivants :

- Une compensation en température ;
- Une compensation des effets de traction/compression ;
- Une compensation des effets de flexion.

b) Rosettes à 45°

Un schéma de principe du branchement des rosettes à 45° ainsi qu'un exemple sont présentés figure 14. Le branchement des jauges est réalisé en quart de pont. Ce montage permet de lire séparément les déformations ε_a , ε_b et ε_c .

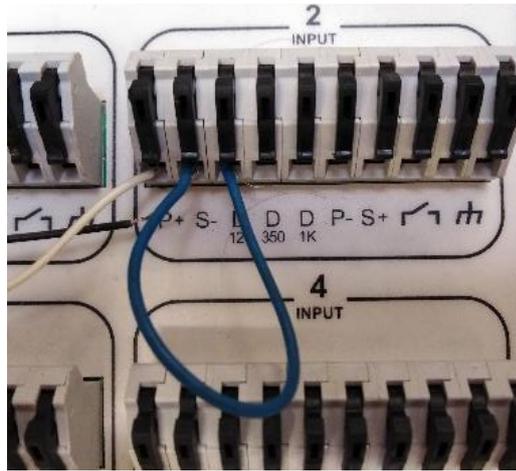
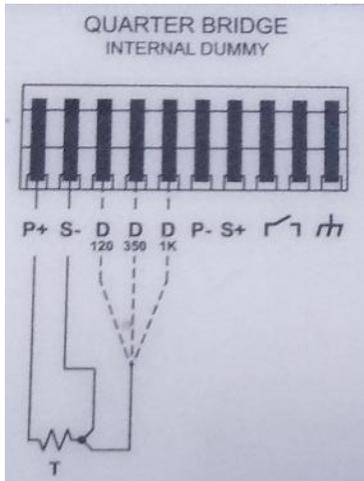


Figure 14 : Branchement des rosettes à 45°

3.4 - Hypothèses sur les incertitudes de mesure

Cette section détaille les hypothèses considérées pour quantifier les incertitudes de mesure (incertitudes de type B).

a) Incertitudes de mesure

Les incertitudes de mesures ont été déterminées en considérant une loi de distribution uniforme. Dans ce cas, les incertitudes Δx sont calculées en considérant que $\Delta x = \pm \delta/\sqrt{3}$, avec δ la précision donnée par l'appareil de mesure (i.e. l'écart entre deux graduations).

En ce qui concerne les incertitudes de mesure sur les déformations, on considère une précision de 2,5 % pour 100 $\mu\text{m}/\text{m}$, soit $\delta = (2,5\% \times 100 \mu\text{m}/\text{m} + 1 \text{ digit})$. Dans le cas du montage en pont complet, la valeur mesurée est une différence de déformation. Il convient donc de considérer $\delta = \sqrt{2} \times (2,5\% \times 100 \mu\text{m}/\text{m} + 1 \text{ digit})$.

Les dimensions du banc de chargement (L_b et l) ont été mesurées avec une règle graduée de précision $\pm 1 \text{ mm}$. Étant donné que le centre de la rotule O n'est pas localisé avec précision (figure 6 de la ressource « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique* » [1]) on considérera une précision de $\pm 2 \text{ mm}$.

Les dimensions des sections (D_i, D_e, D, b, h, e) ont été mesurées avec un pied à coulisse, de précision $\pm 0,1 \text{ mm}$.

En ce qui concerne la mesure du poids P appliqué sur le balancier, il a été choisi, en raison de leur usure, de peser chacune des masses utilisées pour le chargement. Les mesures ont toutes été réalisées avec une balance de précision $\pm 0,1 \text{ g}$.

