

Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : résultats expérimentaux

Bastien BODNAR - Matthieu BRIAT - Vincent FORCADELL
Clément DESODT - Cédric GIRY

Édité le
13/09/2021

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.

Cette ressource synthétise les résultats obtenus à l'issue d'une campagne d'essai sur un banc présenté dans la ressource « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : présentation* » [1], les objectifs, les manipulations ainsi que les incertitudes y sont également exposés. La ressource « *Étude théorique* » [2] détaille les modèles employés.

La campagne d'essai inclut :

- Des essais en torsion pure sur des éprouvettes cylindriques pleines et creuses en aluminium, en acier et en cuivre (chargement jusqu'à la plastification) ;
- Des essais en torsion et traction sur des éprouvettes cylindriques creuses en aluminium (chargement jusqu'à plastification) ;
- Deux essais en torsion pure sur des barres équipées de rosettes à 45° (dont une barre cylindrique pleine en acier et une cornière en aluminium) (phase élastique);
- Un essai sur une barre cylindrique pleine équipée d'un montage en pont complet (phase élastique).

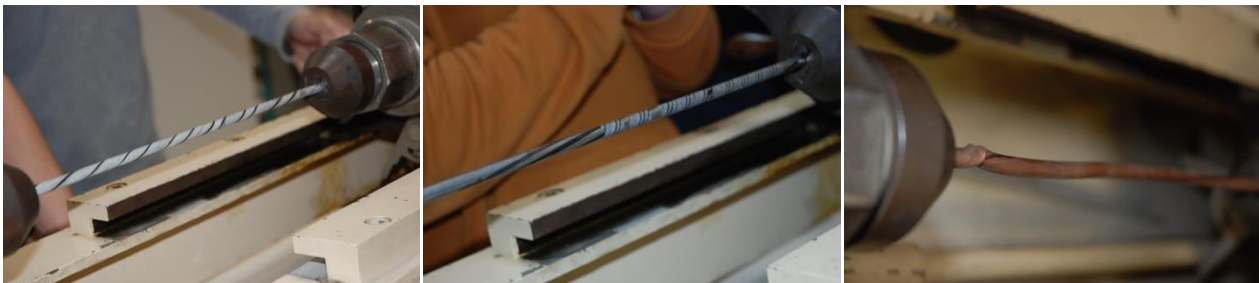


Figure 1 : Essais sur éprouvette en aluminium, en acier et en aluminium

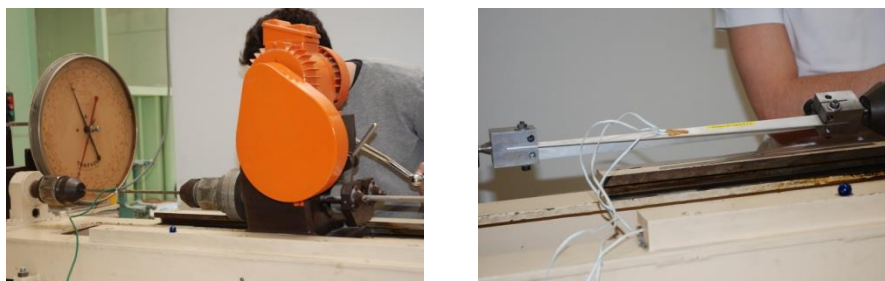


Figure 2 : Essais sur barres cylindriques équipées, essais sur cornière en L

Ces essais ont pour but de caractériser le comportement (élastique et plastique) des éprouvettes lorsqu'elles sont sollicitées en torsion et d'étudier l'évolution des contraintes dans la section.

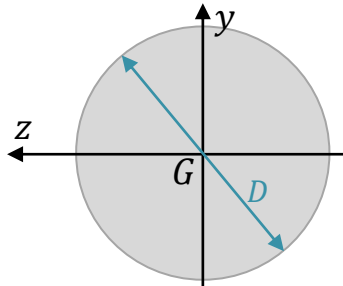
L'étude inclut également une comparaison des différents systèmes de mesure.

1 – Plastification d'éprouvettes sollicitées en torsion pure

Il a été choisi dans un premier temps d'étudier la plastification d'éprouvettes cylindriques sollicitées en torsion pure.

1.1 - Essais sur éprouvettes à section circulaire pleine

La section des éprouvettes cylindriques pleines est représentée figure 3. Ses caractéristiques sont données dans tableau 1.



D [mm]	S [mm ²]	I_0 [mm ⁴]
$8,1 \pm 0,1$	$51,2 \pm 0,7$	423 ± 12

Figure 3 : Section circulaire pleine

Tableau 1 : Caractéristiques géométriques de la section

Avant de réaliser les différents essais, il est tout d'abord nécessaire d'estimer la valeur du moment de plastification $M_{T,pl}$ (afin de caler la plage de mesure), d'après les critères de Tresca et von Mises. Les valeurs à considérer, déterminées à partir des équations (11), (20) et (22) de la ressource « Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique » [2], sont données le tableau 2.

Matériaux	f_y [MPa]	Tresca		von Mises	
		$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]
Aluminium	210	105	1117	121	1290
Acier	400	200	2127	231	2456
Cuivre	240	120	1276	139	1474

Tableau 2 : Moments de plastification théoriques d'après les critères de Tresca et von Mises (section circulaire pleine)

La figure 4 donne les courbes moment/rotation $M_T = f(\theta_L)$ des éprouvettes en aluminium, en acier et en cuivre, ainsi que leur moment de plastification expérimental (défini comme la limite entre le comportement élastique linéaire et le comportement plastique).

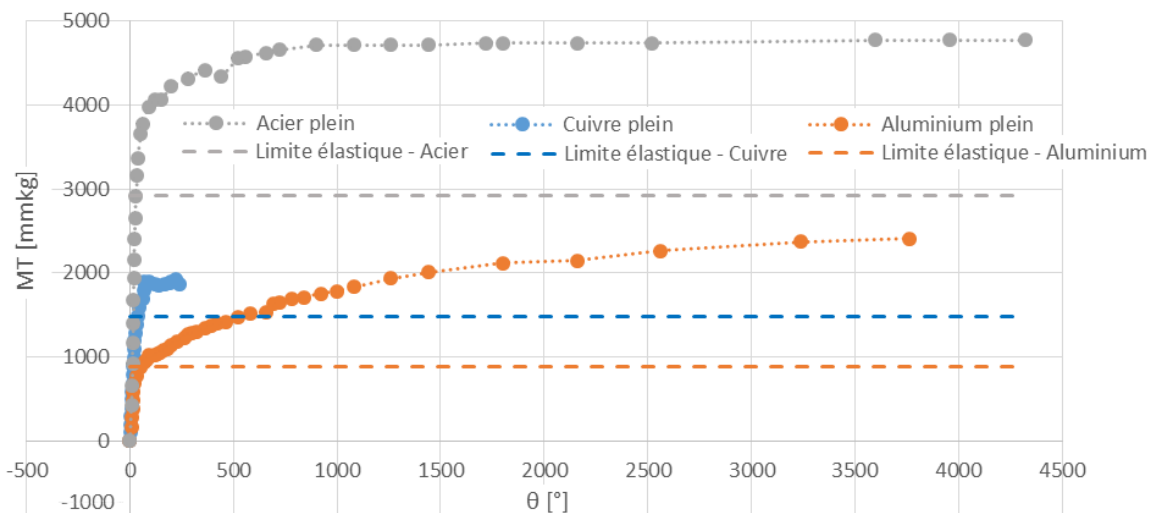


Figure 4 : Courbe moment/rotation des éprouvettes à section circulaire pleine.

Note : en raison d'un problème de calibrage avec le cadran (lecture du moment), la plastification de l'éprouvette en cuivre n'a pas pu être poursuivie jusqu'à la rupture. Néanmoins, l'essai permet tout de même d'identifier le palier de plastification du matériau.

On observe que lorsqu'ils sont soumis à de la torsion, le comportement de l'aluminium, de l'acier et du cuivre peut être approximé, comme en traction, par une loi bilinéaire, dont le changement de pente s'effectue en $M_{T,pl}$.

Le tableau 2 donne les valeurs des contraintes σ_{xx} , $\tau_{\theta x,pl}$, σ_I et σ_{II} à la limite du domaine élastique linéaire (d'après les résultats expérimentaux).

Matériaux	$M_{T,pl}$ [mmkg]	σ_{xx} [MPa]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]
Aluminium	880 ± 3	0	83 ± 3	83 ± 3	-83 ± 3
Acier	2920 ± 3	0	275 ± 8	275 ± 8	-275 ± 8
Cuivre	1485 ± 3	0	140 ± 4	140 ± 4	-140 ± 4

Tableau 2 : Contraintes à la plastification (sections pleines - d'après la courbe moment/rotation)

L'évolution des contraintes dans le repère principal est représentée de la figure 5 à la figure 7. Ces résultats sont associés aux surfaces seuil définies par les critères de Tresca et von Mises.

