
Sollicitations complexes et suivi de transformation de phase

La proportionnalité entre le taux de déformation de transformation équivalente et le taux de la martensite a certes été validée dans des cas de chargements multiaxiaux proportionnels [94]. Néanmoins, elle n'a pas été validée dans le cas de chargements non proportionnels.

Dans cette section, une base d'essais expérimentaux relatifs au comportement multiaxial sous des chargements proportionnels et non proportionnels pilotés en déplacement-angle et en contrainte de l'alliage à mémoire de forme de CuAlBe est constituée. Plus précisément, ils nous permettent de valider la relation linéaire entre la déformation de transformation de phase et la fraction volumique de martensite. Par ailleurs, cette base peut être aussi utilisée pour améliorer les modèles actuels concernant le comportement superélastique des AMF. Ces essais pourront servir à alimenter et valider les modèles numériques.

Un dosage de phase a été réalisé en parallèle de ces chargements thermomécaniques. Dans ces essais, nous allons mettre en évidence l'effet superélastique relatif à ce matériau métastable lors de chargements thermomécaniques complexes.

Ainsi, dans les essais présentés ci-dessous, nous développons notre méthode de dosage de phase dans le cas de chargements proportionnels dans un premier temps puis dans des cas de figure avec des chargements non proportionnels.

3.3.1 Matériau et éprouvette

Nous avons utilisé des éprouvettes tubulaires ayant la même géométrie que les éprouvettes présentées dans la section 2.3. Elles ont un diamètre extérieur de 10 mm et un diamètre intérieur de 7 mm (Figure 3.22). Ces éprouvettes ont été réalisées par tournage à base de barreaux ronds de 20 mm de diamètre et de 120 mm de longueur, fourni par Némésis en alliage à mémoire de forme en CuAlBe polycristallin, superélastique à température ambiante.

Elles ont subi un traitement thermique avant leurs utilisations dans les essais de cette section. Elles ont été chauffées dans un four à l'air ambiant à 650 °C pendant 20 minutes puis trempées à l'eau chaude à 100 °C pendant une heure [62]. Ce traitement permet d'obtenir une taille de grains homogène [73] et de relâcher les contraintes résiduelles dues à l'usinage dans celles-ci.

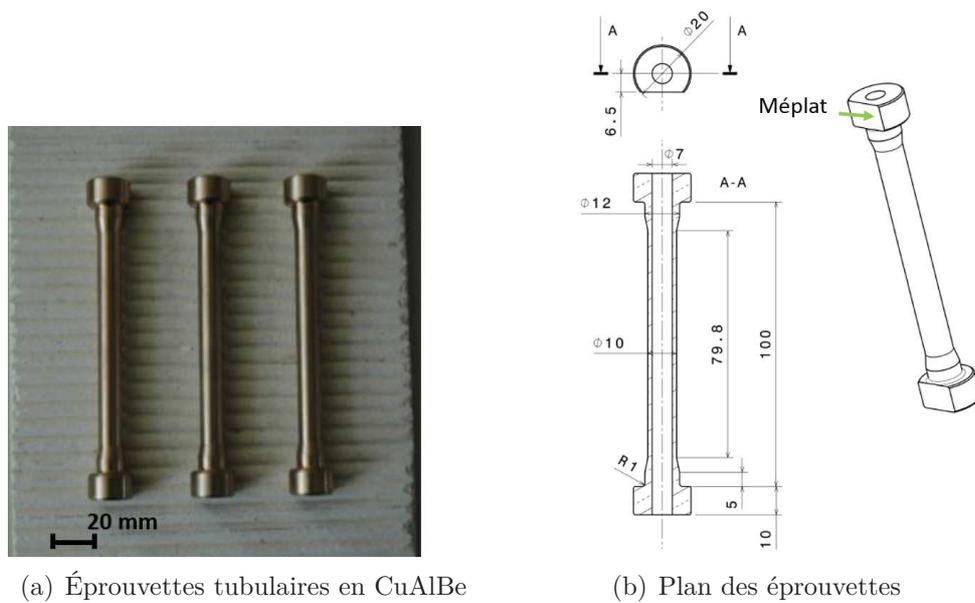


FIGURE 3.22 – Éprouvettes tubulaires de CuAlBe

3.3.2 Dispositif expérimental

Nous avons utilisé la même machine d'essai électrohydraulique asservie équipée du montage d'essai développé dans la section 2.3.

Dans une première campagne d'essais, les mesures de déformation axiale et radiale ont été réalisées avec un extensomètre biaxial de marque epsilon 3550 avec un écartement longitudinal de 22,45 mm entre ses pointes. L'alimentation de l'éprouvette avec une tension électrique traversant aussi le corps de l'extensomètre peut influencer les résultats obtenus avec la méthode de mesure par quatre points. Afin d'éviter cela, nous isolons électriquement les pointes de l'extensomètre en tungstène et le corps de l'éprouvette par du scotch.

Dans une deuxième campagne d'essais, nous avons utilisé le système Aramis GOM pour la mesure de la déformation. De cette manière, nous utilisons une méthode originale basée sur la stéréo corrélation d'images. Cette technique de mesure de champ de déformations permet de réaliser des mesures à distance des éprouvettes [38] et sans aucun contact avec celles-ci. Par ailleurs, un suivi de l'évolution de la déformation sur une grande surface est obtenu [38].

Dans les essais où nous avons utilisé le système Aramis, la mesure de la tension est synchronisée avec les mesures réalisées par celui-ci.

La température des éprouvettes a été mesurée, au cours des essais par un thermocouple de type T.

Le même système de mesure de tension par la méthode de quatre points, cité dans

la section 2.3, est utilisé pour mesurer la résistivité des éprouvettes au cours de ces essais. Dans ce système, la transmission de la tension d'entrée générée par un suiveur de fissure est faite par les cales pentées (Figure 2.22 de la page 77) qui sont en contact avec la tête de l'éprouvette. Tandis que, la mesure de la tension est faite par des cosses (Figure 3.23).