Les incertitudes de mesure sont synthétisées dans le tableau 2, tandis que le tableau 3 regroupe la masse de chacun des poids utilisés pour charger la balance.

| Mesure | δ | Δx |
|---|------------|------------|
| L_b, l [mm] | $\pm 2,0$ | $\pm 1,2$ |
| D_i, D_e, D, b, h, e [mm] | $\pm 0,10$ | $\pm 0,06$ |
| θ_L [°] | $\pm 1,0$ | $\pm 0,6$ |
| M_T [mmkg] | $\pm 5,0$ | $\pm 2,9$ |
| m [g] | $\pm 0,10$ | $\pm 0,06$ |
| $\Delta\varepsilon = \gamma_{max}$ [$\mu\text{m}/\text{m}$] | $\pm 7,0$ | $\pm 4,0$ |
| ε_i [$\mu\text{m}/\text{m}$] | $\pm 3,5$ | $\pm 2,0$ |

Tableau 2 : Incertitudes de mesure

| Masse théorique [g] | Masse mesurée [g] |
|---------------------|-------------------|
| 1000 | 1000,0 |
| 2000 | 1999,0 |
| 2000 (disque) | 1898,0 |
| 8000 (disque) | 7884,0 |
| 10000 (disque) | 9732,0 |

Tableau 3 : Masses utilisées pour charger le banc d'essai

b) Incertitude sur l'effort normal N_L

Les incertitudes ont été calculées en admettant l'hypothèse que toutes les sources d'erreur sont dé-corrélées. La relation (1) donne l'expression de l'incertitude sur l'effort normal N_L appliqué à l'éprouvette.

$$\frac{\Delta N_L}{N_L} = \sqrt{\left(\frac{\Delta M}{M}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L_b}{L_b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2} \quad (1)$$

Avec M la masse totale mise en place sur le balancier [g].

c) Incertitude sur la contrainte normale σ_{xx}

L'incertitude sur la contrainte normale σ_{xx} est donnée par la relation (2).

$$\frac{\Delta \sigma_{xx}}{\sigma_{xx}} = \sqrt{\left(\frac{\Delta N_L}{N_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2} \quad (2)$$

Le tableau 4 donne l'expression de l'incertitude relative de S en fonction du type de section étudié.

| Section | $\frac{\Delta S}{S} [-]$ |
|-------------------|---|
| Circulaire | $\frac{2\Delta D}{D}$ |
| Circulaire creuse | $\frac{2\Delta D \sqrt{D_e^2 + D_i^2}}{(D_e^2 - D_i^2)}$ |
| Cornière en L | $\sqrt{\left(\frac{\Delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\Delta b^2 + \Delta h^2 + \Delta e^2}}{b + h - e}\right)^2}$ |

Tableau 4 : Incertitude relative sur la section de l'éprouvette

d) Incertitude sur la contrainte tangentielle $\tau_{\theta x}$

Le tableau 5 donne l'incertitude relative sur la contrainte tangentielle $\tau_{\theta x}$, en fonction de la géométrie de la section.

| Section | $\frac{\Delta \tau_{\theta x}}{\tau_{\theta x}} [-]$ |
|-------------------|--|
| Circulaire | $\sqrt{\left(\frac{\Delta M_T}{M_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{4\Delta D}{D}\right)^2}$ |
| Circulaire creuse | $\sqrt{\left(\frac{\Delta M_T}{M_T}\right)^2 + \left(\frac{\Delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{2}\Delta D}{D_e + D_i}\right)^2}$ |
| Cornière en L | $\sqrt{\left(\frac{\Delta M_T}{M_T}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta e}{e}\right)^2 + \left(\frac{\sqrt{\Delta b^2 + \Delta h^2 + \Delta e^2}}{b + h - e}\right)^2}$ |

Tableau 5 : Incertitude relative sur la contrainte tangentielle appliquée à l'éprouvette

e) Incertitudes sur les contraintes principales σ_I et σ_{II}

La relation (3) donne les incertitudes sur les contraintes principales σ_I et σ_{II} .

$$\Delta \sigma_{I,II} = \sqrt{\Delta \sigma_{xx}^2 \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\sigma_{xx}}{4\sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta x}^2}} \right)^2 + \Delta \tau_{\theta x}^2 \left(\frac{\tau_{\theta x}}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx}}{2}\right)^2 + \tau_{\theta x}^2}} \right)^2} \quad (3)$$

f) Incertitude sur le moment de torsion M_T dans le cas où l'on emploie un montage en pont complet