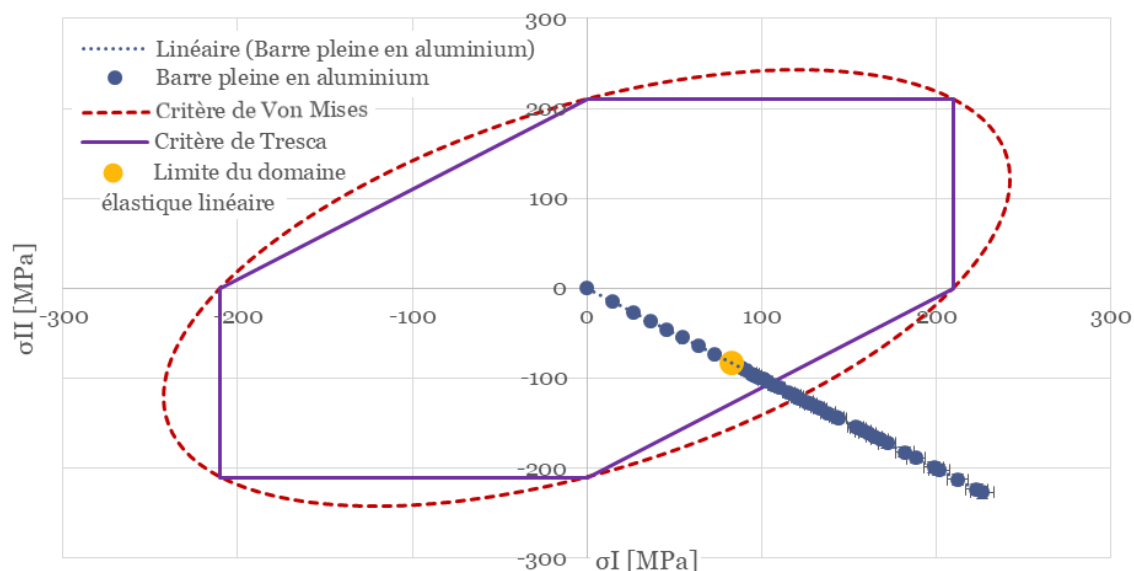


Figure 5 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire pleine - aluminium)

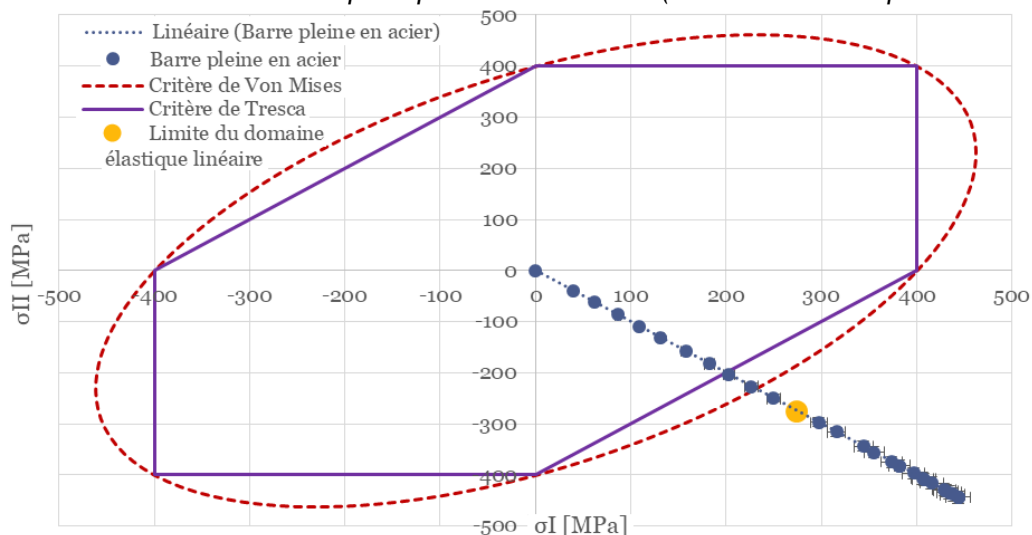


Figure 6 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire pleine - acier)

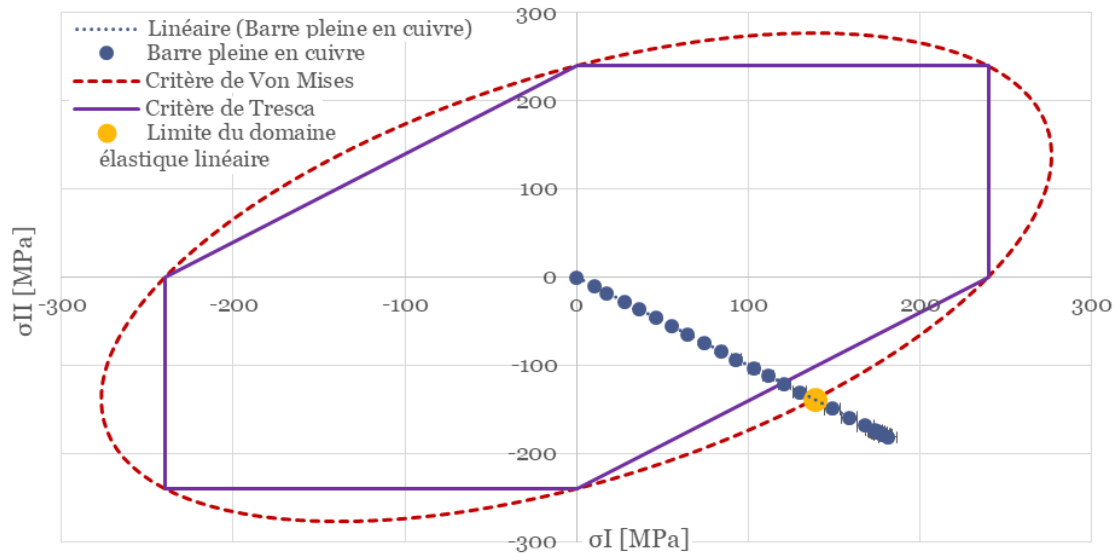


Figure 7 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire pleine - cuivre).

On observe de la figure 5 à la figure 7 que $\sigma_I = -\sigma_{II}$, ce qui correspond bien à un chargement en torsion pure.

Les moments de plastification $M_{T,pl}$ expérimentaux (déterminés en fonction de la limite entre le comportement élastique linéaire et le comportement plastique) sont, suivant le matériau étudié, inclus ou exclus des surfaces seuils.

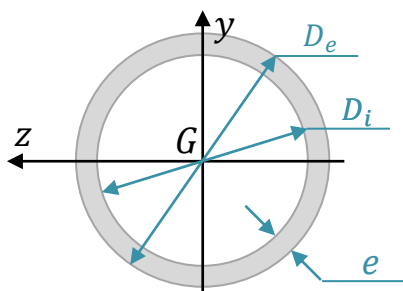
Ainsi, la plastification de l'acier a été localisée en dehors de la surface seuil de von Mises (résistance supérieure à celle prédite), tandis celle de l'aluminium est située à l'intérieur de la surface seuil de Tresca (où le comportement est en théorie toujours élastique). Le cuivre, quant-à-lui, respecte le critère de von Mises (couramment employé pour les métaux).

Cette variabilité peut s'expliquer par :

- La présence d'un défaut local (qui définit également la position de la rotule plastique) ;
- Une incertitude sur les caractéristiques des matériaux ;
- Une erreur systématique propre au système de mesure (i.e. le système de mesure du moment).

1.2 - Essais sur éprouvettes à section circulaire creuse

La section des éprouvettes cylindriques creuses est représentée en figure 8. Ses caractéristiques sont données dans le tableau 3.



D_e [mm]	D_i [mm]	e [mm]	S [mm ²]	S_i [mm ²]
$8,1 \pm 0,1$	$8,1 \pm 0,1$	$1,0 \pm 0,1$	22 ± 1	40 ± 1

Figure 8 : Section circulaire creuse

Tableau 3 : Caractéristiques géométriques de la section

Le tableau 4 donne les valeurs théoriques des moments de plastification, estimés d'après les critères de Tresca et von Mises.

Matériaux	f_y [MPa]	Tresca		von Mises	
		$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]
Aluminium	210	105	848	121	979
Acier	400	200	1614	231	1855
Cuivre	240	120	969	139	1119

Tableau 4 : Moments de plastification théoriques d'après les critères de Tresca et von Mises (section circulaire creuse)

Les essais sur sections creuses ont été menés à bien en réalisant des cycles de chargement/déchargement, afin d'étudier le phénomène d'hystérésis du matériau. Les courbes moment/rotation obtenues sont détaillées figure 9.