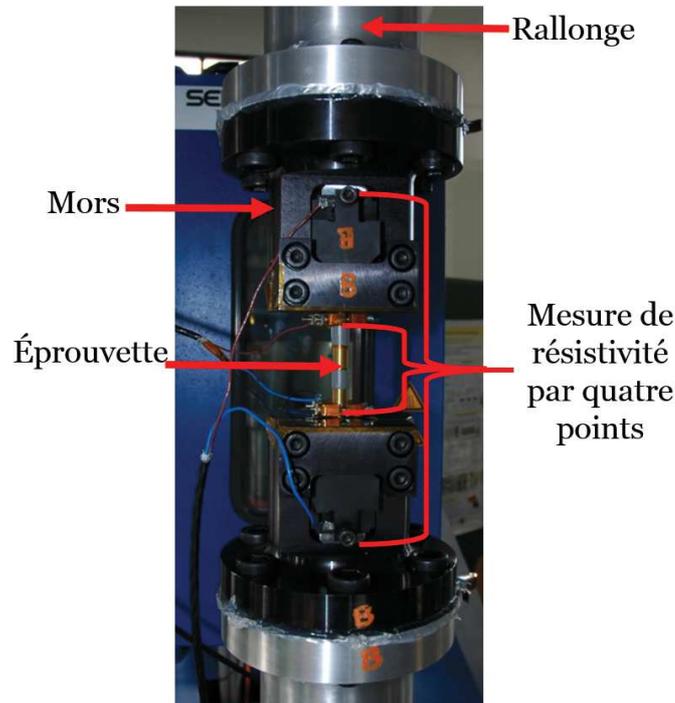


FIGURE 3.23 – Instrumentation d'une éprouvette tubulaire en CuAlBe.

L'acquisition des différentes mesures expérimentales a été effectuée par un système d'acquisition de signaux de type Nicolet. Cet appareil permet d'acquérir huit canaux distincts.

3.3.3 Exploitation des mesures de résistance électrique

Nous obtenons l'évolution du taux de martensite dans le matériau en exploitant les mesures de tension obtenues au cours des essais thermomécaniques réalisés.

Les essais sur les éprouvettes en CuAlBe sont réalisés à une température ambiante supposée constante autour de 20 °C. Par conséquent, l'effet de la température sur la résistivité de l'austénite et de la martensite est absent.

Nous pouvons écrire la résistivité totale de notre matériau en fonction des résistivités de la martensite ρ_M et de l'austénite ρ_A , en utilisant une loi de mélange en série.

$$\rho(\rho_A, \rho_M, z) = (1 - z)\rho_A + z\rho_M \quad (3.32)$$

Alors, nous obtenons la fraction volumique de martensite suivante :

$$z = \frac{\rho(T) - \rho_A(T)}{\rho_M(T) - \rho_A(T)} \quad (3.33)$$

et nous avons calculé dans la section 3.2 la résistivité en fonction de la tension U , de la section S_0 , du courant i , de la longueur initiale de l'éprouvette L_0 et de la déformation ε :

$$\rho = \frac{US_0}{iL_0(1 + \varepsilon)^2} \quad (3.34)$$

En remplaçant ρ , ρ_A et ρ_M par leurs valeurs calculées en utilisant l'équation 3.34 dans l'équation 3.33, nous obtenons :

$$z = \frac{U - U_0(1 + \varepsilon)^2}{U_M - U_0(1 + \varepsilon_f)^2} \quad (3.35)$$

Avec :

- U est la tension mesurée au cours de l'essai ;
- U_0 est la tension initiale mesurée au début de l'essai et qui est supposée être la tension relative à la résistivité de la phase austénitique ;
- U_M est la tension qu'on devait mesurer dans un état martensitique total obtenue à 6 % de déformation. C'est une tension relative à la résistivité de la martensite. Cette valeur est obtenue en extrapolant la mesure de la tension ;
- ε est la déformation axiale mesurée au cours de l'essai ;
- ε_f est la déformation axiale maximale supposée égale à 6 %.

3.3.4 Notations

La contrainte équivalente de Von Mises ne caractérise pas la contrainte de début de transformation des AMF dans le cas de chargements multiaxiaux, nous présentons ci-dessous le calcul de la contrainte équivalente des AMF.

3.3.4.1 Calcul de la contrainte équivalente σ_{eq} pour un AMF [21]

Nous calculons la contrainte équivalente de transformation ainsi que la déformation équivalente de transformation proposée par Bouvet [21]. Ce calcul est indispensable pour la réalisation de trajets de chargements thermomécaniques sur notre matériau dans cette section.

La contrainte équivalente est donnée par la relation suivante :

$$\sigma_{eq} = \bar{\sigma}g(y_\sigma) \quad (3.36)$$

Avec y_σ est le troisième invariant du tenseur de contraintes, g est une fonction permettant d'avoir une surface seuil de transformation convexe [62] et $\bar{\sigma}$ est la contrainte équivalente de Von Mises.

En effet, le comportement des AMF en traction compression est dissymétrique. La contrainte équivalente de Von Mises est insuffisante pour prendre en compte cette dissymétrie.

Pour pouvoir écrire cette relation, une hypothèse de volume constant lors de la transformation de phase est faite. Cette écriture permet par le biais de la fonction g de prendre en considération tous les cas de dissymétrie possibles entre la traction et la compression.

Cette même définition permet aussi d'englober le cas particulier de la contrainte équivalente de Von Mises avec un $y_\sigma = 1$.

Cette relation a été validée par des résultats expérimentaux [21].

Nous calculons les différents paramètres de cette relation.