Dans le cas où l'on utilise un montage en pont complet, l'incertitude sur le moment de torsion M_T est définie, pour une section circulaire, par l'équation (4) (sous l'hypothèse que l'incertitude sur le module de cisaillement μ est négligeable).

$$\frac{\Delta M_T}{M_T} = \sqrt{\left(\frac{\Delta(\Delta\varepsilon)}{\Delta\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{3\Delta D}{D}\right)^2} \quad (4)$$

g) Incertitudes à considérer lors du dépouillement des rosettes à 45°

Ce paragraphe détaille les incertitudes à prendre en compte lors du dépouillement des rosettes à 45°. Celles-ci sont données par les équations (5) à (13).

$$\frac{\Delta d}{d} = \frac{\sqrt{2}\Delta\varepsilon_i}{\varepsilon_a + \varepsilon_c} \quad (5)$$

$$\Delta r = \sqrt{\frac{\Delta\varepsilon_b^2(\varepsilon_b - d)^2 + \Delta\varepsilon_c^2(\varepsilon_c - d)^2 + \Delta d^2(2d - \varepsilon_b - \varepsilon_c)^2}{(\varepsilon_b - d)^2 + (\varepsilon_c - d)^2}} \quad (6)$$

$$\Delta a = \frac{1}{2(\varepsilon_a - d)} \times \frac{1}{1 + \left(\frac{\varepsilon_b - d}{\varepsilon_a - d}\right)^2} \times \sqrt{\Delta\varepsilon_b^2 + \Delta\varepsilon_a^2 \left(\frac{\varepsilon_b - d}{\varepsilon_a - d}\right)^2 + \Delta d^2 \left(\frac{\varepsilon_b - \varepsilon_a}{\varepsilon_a - d}\right)^2} \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon_I = \Delta\varepsilon_{II} = \sqrt{\Delta d^2 + \Delta r^2} \quad (8)$$

$$\frac{\Delta\varepsilon_{III}}{\varepsilon_{III}} = \frac{\sqrt{\Delta\varepsilon_I^2 + \Delta\varepsilon_{II}^2}}{\varepsilon_I + \varepsilon_{II}} \quad (9)$$

$$\Delta\sigma_I = \sqrt{(2\mu + \lambda)^2 \Delta\varepsilon_I^2 + \lambda^2 (\Delta\varepsilon_{II}^2 + \Delta\varepsilon_{III}^2)} \quad (10)$$

$$\Delta\sigma_{II} = \sqrt{(2\mu + \lambda)^2 \Delta\varepsilon_{II}^2 + \lambda^2 (\Delta\varepsilon_I^2 + \Delta\varepsilon_{III}^2)} \quad (11)$$

$$\Delta\sigma_{xx} = \sqrt{\frac{\Delta\sigma_I^2}{4} [1 + \cos(\phi)]^2 + \frac{\Delta\sigma_{II}^2}{4} [1 - \cos(\phi)]^2 + \Delta a^2 (\sigma_{II} - \sigma_I)^2 \sin^2(\phi)} \quad (12)$$

$$\Delta\tau_{\theta x} = \sqrt{\frac{\sin^2(\phi)}{4} (\Delta\sigma_I^2 + \Delta\sigma_{II}^2) + \Delta a^2 (\sigma_{II} - \sigma_I)^2 \cos^2(\phi)} \quad (13)$$

Note : $\phi = 2a + \frac{\pi}{2}$.

Le ressource « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique* » [1] détaille les modèles employés pour ces travaux et la campagne d'essais est exposée dans la ressource « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : résultats expérimentaux* » [2].

Références :

[1]: Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique, B. Bordnar, M. Briat, V. Forcadell, C. Desodt, C. Giry, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/etude-appfondie-dun-banc-de-torsion-traction-etude-theorique

[2]: Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : résultats expérimentaux, B. Bordnar, M. Briat, V. Forcadell, C. Desodt, C. Giry, https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/etude-appfondie-dun-banc-de-torsion-traction-resultats-experimentaux