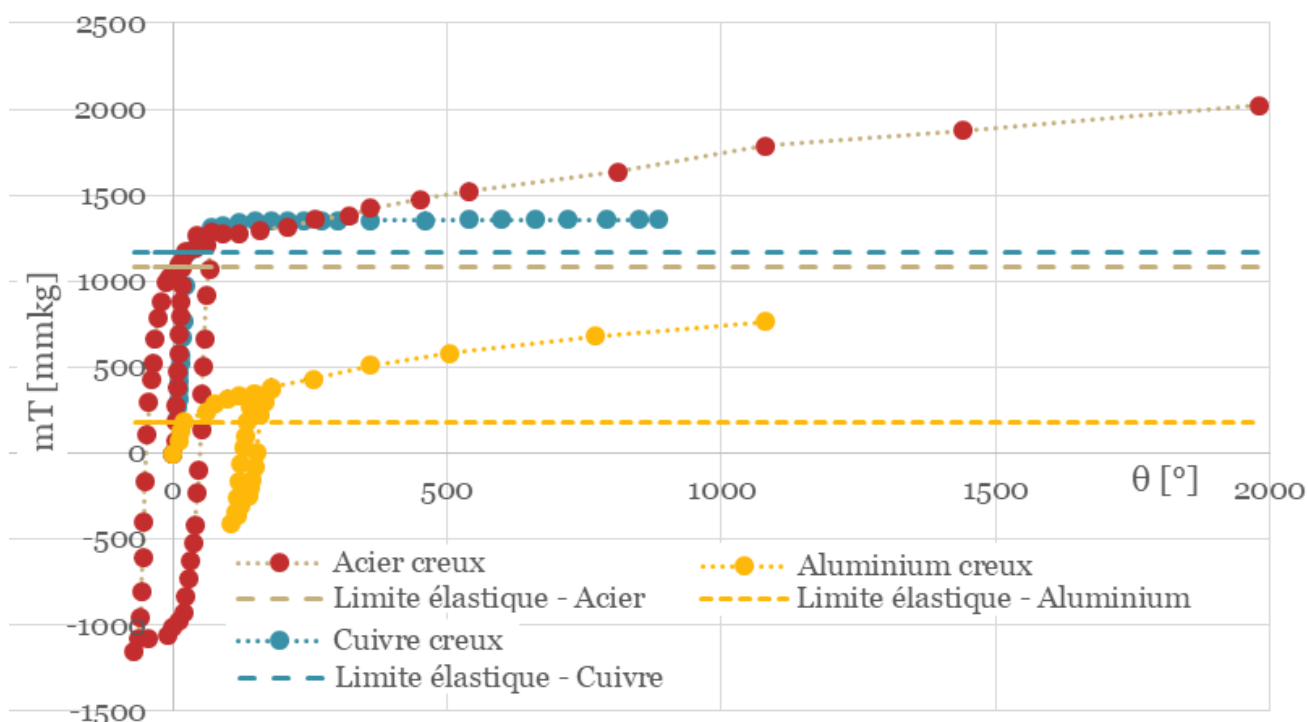


Figure 9 : Courbe moment/rotation des éprouvettes à section circulaire creuse.

Le tableau 5 donne l'état de contrainte dans le matériau à la plastification.

Matériau	$M_{T,pl}$ [mmkg]	σ_{xx} [MPa]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]
Aluminium	180 ± 3	0	22 ± 2	22 ± 2	-22 ± 2
Acier	1080 ± 3	0	134 ± 8	134 ± 8	-134 ± 8
Cuivre	1170 ± 3	0	145 ± 9	145 ± 9	-145 ± 9

Tableau 5 : Contraintes à la plastification (sections creuses - d'après la courbe moment/rotation)

Lorsque l'on plastifie les aciers, puis que l'on procède à un cycle de déchargement → changement de signe du moment → plastification → changement de signe du moment → rechargement, un phénomène d'écrouissage cinématique apparaît, i.e. de décalage du domaine d'élasticité.

Pour chacun des matériaux, l'évolution de l'état de contraintes, dans le repère principal et dans le plan de Mohr, est représentée de la figure 10 à la figure 12.

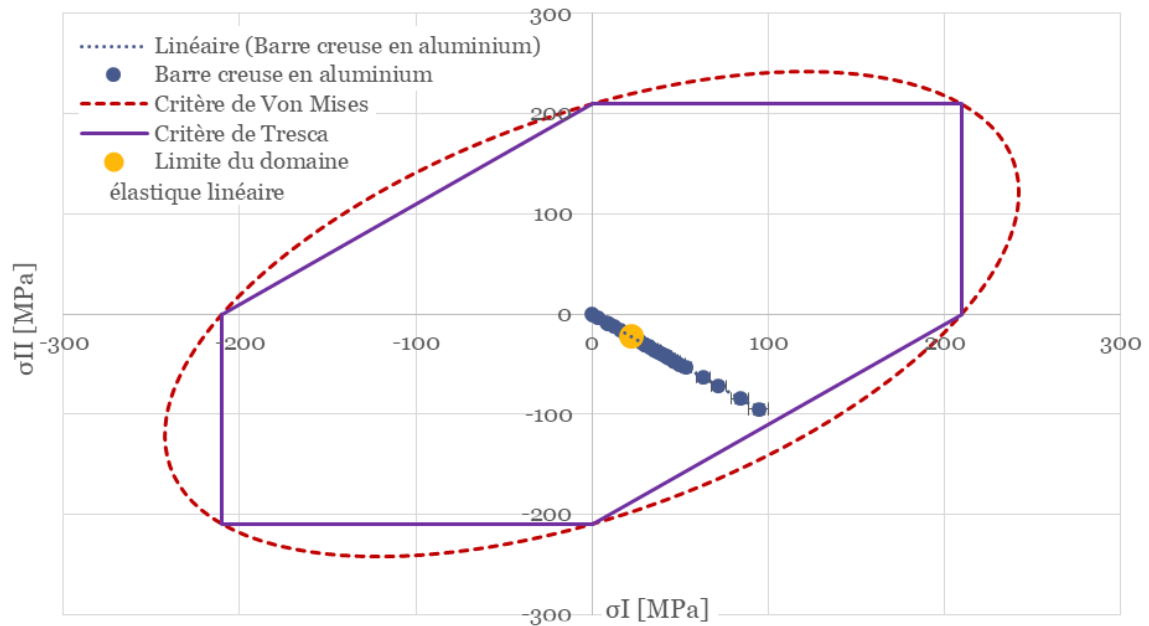


Figure 10 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire creuse - aluminium)

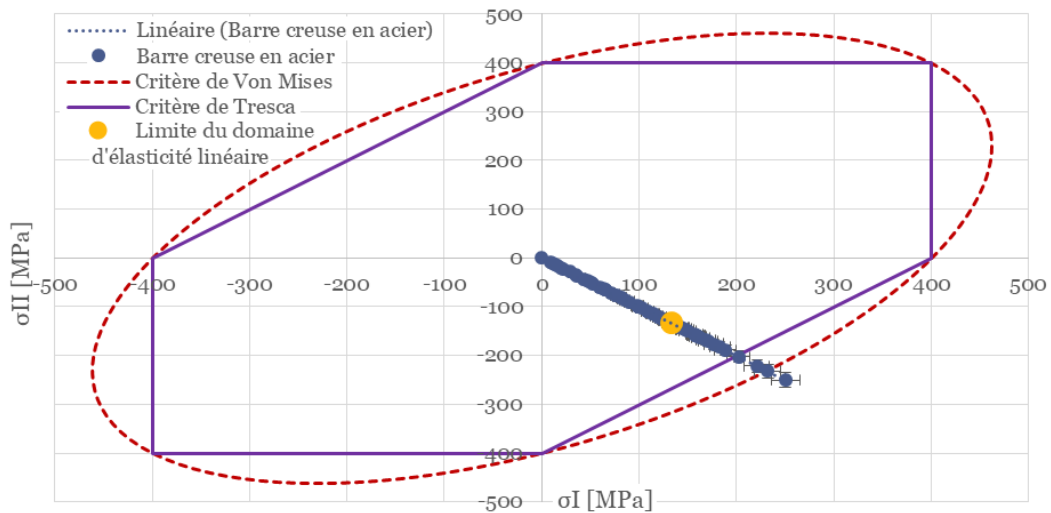


Figure 11 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire creuse - acier)