D'une part, nous avons :

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} dev(\boldsymbol{\sigma}) : dev(\boldsymbol{\sigma})} \quad (3.37)$$

Tel que

$$dev(\boldsymbol{\sigma}) = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3} trace(\boldsymbol{\sigma}) \mathbf{I} \quad (3.38)$$

Dans un cas de traction torsion, le tenseur des contraintes s'écrit ainsi :

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & \tau_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{13} & 0 & 0 \end{pmatrix}_{(\vec{x}, \vec{e}_r, \vec{e}_\theta)} \quad (3.39)$$

De l'équation 3.38 et de l'équation 3.39, on trouve l'équation suivante :

$$dev(\boldsymbol{\sigma}) = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & 0 & \tau_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \tau_{13} & 0 & 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{11}}{3} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sigma_{11}}{3} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\sigma_{11}}{3} \end{pmatrix} \quad (3.40)$$

Alors

$$dev(\boldsymbol{\sigma}) = \begin{pmatrix} \frac{2}{3}\sigma_{11} & 0 & \tau_{13} \\ 0 & -\frac{\sigma_{11}}{3} & 0 \\ \tau_{13} & 0 & -\frac{\sigma_{11}}{3} \end{pmatrix} \quad (3.41)$$

Alors

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{3}{2} \left(\frac{4}{9}\sigma_{11}^2 + 2\tau_{13}^2 + \frac{2}{9}\sigma_{11}^2 \right)} \quad (3.42)$$

Donc

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + 3\tau_{13}^2} \quad (3.43)$$

D'autre part, nous avons y_σ le troisième invariant du tenseur des contraintes qui vaut

$$y_\sigma = \frac{27 \det(dev(\boldsymbol{\sigma}))}{2 \bar{\sigma}^3} \quad (3.44)$$

De l'équation 3.41, on calcule :

$$\det(dev(\boldsymbol{\sigma})) = \frac{2}{27}\sigma_{11}^3 + \frac{1}{3}\sigma_{11}\tau_{13}^2 \quad (3.45)$$

En remplaçant par les équations 3.43 et 3.45 dans 3.44, on obtient :

$$y_\sigma = \frac{\sigma_{11}^3 + \frac{9}{2}\sigma_{11}\tau_{13}^2}{(\sigma_{11}^2 + 3\tau_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (3.46)$$

Nous avons la fonction de dissymétrie définie par Bouvet et. al. [22]

$$g(y_\sigma) = \cos \left(\frac{\cos^{-1}(1 - a(1 - y_\sigma))}{3} \right) \quad (3.47)$$

Cette fonction permet de prendre en compte la dissymétrie existante entre le comportement des AMF en traction et en compression [38, 48]. Ainsi, nous calculons le coefficient de dissymétrie a pour le prendre en considération dans le calcul de la contrainte équivalente AMF.

Ainsi, nous trouvons la contrainte équivalente suivante

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_{11}^2 + 3\tau_{13}^2} \cos \left(\frac{\cos^{-1} \left(1 - a \left(1 - \frac{\sigma_{11}^3 + \frac{9}{2}\sigma_{11}\tau_{13}^2}{(\sigma_{11}^2 + 3\tau_{13}^2)^{\frac{3}{2}}} \right) \right)}{3} \right) \quad (3.48)$$

Ainsi, nous déduisons la contrainte équivalente σ_{eq} pour les AMF. Aussi, nous calculons, la déformation équivalente de transformation pour les AMF.

3.3.4.2 Calcul de la déformation équivalente de transformation

La déformation de transformation équivalente est définie par Bouvet et. al. [22] en se basant sur l'égalité entre la puissance de transformation et la puissance de transformation équivalente.

$$\boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}} = \sigma_{eq} \varepsilon_{eq}^{\text{tr}} \quad (3.49)$$

Ainsi, l'expression de $\varepsilon_{eq}^{\text{tr}}$ est ,

$$\varepsilon_{eq}^{\text{tr}} = \bar{\varepsilon}^{\text{tr}} \frac{g(-y_{\varepsilon}^{\text{tr}})}{g(-1)} \quad (3.50)$$

Tel que g la fonction de dissymétrie.

$$g(y) = \cos \left(\frac{\cos^{-1}(1 - a(1 - y))}{3} \right) \quad (3.51)$$

Nous avons,

$$y_{\varepsilon}^{\text{tr}} = 4 \frac{\det(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}})}{\bar{\varepsilon}^{\text{tr}3}} \quad (3.52)$$

et

$$\bar{\varepsilon}^{\text{tr}} = \sqrt{\frac{2}{3} \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}} : \boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}}} \quad (3.53)$$

Le tenseur de la déformation de transformation est calculé ainsi :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}} = \boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_e \quad (3.54)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & 0 & \frac{\gamma_{13}}{2} \\ 0 & b & 0 \\ \frac{\gamma_{13}}{2} & 0 & b \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 & \frac{\tau_{13}}{2G} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{\tau_{13}}{2G} & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (3.55)$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 & \frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} \\ 0 & b & 0 \\ \frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} & 0 & b \end{pmatrix} \quad (3.56)$$

La transformation de phase se fait avec une très faible variation de volume inférieur à 0,3%, ce qui nous permet d'écrire,

$$\text{trace}(\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{tr}}) = 0 \quad (3.57)$$

Alors

$$trace(\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}) = 2b + \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right) = 0 \quad (3.58)$$

On en déduit que

$$b = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right) \quad (3.59)$$

En remplaçant b par sa valeur dans la matrice de déformation équivalente de transformation, on obtient la matrice suivante :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} & 0 & \frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} \\ 0 & \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E}) & 0 \\ \frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} & 0 & \frac{1}{2}(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E}) \end{pmatrix} \quad (3.60)$$

Donc :

$$\bar{\varepsilon}^{tr} = \sqrt{\frac{2}{3} \left(\left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right)^2 + 2 \left(\frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} \right)^2 + 2 \left(\frac{1}{2} \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right) \right)^2 \right)} \quad (3.61)$$

Alors

$$\bar{\varepsilon}^{tr} = \sqrt{\left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\gamma_{13} - \frac{\tau_{13}}{G} \right)^2} \quad (3.62)$$

$$det(\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}) = \frac{1}{2} \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right) \left(\frac{1}{2} \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right)^2 - \left(\frac{\gamma_{13}}{2} - \frac{\tau_{13}}{2G} \right)^2 \right) \quad (3.63)$$

$$\Rightarrow det(\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}) = \frac{1}{4} \left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right) \left(\left(\varepsilon_{11} - \frac{\sigma_{11}}{E} \right)^2 - \frac{1}{2} \left(\gamma_{13} - \frac{\tau_{13}}{G} \right)^2 \right) \quad (3.64)$$