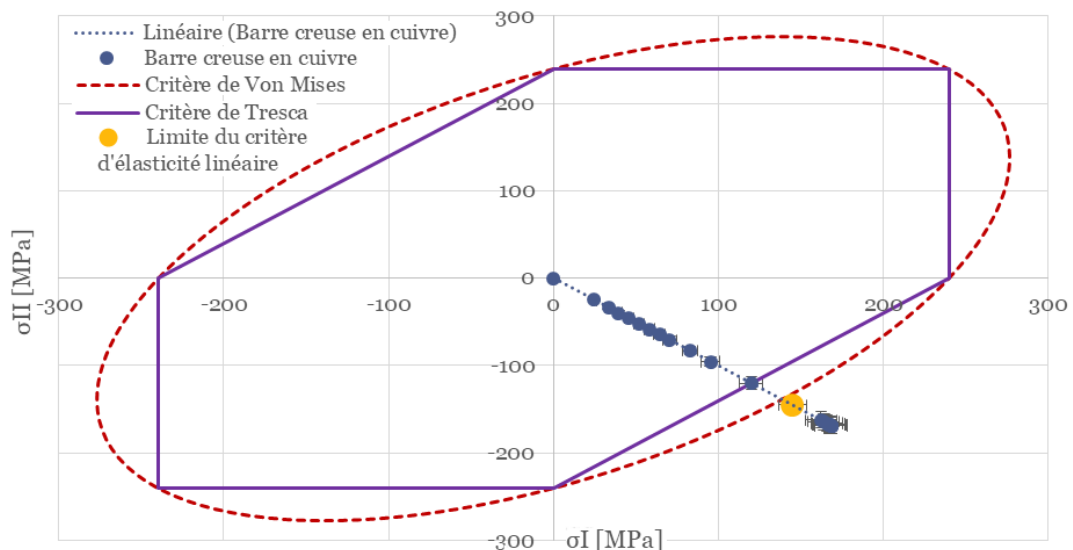


Figure 12 : Évolution des contraintes principales durant l'essai (section circulaire creuse - cuivre)

On observe que, dans le cas de l'aluminium et de l'acier, le comportement plastique apparaît pour un chargement en torsion bien plus faible que la valeur estimée avec les critères de Tresca et von Mises.

En effet, dans le cas d'une section creuse, l'influence d'une imperfection sur l'épaisseur du contour est bien plus importante que dans le cas d'une section pleine. La plastification apparaît donc plus rapidement.

Cela est visible durant l'essai par une déformation importante de la section au niveau du point de plastification (ruine locale) (figure 13). À l'inverse, lorsque la section est pleine et qu'il n'y a pas d'imperfection, la rotation est répartie sur toute la longueur de la barre (figure 14). L'influence du défaut étant moins perceptible, le comportement de l'éprouvette se rapproche ainsi des critères de Tresca et von Mises.



(a)



(b)

Figure 13 : Plastifications locales (barres creuses) : (a) barre en cuivre et (b) barre en acier

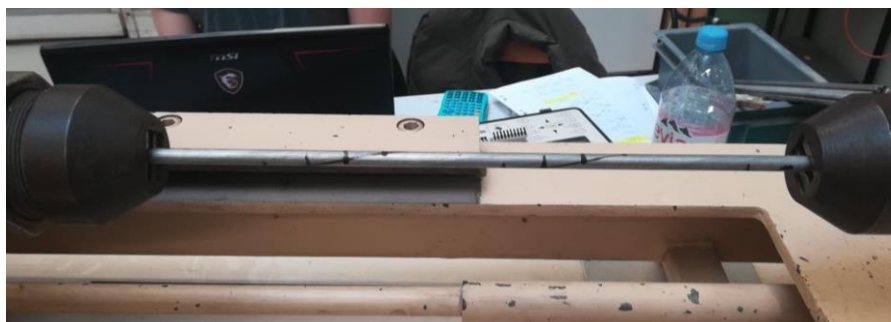


Figure 14 : Plastification globale et répartie (barre pleine en acier)

2 – Influence d'un effort de traction sur le comportement en torsion

Afin d'étudier l'influence d'un effort de traction sur la plastification des éprouvettes, il a été choisi dans un second temps de réaliser de nouveaux essais sur des barres en aluminium à section circulaire creuse. Chacune d'entre elle a été sollicitée par un effort normal (constant durant l'application du moment de torsion), allant de 0 à 1883 N.

L'emploi de barres creuses en aluminium (de section et de résistance plus faibles que les barres pleines en acier) permet de mieux observer l'influence de l'effort normal sur la ruine du matériau.

L'objectif de cette manipulation est de déterminer expérimentalement le moment de plastification $M_{T,pl}$ pour différents paliers de chargement, ainsi que plusieurs points appartenant à la limite de la surface seuil. Une comparaison avec les critères de Tresca et von Mises permettra d'identifier le modèle caractérisant au mieux le comportement de l'aluminium.

Le tableau 6 donne, en fonction de l'effort normal N_L , la valeur théorique du moment de plastification $M_{T,pl}$.

M [g]	N_L [N]	σ_{xx} [MPa]	Tresca		von Mises	
			$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]
9782 ± 1	428 ± 5	19 ± 1	105	844	121	975
19665 ± 1	861 ± 10	39 ± 2	103	833	119	962
29447 ± 1	1289 ± 15	58 ± 2	101	815	117	941
43027 ± 1	1883 ± 22	84 ± 4	96	776	111	896

Tableau 6 : Moments de plastification théoriques d'après les critères de Tresca et von Mises (variations de l'effort normal)

Les courbes moment/rotation obtenues à l'issu des essais sont représentées figure 15. La figure 16 donne quant-à-elle l'évolution des contraintes principales pour chaque effort de traction appliqué.

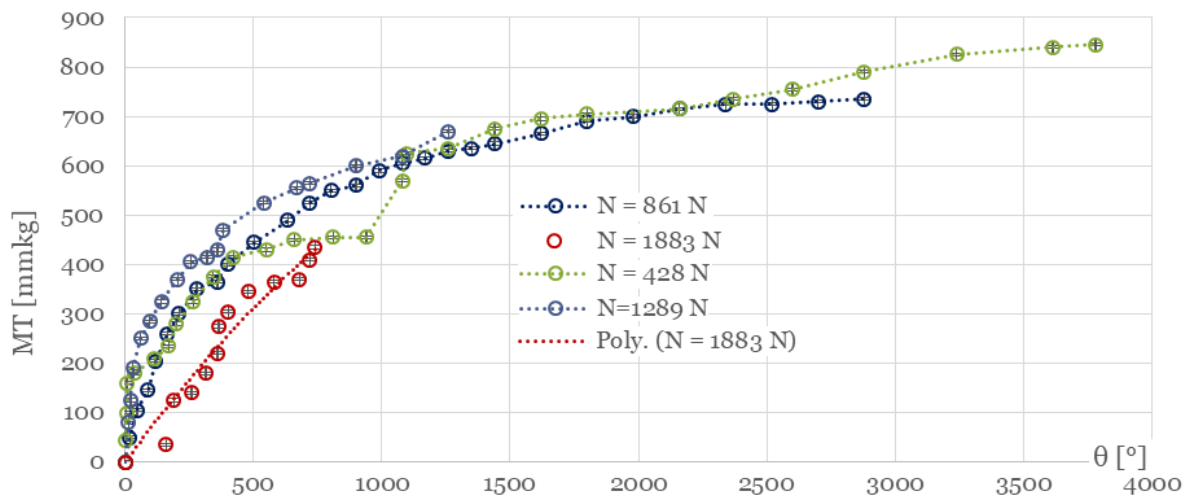


Figure 15 : Courbes moment de torsion/rotation axiale pour chaque palier de chargement (variation de l'effort normal)

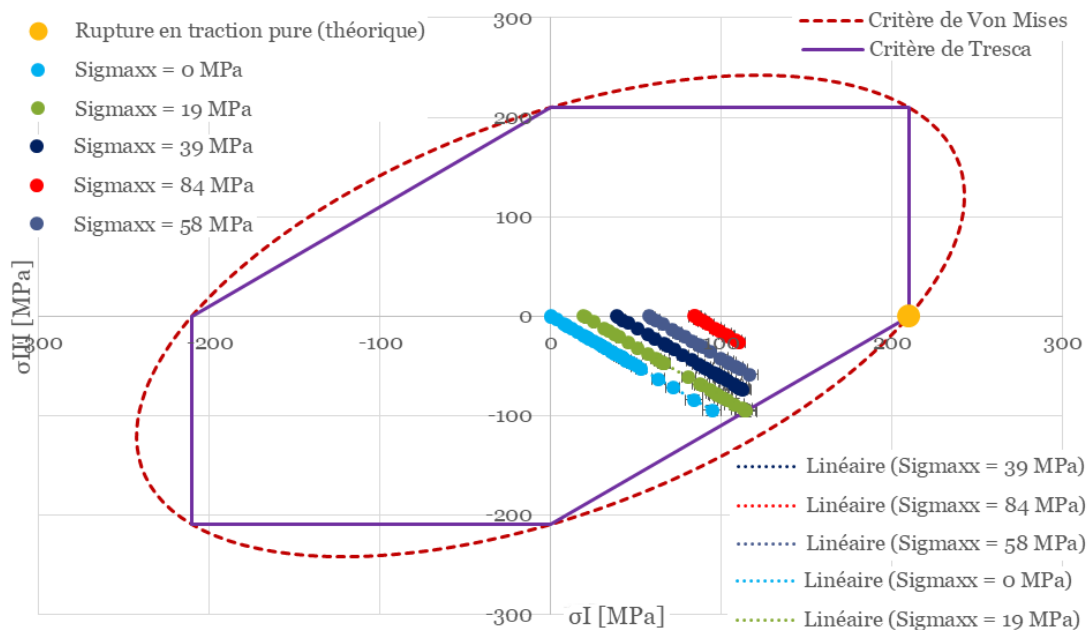


Figure 16 : Evolution des contraintes principales pour chacun des essais (variation de l'effort normal).

La figure 16 met clairement en évidence l'influence défavorable du chargement en traction sur la résistance de l'éprouvette vis-à-vis de la torsion. Plus le chargement en traction augmente et plus on se rapproche de la limite de la surface seuil : cela a ainsi pour effet de diminuer le moment menant à la plastification de l'éprouvette.

Il est intéressant de remarquer que bien que les éprouvettes aient toutes été plastifiées (excepté celle soumise à une contrainte normale $\sigma_{xx} = 84$ MPa), l'état de contrainte dans l'éprouvette reste, d'après les critères de Tresca et von Mises, dans le domaine élastique. Ce résultat met possiblement en évidence une erreur systématique liée à la mesure du moment de torsion à l'aide du cadran. Une comparaison avec d'autres systèmes de mesure plus précis (pont complet ou jauges à 45°) est nécessaire afin de confirmer ou non cette hypothèse.

On observe sur la figure 15 que la transition entre le domaine élastique linéaire et le domaine plastique est beaucoup moins marquée en présence d'un effort de traction. Afin de pouvoir identifier le moment de plastification $M_{T,pl}$ expérimentalement, il a été choisi d'approximer les courbes obtenues par une loi bilinéaire, tel que présenté figure 17.

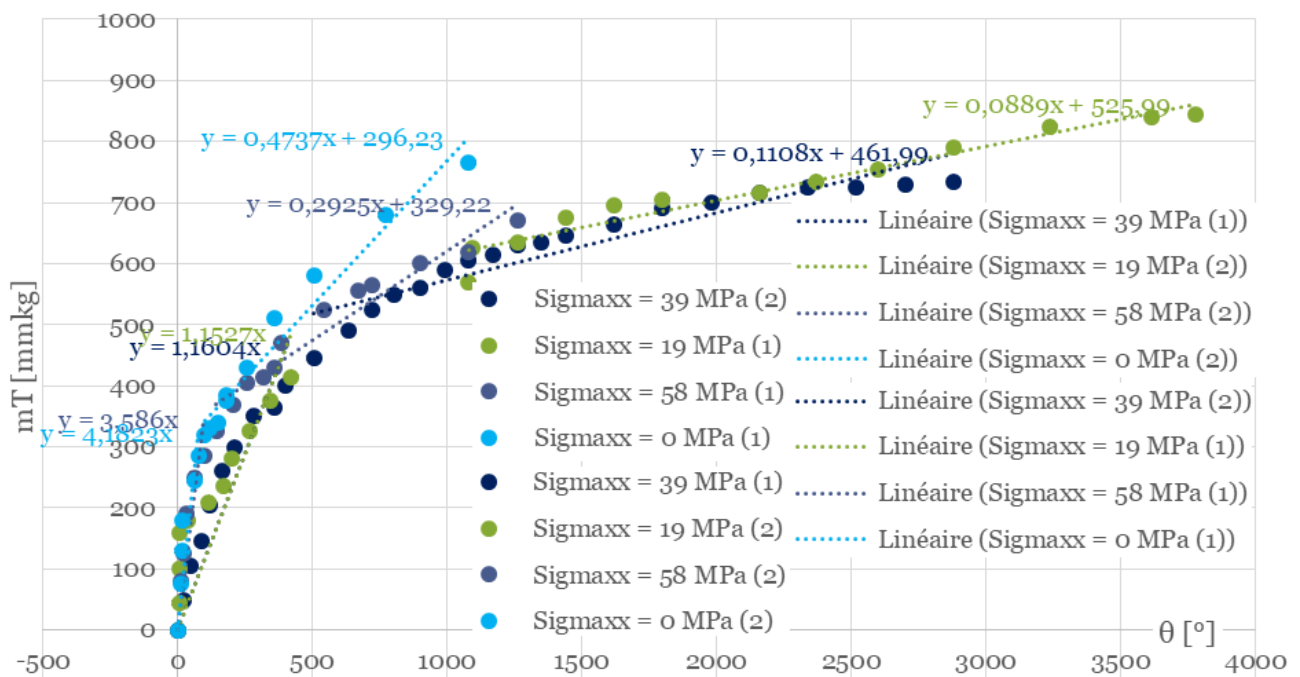


Figure 17 : Approximation des courbes moment de torsion/rotation axiale par une loi bilinéaire (variation de l'effort normal)

Note : en raison d'une erreur lors de la mise à niveau du bras de levier, l'essai réalisé pour $N_L = 1883$ N n'a pas pu être mené jusqu'à observer la plastification de l'éprouvette.

Les moments de plastification $M_{T,pl}$, identifiés au niveau de l'interception entre les droites de comportement des domaines élastique linéaire et plastique, sont répertoriés dans le tableau 7 (ainsi que les valeurs de σ_{xx} , $\tau_{\theta x}$, σ_I et σ_{II}).

N_L [N]	$M_{T,pl}$ [mmkg]	σ_{xx} [MPa]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	σ_I [MPa]	σ_{II} [MPa]
0	334 ± 3	0	74 ± 5	74 ± 5	-74 ± 5
428 ± 5	570 ± 3	19 ± 1	125 ± 8	135 ± 8	-116 ± 8
861 ± 10	511 ± 3	39 ± 2	112 ± 7	133 ± 7	-95 ± 7
1289 ± 15	359 ± 3	58 ± 3	79 ± 5	113 ± 5	-55 ± 5

Tableau 7 : Contraintes à la plastification (variation de l'effort normal)

Ces différents points sont représentés figure 18, dans le repère des contraintes principales, et comparés aux valeurs limites données par les critères de Tresca et von Mises.

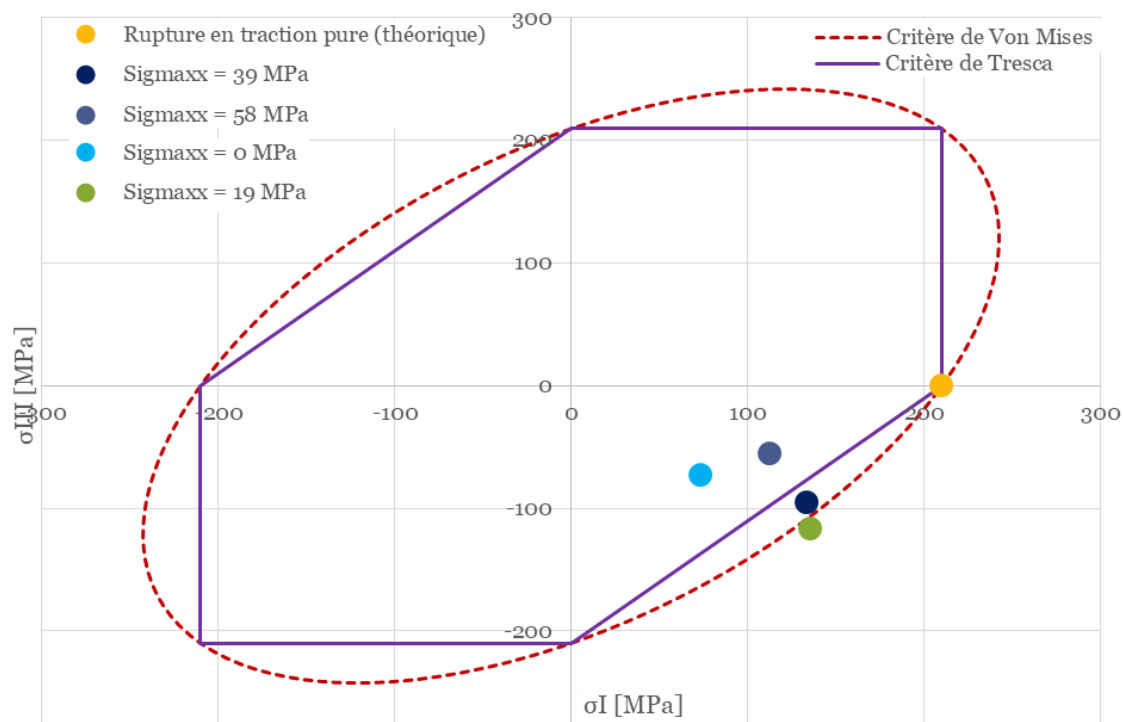


Figure 18 : Contraintes principales à la limite d'élasticité (expérimental) (variation de l'effort normal)

On observe figure 18 que les points de la surface seuil, identifiés expérimentalement, sont soumis à une importante dispersion. Dans le cas des essais réalisés avec $\sigma_{xx} = 0$ MPa et $\sigma_{xx} = 58$ MPa, la plastification se produit à un état de contrainte où, en théorie, le comportement est toujours élastique. Les autres essais, quant-à-eux, sont cohérents avec les critères de von Mises et Tresca (dans le cas où l'on approxime la série de mesures par deux droites linéaires).