Ainsi, en remplaçant chaque variable par sa valeur dans l'équation 3.50, nous obtenons le calcul de la déformation de transformation équivalente de transformation.

$$\varepsilon_{eq}^{tr} = \sqrt{\varepsilon^{tr2} + \frac{4}{3}\gamma^{tr2}} \frac{\cos \left(\frac{\cos^{-1} \left(1 - a \left(1 + \frac{2\varepsilon^{tr} \left(\frac{1}{2}\varepsilon^{tr2} - \gamma^{tr2} \right)}{\left(\varepsilon^{tr2} + \frac{4}{3}\gamma^{tr2} \right)^{\frac{3}{2}}} \right) \right)}{3} \right)}{\cos \left(\frac{\cos^{-1} (1 - 2a)}{3} \right)} \quad (3.65)$$

Après proposition d'une technique de dosage de phase, une campagne d'essais multiaxiaux sur éprouvettes tubulaires en CuAlBe est réalisée afin de valider la relation de linéarité entre le taux de fraction volumique de martensite et la déformation de

transformation équivalente dans des chargements multiaxiaux.

Dans la partie suivante, les différents chargements thermomécaniques réalisés dans le cas des éprouvettes tubulaires de cette étude sont présentés. Les différents résultats d'essais ainsi que les conclusions qui en découlent sont exposés.

3.3.5 Résultats expérimentaux

Dans cette étude, le matériau est totalement austénitique ; la température à laquelle les essais sont réalisés est de 20 °C. Cette température demeure supérieure à celle de fin de transformation austénitique A_f de ce matériau.

Le suivi de l'évolution de la transformation de phase dans l'alliage étudié nécessite la connaissance de plusieurs paramètres expérimentaux. En effet, la connaissance de la déformation, de la contrainte et de la tension électrique permettra d'aboutir au dosage de phase de notre matériau. Ainsi, pour caractériser le comportement et la cinétique de transformation de phase de ce type de matériaux, plusieurs essais thermomécaniques sont à réaliser.

Le dépouillement des résultats des essais réalisés offre les informations indispensables à la compréhension de l'influence du type de chargement sur le comportement et la transformation de phase dans le matériau testé.

La réalisation d'essais thermomécaniques multiaxiaux permet de comprendre et de caractériser la transformation de phase dans le cas des éprouvettes tubulaires sous des chargements complexes.

Nous avons réalisé des essais de traction-torsion proportionnels et non proportionnels sur des éprouvettes en alliage à mémoire de forme CuAlBe.

Le protocole de préparation et de réalisation des essais de cette section respecte les mêmes opérations mentionnées dans la section 2.3 à l'exception de l'opération de refroidissement vu que les essais de cette section sont réalisés à température ambiante.

Après montage de l'éprouvette en CuAlBe de la même façon que les éprouvettes en acier 304L mentionnée dans le chapitre 2.3, cette dernière est instrumentée. Nous plaçons un thermocouple de type T pour la mesure de la température de l'éprouvette.

Les cosses de mesure de tension sont placées des deux côtés autour de l'éprouvette afin de réaliser correctement la mesure de la résistance électrique (Figure 3.23). Cette tension électrique mesurée est exploitée suivant la démarche expliquée précédemment pour aboutir au dosage de phase. Dans les essais de cette section, nous utilisons la notation de la déformation équivalente de cisaillement au sens des AMF γ_{eq} , ainsi que pour la contrainte équivalente au sens des AMF, τ_{eq} .

3.3.5.1 Identification des températures de transformation de phase par DSC

Nous avons déterminé les températures de transformation de notre matériau par une mesure de DSC.

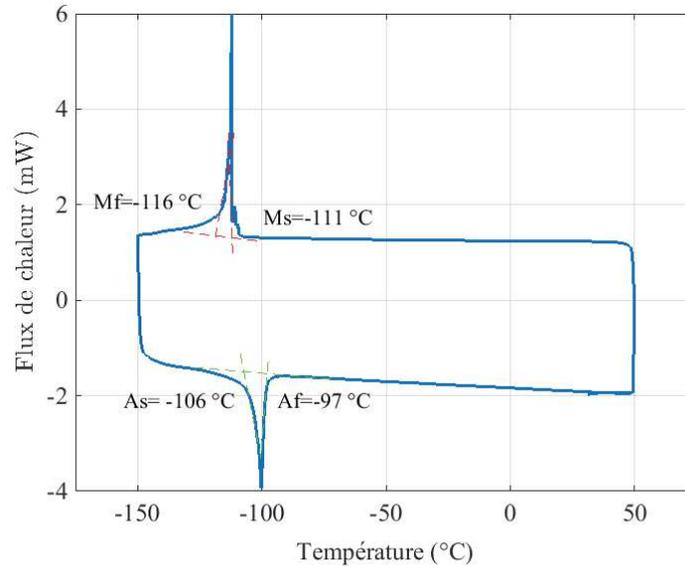


FIGURE 3.24 – Détermination de la température de transformation par DSC

Cette détermination nécessite de préparer l'échantillon et de l'encapsuler. Un morceau d'éprouvette est découpé avec électroérosion. Il est mis ensuite dans une capsule puis introduit dans la DSC. Pour notre matériau, la mesure par DSC a été réalisée avec une vitesse de variation de la température de $5\text{ °C}\cdot\text{min}^{-1}$. D'abord, avec un chauffage de l'échantillon à une température de 50 °C pour le mettre dans un état austénitique. Ensuite, un refroidissement jusqu'à une température de -150 °C est appliqué. Enfin, un chauffage à température ambiante est exercé sur l'échantillon. Cette opération permet, par conséquent, d'obtenir les températures de transformation de phase résumées dans le tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Températures de transformation des éprouvettes tubulaires en CuAlBe.