La plastification ayant généralement lieu à un état de contrainte localisé à la limite du domaine élastique, il est préférable de modéliser le comportement de ces éprouvettes à l'aide du critère de Tresca (mise en sécurité).

Nous pouvons en conclure que bien que le banc d'essai permette d'observer la plastification du matériau, le système de mesure employé jusqu'ici (lecture de la rotation et du moment sur cadrans) n'est pas suffisamment précis pour tracer expérimentalement la surface seuil, la dispersion étant trop importante.

Cela peut être imputé à une erreur systématique du système de mesure, ou à des imperfections dans l'épaisseur de la section de l'éprouvette (qui entraînent une concentration de contrainte et donc une plastification locale). L'apparition d'une rotation de corps rigide de l'ensemble de l'éprouvette (glissement au niveau des mors durant l'application du moment de torsion) peut également expliquer une éventuelle sous-estimation de la valeur du moment de torsion.

Enfin, chaque point de la surface seuil a été défini avec un seul essai, qui, suivant l'éprouvette utilisée, n'est pas forcément représentatif du comportement du matériau. Afin d'améliorer la précision de la valeur identifiée, il serait donc pertinent de réaliser au moins trois essais par palier de chargement en traction.

3 – Essai en torsion pure sur une barre cylindrique à section pleine en acier

Cette partie s'intéresse à l'étude d'une barre en acier à section circulaire pleine instrumentée en pont complet. Les quatre jauges constituant le pont sont positionnées au milieu de la barre (en $x = L/2$). La barre est sollicitée en torsion pure et uniquement en élasticité, afin de pouvoir être réutilisée.

L'objectif de cette manipulation est de comparer la loi de comportement à la mesure réalisée à l'aide de ce montage.

De plus, on pourra également comparer les deux dispositifs de mesure employés, à savoir le pont complet (mesurant la distorsion γ_{max}) et le disque (mesurant la rotation axiale θ_L).

L'éprouvette testée est cylindrique de diamètre $D = 8,1$ mm et de longueur $L = 315$ mm.

Afin de déterminer la plage de mesure du moment en phase élastique, il est nécessaire d'estimer le moment de plastification $M_{T,pl}$. Ce moment est estimé à partir des critères de Tresca et von Mises (tableau 8).

Matériau	f_y [MPa]	Tresca		von Mises	
		$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]	$\tau_{\theta x,pl}$ [MPa]	$M_{T,pl}$ [mmkg]
Acier	400	200	2127	231	2456

Tableau 8 : Moments de plastifications d'après les critères de Tresca et von Mises (barre en acier instrumentée avec un montage en pont complet).

La figure 19 présente l'évolution des courbes moment/rotation $M_T = f(\theta_{L/2})$ pour l'éprouvette en acier (avec $\theta_{L/2}$ la rotation au milieu de la barre, où se trouve le capteur). Cette rotation sera utilisée comme référence pour comparer les deux systèmes de mesure.

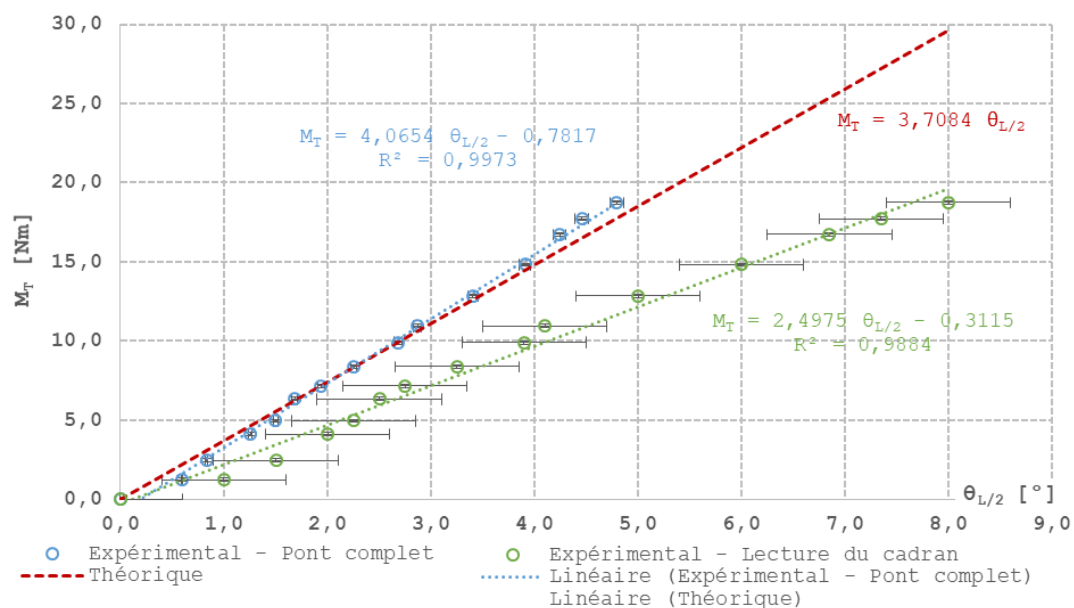


Figure 19 : Évolution du moment en fonction de la rotation (barre en acier instrumentée avec un montage en pont complet)

La courbe théorique correspond à la loi de comportement $M_T = \frac{\mu I_0}{L/2} \theta_{L/2}$.

La courbe expérimentale - pont complet correspond à la fonction $M_T = f\left(\theta_{\frac{L}{2}}^{\text{mesuré}}\right)$.

La courbe expérimentale - lecture cadran correspond à la fonction $M_T = f\left(\theta_{\frac{L}{2}} = \frac{L/2 \gamma_{\text{mesuré}}}{R}\right)$.

Nous constatons expérimentalement que l'évolution du moment est linéaire par rapport à la rotation ($R^2 > 0,988$). Cette constatation est vraie pour les deux systèmes de mesure.

Les régressions linéaires effectuées sur les mesures fournissent une valeur d'ordonnée à l'origine non nulle. Cependant ces valeurs étant très faible ($< 0,8 \text{ N.m}$) on peut considérer qu'elles sont dues aux incertitudes de mesure.

Les coefficients directeurs entre l'expérimental avec pont complet et la théorie ont un écart de 8%. Nous pouvons donc considérer d'après cet écart ($< 10\%$) que la loi de comportement est fidèle au comportement réel.

Cependant avec la mesure de la rotation au niveau du disque, l'écart entre les coefficients directeurs est de 33%. Dans ce cas nous constatons que les mesures ne sont pas fidèles à la théorie.

Cela peut s'expliquer par le système de mesure, qui entraîne une plus grande incertitude sur la valeur de la rotation. Nous pouvons aussi l'expliquer par le fait que la barre n'était pas parfaitement centrée. Ainsi la rotation ne correspondrait pas à la moitié de la rotation totale. Enfin, des effets parasites de flexion ont pu influencer sur la mesure de la rotation. Ces effets peuvent apparaître lors du serrage des mors.

D'après les barres d'incertitudes, nous constatons que la mesure avec le pont complet réduit considérablement les incertitudes de mesure sur la rotation. De plus, la théorie est fidèle aux mesures effectuées avec le pont complet. Par conséquent, nous en déduisons que les mesures effectuées avec le pont complet sont meilleures que celles réalisées avec le cadran.

La figure 20 présente l'évolution des contraintes principales durant l'essai.

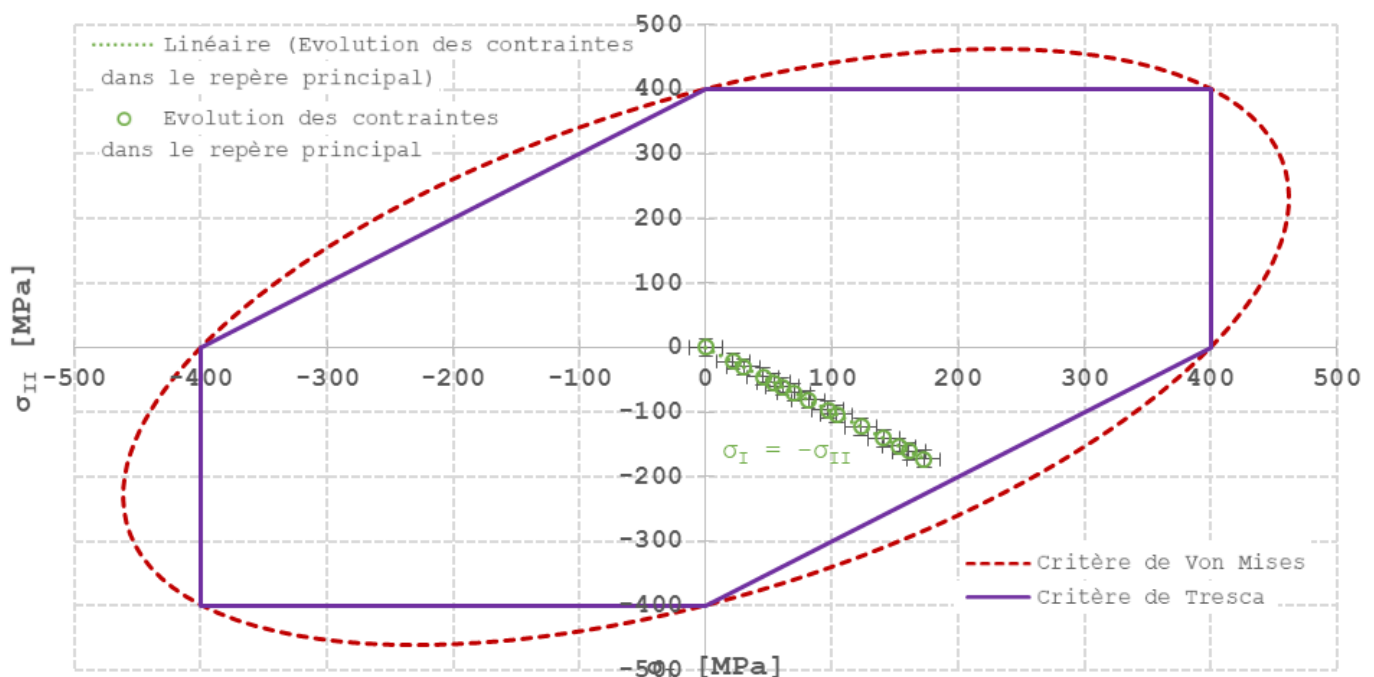


Figure 20 : Évolution des contraintes principales durant l'essai en torsion pure (barre en acier instrumentée avec un montage en pont complet)

D'après la figure 20 nous constatons que $\sigma_I = -\sigma_{II}$. Par conséquent nous en concluons que la barre subit uniquement de la torsion.

De plus, nous observons sur cette figure que les contraintes principales sont inférieures aux surfaces seuil des critères de Tresca et von Mises (phase élastique).

4 – Essai en torsion pure sur une cornière en L soumise à un risque de gauchissement

Afin d'étudier l'influence du gauchissement sur les contraintes internes, un dernier essai en torsion pure a été réalisé sur une cornière en aluminium pourvue d'une section en L. Cet essai a été instrumenté avec une rosette à 45°, dont la méthode de dépouillement a été présentée dans la ressource « *Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique* » [2], et employée afin d'estimer la valeur du moment de torsion. Les résultats obtenus ont ainsi pu être comparés à ceux donnés par le cadran.

La section de la cornière étudiée est représentée figure 21, et ses dimensions détaillées dans le tableau 9.

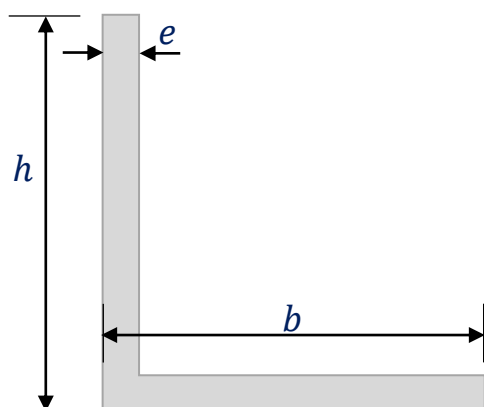


Figure 21 : Section en L de la cornière

b [mm]	h [mm]	e [mm]	S [mm ²]
$20,0 \pm 0,1$	$20,0 \pm 0,1$	$2,0 \pm 0,1$	76 ± 1

Tableau 9 : Caractéristiques géométriques de la section en L

Notes :

- Section de la cornière (1) :

$$S = (b + h - e)e \quad (1)$$

- Contrainte de cisaillement maximale (2) :

$$\tau_{\theta x, \max} \approx \frac{3M_T}{e^2(b + h - e)} \quad (2)$$

Comme dans le cas précédent, l'essai a été réalisé dans le domaine élastique. Le tableau 10 donne les valeurs théoriques du moment de plastification $M_{T,pl}$, d'après les critères de Tresca et von Mises.

Matériau	f_y [MPa]	Tresca		von Mises	
		$\tau_{\theta x, pl}$ [MPa]	$M_{T, pl}$ [mmkg]	$\tau_{\theta x, pl}$ [MPa]	$M_{T, pl}$ [mmkg]
Aluminium	210	121	626	105	542

Tableau 10 : Moments de plastifications théoriques d'après les critères de Tresca et von Mises (cornière en aluminium).

Afin d'éviter tout risque de plastification, la cornière a été sollicitée par un moment de torsion $M_T \in [0 ; 500 \text{ mmkg}]$ (mesuré à l'aide du cadran). La figure 23 donne les courbes moment de torsion/rotation axiale $M_T(\theta_L)$ obtenues à l'issue de l'essai. Sur cette figure sont tracées :

- La courbe théorique correspondant à la loi de comportement $M_{T,th} = \frac{\mu I_0}{L} \theta_L$;
- La courbe expérimentale $M_{T,rosette\ 45^\circ} = f(\theta_L)$ (moment de torsion issu du dépouillement de la rosette à 45°) ;
- La courbe expérimentale $M_{T,cadran} = f(\theta_L)$ (moment de torsion lu directement sur le cadran).

La figure 22 montre la déformée de la cornière au cours de l'essai.



Figure 22 : Déformée de la cornière durant l'essai en torsion pure

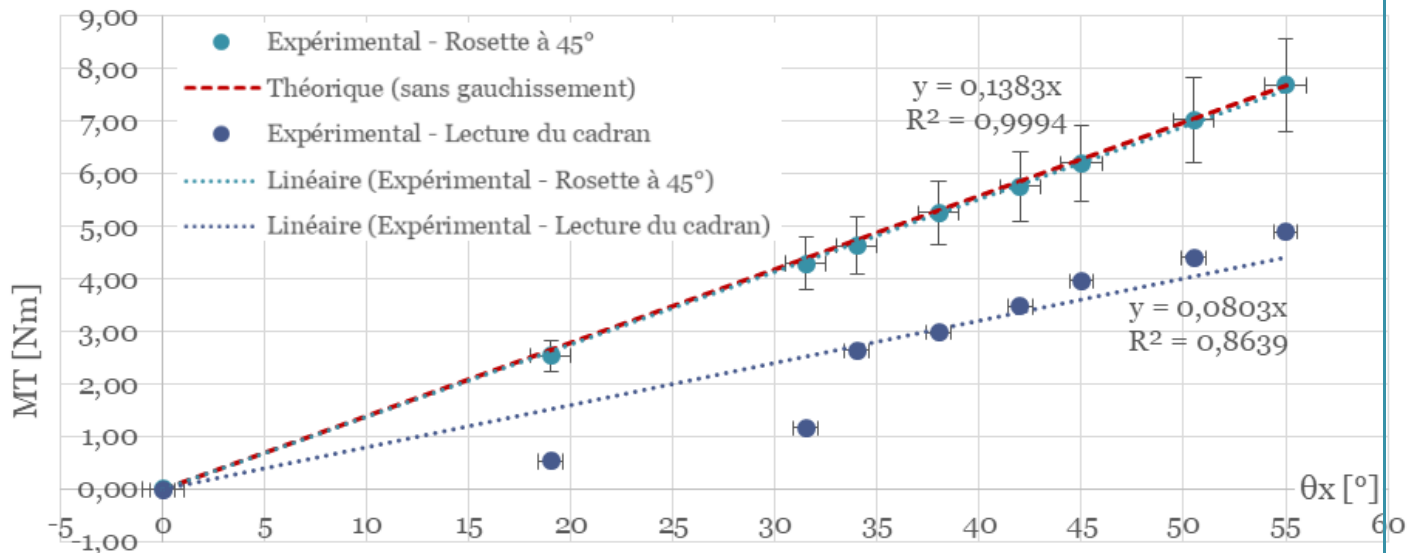


Figure 23 : Évolution du moment de torsion en fonction de la rotation axiale (cornière en aluminium).