Température de transformation	M_s	M_f	A_s	A_f
Valeur (°C)	-111	-116	-106	-97

D'après la mesure par DSC, les températures de début de transformation de phase martensitique sont très basses dans notre matériau. Aussi, nous ne pouvons pas atteindre ces températures avec l'enceinte thermique dont nous disposons. Cela a rendu impossible la mise en évidence de l'effet mémoire assisté dans le matériau étudié, ainsi que la mesure de la résistivité de la martensite.

Après détermination des températures de transformation, nous avons réalisé des essais proportionnels et non proportionnels.

3.3.5.2 Essai de traction-compression

Ce chargement mécanique de traction-compression est piloté en déformation-couple. Du côté vérin de traction, nous avons imposé une déformation de 1% à atteindre tandis que nous avons imposé au vérin de torsion de garder un couple nul. La vitesse de chargement a été de $0,001 \text{ mm.s}^{-1}$. Une mesure de la variation de la tension électrique a été réalisée au cours de cet essai.

La réponse dans le plan (ε, σ) de cet essai est présentée sur la figure 3.25.

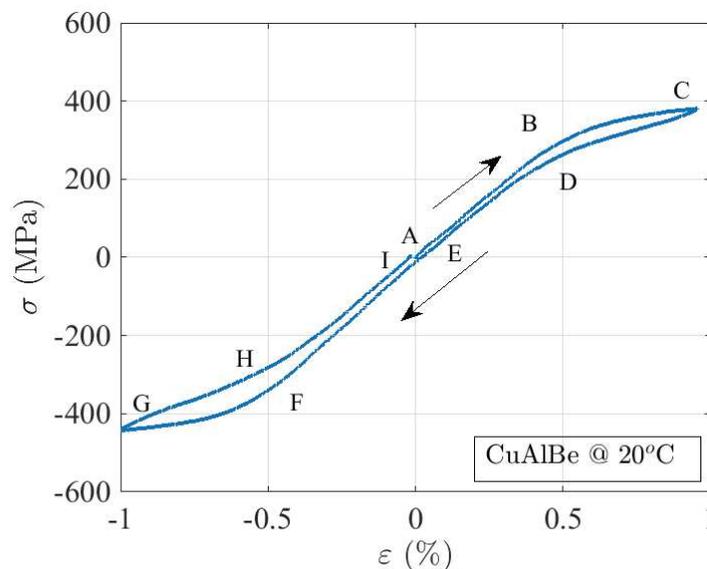


FIGURE 3.25 – Essai de traction-compression.

Nous déterminons lors de l'essai de traction un module de Young de 73000 MPa pour ce matériau.

Étant donné que notre AMF est superélastique à température ambiante, le comportement superélastique de ce matériau est mis en évidence à température ambiante lors de cet essai de traction-compression.

Pendant la charge en traction (A-B), nous remarquons que le comportement de l'éprouvette en traction est élastique. Cette élasticité est relative à la déformation élastique de la phase austénitique. Le début de la transformation de phase coïncide avec une variation de la pente du comportement du matériau [38] (B-C). Cette partie caractérise le début de la transformation de phase et l'apparition de la phase martensitique dans l'éprouvette. Durant, la décharge, après dépassement du point C caractérisant le début de la transformation inverse, la martensite formée pendant la charge diminue

et le comportement de l'éprouvette redevient élastique, cette élasticité qui a la même pente que celle obtenue lors de la charge et qui est propre à la phase austénitique. Une déformation résiduelle négligeable subsiste dans le matériau et qui peut être due à de la martensite bloquée [84].

Durant la compression, nous retrouvons qualitativement la même courbe obtenue en traction. D'abord, une partie où l'austénite se déforme élastiquement entre les points E et F. Ensuite, un point d'inflexion où l'austénite commence à se transformer en martensite (F-G). Ensuite, la déformation inverse de la martensite en austénite entre les points G et H et enfin la décharge élastique de l'austénite jusqu'à atteindre un niveau de déformation résiduelle qui subsiste à la fin de l'essai au point I. Cette déformation résiduelle est causée par de la martensite bloquée [73, 84].

Nous remarquons une dissymétrie au niveau du comportement de notre matériau en traction-compression sur la figure 3.26. Afin de prendre en compte cette dissymétrie, la fonction g , définie précédemment, intègre un coefficient de dissymétrie a .

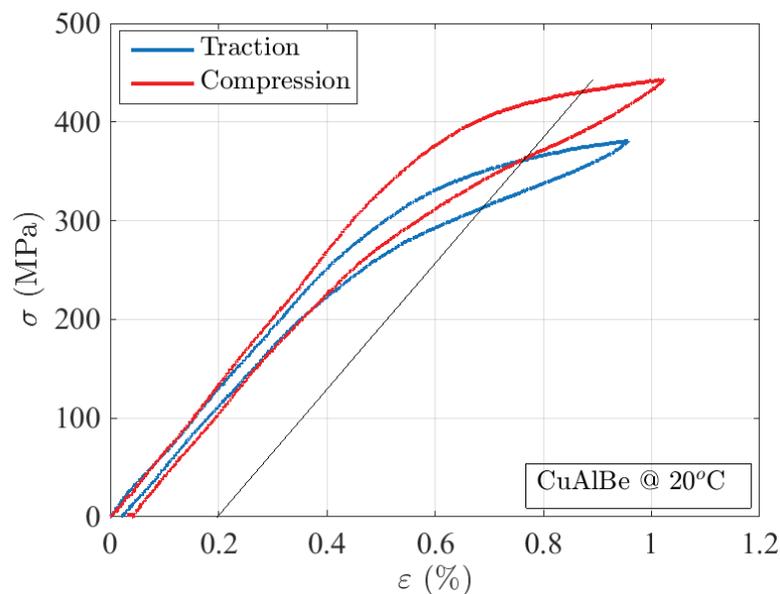


FIGURE 3.26 – Dissymétrie entre la traction et la compression.