On observe figure 23 que l'erreur entre le moment mesuré à l'aide de la rosette à 45° et le modèle théorique est très faible (erreur relative $E\% \leq 4\%$ sur l'ensemble de la série de données). De plus, les mesures présentent une faible dispersion ($R^2 = 0,994 \approx 1$).

A contrario, la mesure réalisée à l'aide du cadran présente une erreur très importante ($E\% \leq 80\%$ sur l'ensemble de la série de données), ainsi qu'une grande dispersion ($R^2 = 0,8639$).

La mesure de M_T réalisée à l'aide de la rosette à 45° donne donc des résultats en accord avec la loi de comportement en élasticité linéaire. Le cadran, quant-à-lui, a tendance à sous-évaluer la valeur de M_T .

La figure 24 représente l'évolution des contraintes principales au cours du chargement, estimées à partir des déformations ε_a , ε_b et ε_c mesurées par les jauges de déformation.

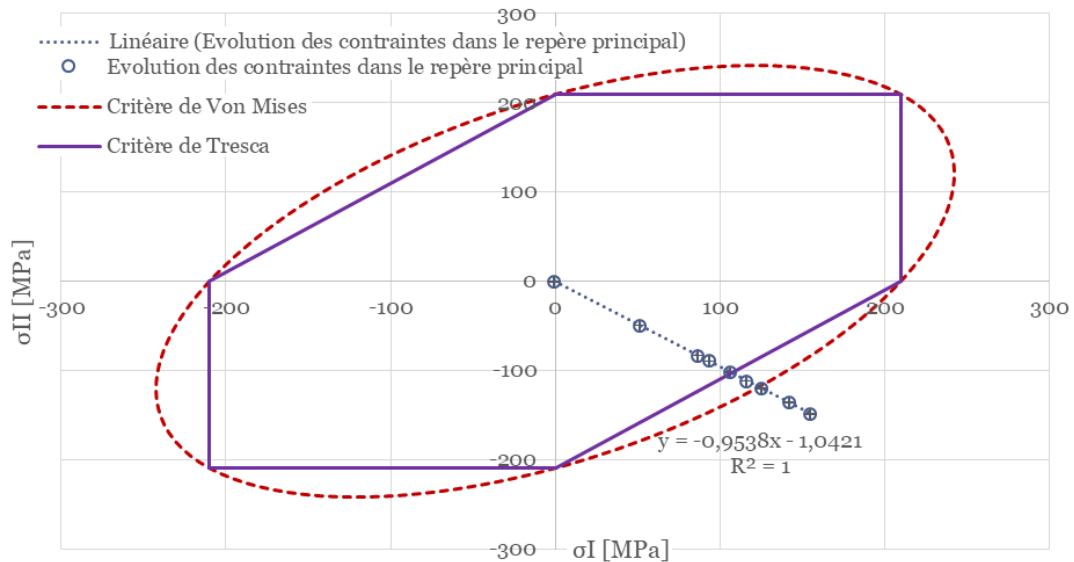


Figure 24 : Évolution des contraintes principales durant l'essai en torsion pure (cornière en aluminium)

On observe figure 24 que la cornière a été plastifiée au cours du chargement, et ce malgré les précautions prises sur la plage de mesure du moment. Néanmoins, la distribution de $\tau_{\theta x}$ étant considérée comme linéaire dans l'épaisseur (comme le montrent la théorie de Saint-Venant et l'analogie de la membrane), la plastification de la section n'est que partielle et localisée : la section garde donc dans l'ensemble un comportement élastique linéaire durant l'essai (ce qui explique pourquoi l'éprouvette n'a pas conservé de déformation résiduelle).

La figure 25 montre l'évolution des contraintes normale σ_{xx} et tangentielle $\tau_{\theta x}$ dans le plan de Mohr au cours de l'essai.

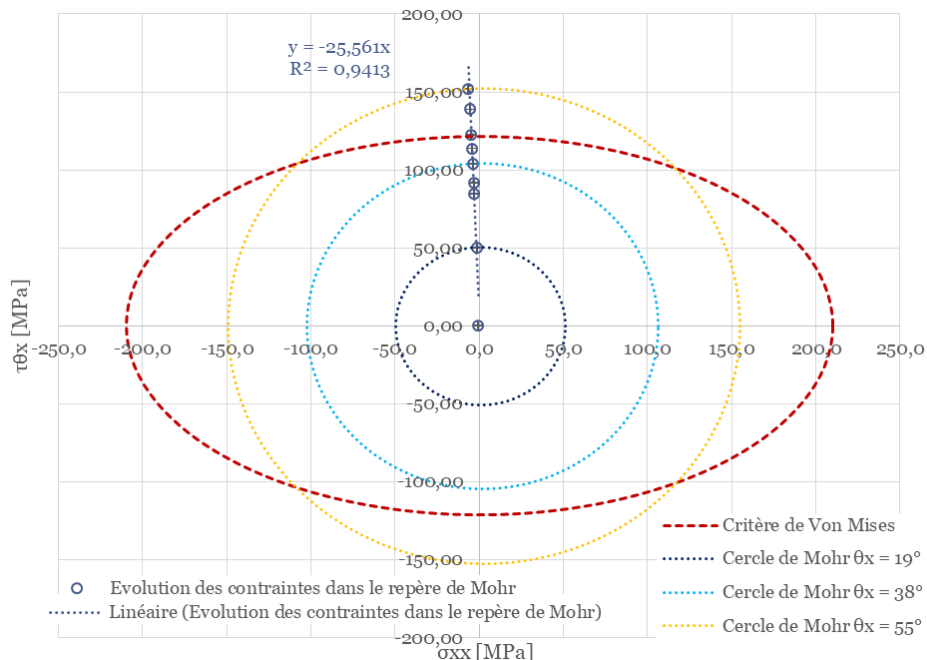


Figure 25 : Évolution des contraintes normale et tangentielle durant l'essai en torsion pure (cornière en aluminium).

La figure 25 met en évidence l'apparition d'une contrainte normale de compression σ_{xx} durant le chargement de l'éprouvette. Cette contrainte, initialement nulle, croît en intensité avec le moment de torsion, pour atteindre la valeur de $-6,5$ MPa à la fin de l'essai. Les directions principales sont par conséquent orientées d'un angle $\alpha = 46,8^\circ$ (contre $45,0^\circ$ dans le cas d'un

chargement en torsion pure). En effet, la section de la cornière, non circulaire, est soumise au phénomène de gauchissement, qui entraîne une déformation de la section durant le chargement en torsion. Or, la cornière est encastree à ses deux extrémités : elle n'est donc pas libre de se déformer. Par conséquent, une contrainte normale de compression apparaît dans la section.

5 – Conclusion

Ce banc de TP nous a permis de réaliser des essais en torsion pure sur des barres pleines, des tubes en acier, en aluminium et en cuivre, ainsi que sur une cornière en aluminium. De plus, nous avons mené des essais de torsion avec de la traction sur des tubes en aluminium.

Les essais en torsion nous ont permis d'identifier une loi bilinéaire pour l'évolution du moment de torsion en fonction de la rotation.

Grâce à ces mêmes essais, nous avons observé que le critère de von Mises donne une bonne estimation de la limite élastique du cuivre, tandis que pour l'acier et l'aluminium ces essais n'ont hélas pas été concluants.

Les essais en torsion avec une composante normale montrent que la traction influe sur le comportement des matériaux, en diminuant leur résistance en torsion. De plus, nous avons observé une transition moins marquée entre les états plastique et élastique par rapport à de la torsion pure.

Nous avons également remarqué au cours de l'essai en torsion pure sur la cornière l'apparition d'une contrainte normale. Cette contrainte est causée par le blocage de la déformation de la section au niveau des extrémités de la barre.

À travers ce TP, nous avons comparé deux systèmes de mesure à savoir le pont complet et la lecture de l'angle sur le banc d'essai. Nous avons constaté que le système de pont complet fournit une mesure de qualité, tandis que la lecture d'angle présente une erreur systématique.

De même, la mesure du moment réalisée grâce à une rosette à 45° a été comparée à la valeur mesurée par le cadran. De cette comparaison nous avons conclu que la rosette à 45° est un système de mesure bien plus fiable que le cadran, qui a tendance à sous-estimer la valeur du moment de torsion.

Par ailleurs, la réalisation de ce TP nous a ainsi permis d'étudier des montages électriques de jauges de déformation. Cette étude a porté sur le choix de ces montages, leur justification et les branchements nécessaires pour les réaliser.

Enfin, nous avons estimé et présenté les incertitudes sur nos mesures. Une analyse de celles-ci permettra d'identifier les systèmes de mesure les plus précis et d'améliorer le banc d'essai.

Références :

[1]: Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : présentation, B. Bodnar, 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-presentation

[2]: Étude approfondie d'un banc de torsion/traction : étude théorique, B. Bodnar, 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

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <http://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>