La détermination du coefficient de dissymétrie a , en exploitant le résultat de cet essai, nous permet de programmer des trajets de chargement en torsion.

Le coefficient de dissymétrie a peut-être déterminé de deux manières. On peut le calculer à partir d'un essai de traction-compression ou par le biais d'un essai de traction et un essai de torsion.

Pour le cas de la traction-compression, on calcule le coefficient de dissymétrie a à partir des limites de transformation directe en traction σ_0^t et en compression σ_0^c .

Pour un essai de traction, l'équation 3.36 devient,

$$\sigma_{eq}^{trac} = \sigma_0^t g(1) = \sigma_0^t$$

et pour un essai de compression, l'équation 3.36 devient,

$$\sigma_{eq}^{comp} = \sigma_0^c g(-1) \text{ avec } g(-1) = \cos\left(\frac{\cos^{-1}(1-2a)}{3}\right)$$

À partir de ces deux relations, et en se basant sur l'égalité des contraintes équivalentes au début de la transformation en traction et en compression, nous trouvons :

$$\cos\left(\frac{\cos^{-1}(1-2a)}{3}\right) = \frac{\sigma_0^t}{\sigma_0^c} \quad (3.66)$$

Alors :

$$\frac{\cos^{-1}(1-2a)}{3} = \cos^{-1}\left(\frac{\sigma_0^t}{\sigma_0^c}\right) \quad (3.67)$$

Donc :

$$1-2a = \cos\left(3\cos^{-1}\left(\frac{\sigma_0^t}{\sigma_0^c}\right)\right) \quad (3.68)$$

On en déduit que :

$$a = \frac{1}{2} \left(1 - \cos\left(3\cos^{-1}\left(\frac{\sigma_0^t}{\sigma_0^c}\right)\right)\right) \quad (3.69)$$

$$a = \frac{1}{2} \left[1 - \cos\left(3\arccos\left(\frac{\sigma_0^t}{\sigma_0^c}\right)\right)\right] \quad (3.70)$$

Pour ce faire nous déterminons les valeurs de la contrainte de début de transformation en traction à $\sigma_0^t = 365$ MPa et la contrainte de début de transformation en compression à $\sigma_0^c = 430$ MPa pour un offset de déformation de 0.2 %.

Ainsi nous trouvons un coefficient de dissymétrie $a = 0,55$.

Après calcul du coefficient de dissymétrie a , nous pouvons calculer la déformation de transformation équivalente ε_{eq}^{tr} et obtenir l'évolution de la fraction volumique de martensite z en fonction de cette dernière.

La courbe de la tension corrigée ΔU_c sur la figure 3.27 montre une coïncidence entre l'apparition du comportement superélastique du matériau et l'augmentation de la tension électrique. Cette augmentation s'explique par le début de la transformation de phase dans l'éprouvette testée. La mesure d'une tension corrigée négative lors de la phase de compression est due probablement à un décalage des cosses de mesure de la tension électrique de leurs positions initiales.

En effet, la déformation de l'éprouvette reste élastique au début de l'essai vu que le matériau est austénitique. La variation de la tension ΔU_c durant la partie élastique est presque nulle confirmant une absence de la transformation de phase dans le matériau étudié. Un changement de la pente de la courbe marque le début de la transformation de phase. Ainsi, l'augmentation de la tension ΔU_c , ayant lieu après la partie élastique du comportement du matériau, indique la présence d'une transformation de phase [27].

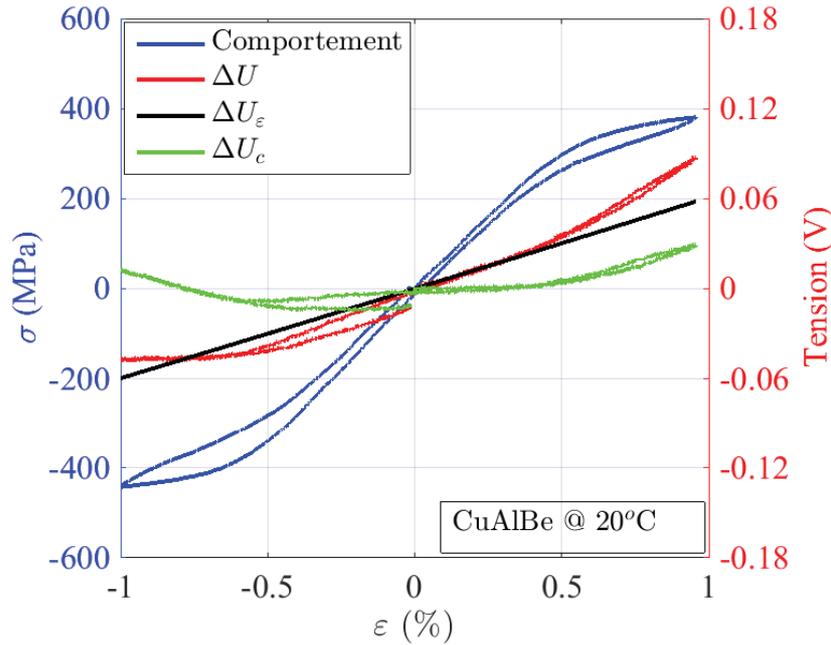


FIGURE 3.27 – Essai de traction-compression avec mesure de tension

Nous parvenons, avec cette technique de mesure, à bien suivre la transformation de phase dans notre matériau lors de cet essai.

Nous réalisons, à partir de la tension mesurée, un dosage de phase illustrant l'évolution de la transformation de phase dans ce matériau au cours d'un essai de traction compression. La figure 3.28 illustre une évolution presque linéaire de la fraction volumique de martensite en fonction de la déformation équivalente de transformation lors de la phase de traction pendant la charge et la décharge. Toutefois, le problème de mesure de la tension électrique est à l'origine du décalage du dosage de phase en compression. Malgré cela, nous observons, aussi, que l'évolution de la courbe durant la phase de compression reste toujours linéaire en fonction de la déformation de transformation. Ainsi, nous validons dans ce cas de chargement, la linéarité entre z et ε_{eq}^{tr} .

3.3.5.3 Essai de traction cyclique

Cet essai consiste à appliquer sur l'éprouvette étudiée des charges et des décharges en contrainte avec des valeurs maximales progressives. Après chaque décharge, le niveau de contrainte finale est augmenté jusqu'à rupture de l'éprouvette.

La figure 3.29 montre le niveau de contrainte programmé après chaque cycle.

La courbe contrainte-déformation et celles des tensions sont présentées sur la figure 3.30. Ces courbes montrent que le matériau, austénitique au début des chargements, commence à se transformer à partir d'une contrainte seuil.

Aussi, le matériau mémorise le point de déformation et de contrainte maximales du

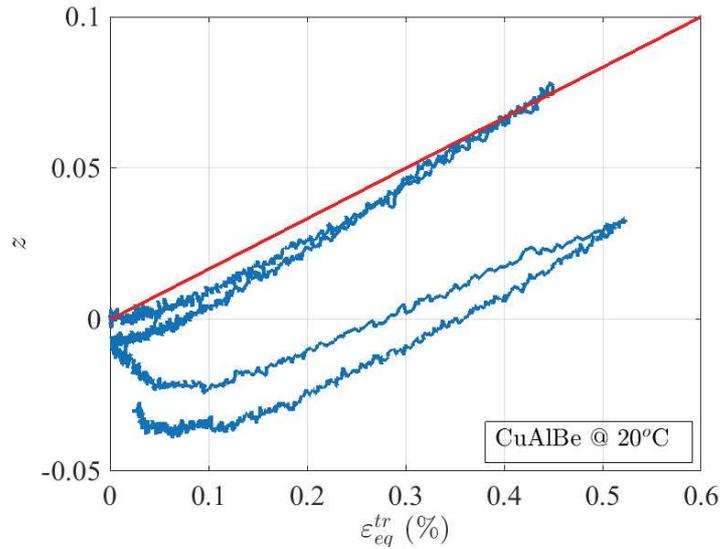


FIGURE 3.28 – Évolution de la fraction volumique z en fonction de la déformation de transformation au cours d'un essai de traction-compression.

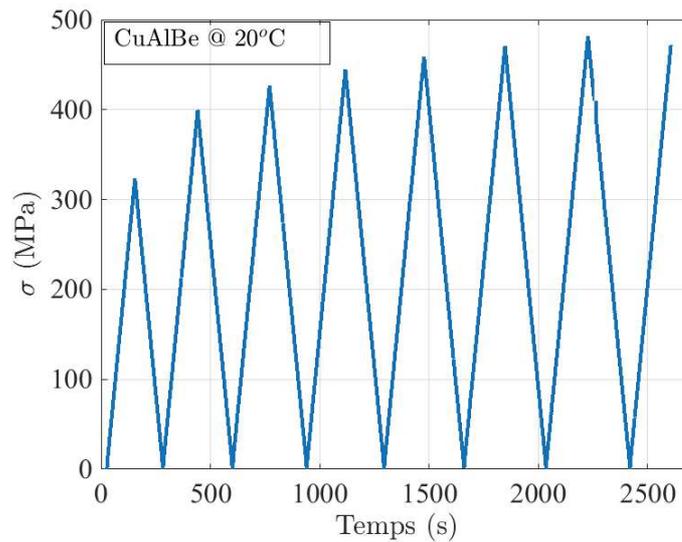


FIGURE 3.29 – Niveau de chargement en contrainte pour un essai de traction cyclique.

chargement précédent ; les courbes passent toujours par le niveau de déformation et de contrainte maximale du cycle précédent [84].

Cet essai montre l'effet du cyclage sur le comportement superélastique (Figure 3.30). Nous remarquons que la déformation résiduelle s'accumule avec l'augmentation du niveau de contrainte maximale atteint. Ce phénomène détériore, à un certain niveau de déformation, le comportement pseudoélastique du matériau [72].

Nous obtenons la courbe de dosage de phase (Figure 3.31) en exploitant la technique de dosage de phase présentée précédemment. Nous observons que la fraction volumique de martensite augmente avec le niveau de déformation atteint. Par ailleurs, les chargements

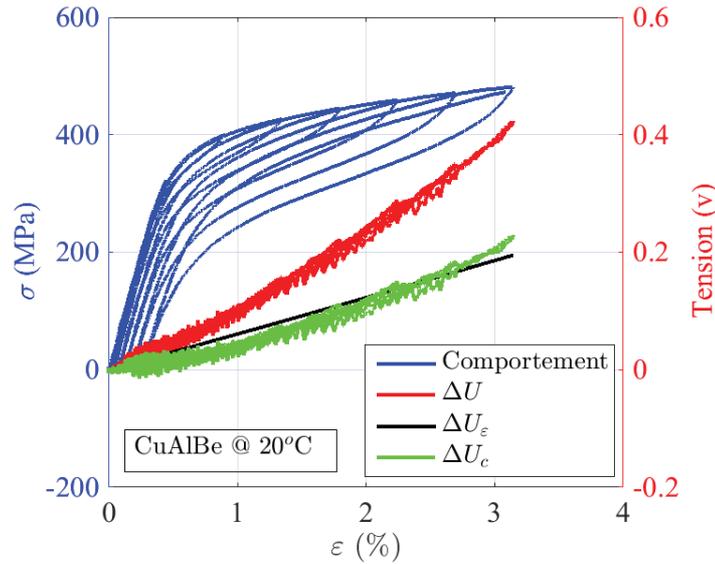
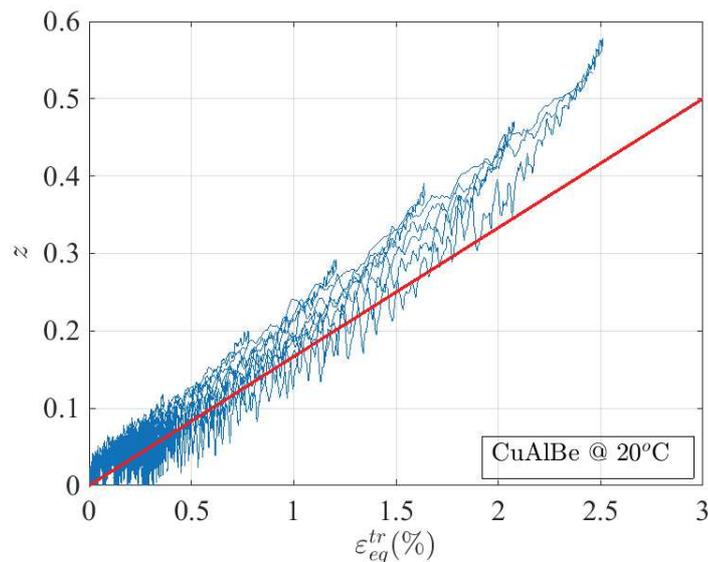


FIGURE 3.30 – Essai de traction cyclique sur éprouvette tubulaire en CuAlBe.

FIGURE 3.31 – Évolution de la fraction volumique de martensite z en fonction de la déformation de transformation lors d'un essai de traction cyclique.

cycliques n'influencent pas la relation de linéarité entre le taux de martensite formé et la déformation de transformation équivalente.

Un niveau de transformation de $z = 0,6$ est atteint à une déformation de transformation équivalente de $2,5\%$. La proportionnalité entre ces deux variables est vérifiée sur la globalité du chargement. Toutefois, un léger décollement à la fin de chaque cycle est observé et qui peut venir des paramètres de calcul de la déformation de transformation équivalente. Par exemple, la valeur du module de Young peut varier à cause de la présence de la martensite bloquée. Lors de nos calculs, nous considérons le module de

Young obtenue dans le premier cycle de charge.

3.3.5.4 Essai de torsion

Pour déterminer l'influence de la torsion sur la transformation de phase dans notre matériau, un essai de torsion est réalisé à température ambiante. Cela, après détermination de la contrainte de début de transformation de phase en torsion en se basant sur la valeur du coefficient de dissymétrie a calculé à partir de l'essai de traction-compression précédent. Nous procéderons, ainsi, dans cet essai à une vérification de ce coefficient de dissymétrie.

Dans cet essai de torsion, nous avons réalisé une charge en torsion dans les deux sens avec un pilotage en angle variable et en effort nul (Figure 3.32). D'un côté, nous imposons au vérin rotatif d'atteindre un angle, d'un autre, nous imposons au vérin linéaire de garder un effort constant et nul. Durant la décharge finale, une contrainte nulle en traction et torsion ont été mise en consignes.

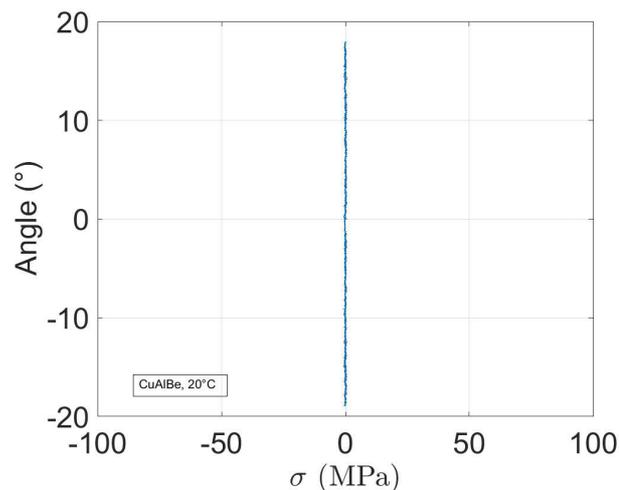


FIGURE 3.32 – Pilotage d'un essai de torsion en angle variable et en contrainte de traction nulle.

Le comportement de notre éprouvette en torsion est présenté sur la figure 3.33. Nous notons, comme dans l'essai de traction que le comportement du matériau est élastique dans la première partie (A-B). Cette élasticité est due à la déformation élastique de la phase austénitique dans le matériau. L'apparition de la phase de martensite est illustrée par le début du changement de la pente du comportement du matériau (B-C). Lors du début de la décharge, la transformation inverse est produite dans cette éprouvette (C-D). Le comportement de l'éprouvette redevient élastique après la fin de la transformation inverse de la martensite en austénite (D-E). Nous chargeons, par la

suite, l'éprouvette en torsion dans le sens opposé (E-I). Nous remarquons, le même comportement superélastique de l'éprouvette.

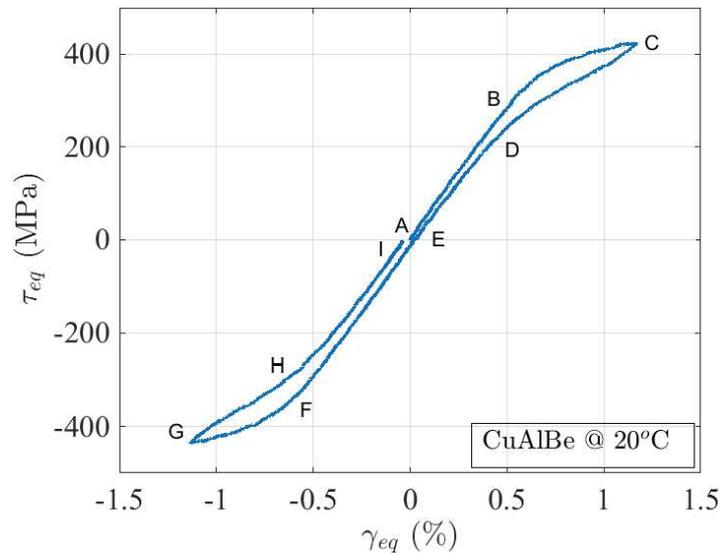


FIGURE 3.33 – Présentation d'un essai de torsion dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq})

Sur la figure de torsion 3.34, nous ne remarquons pas la même dissymétrie observée dans l'essai de traction-compression. Le comportement du matériau est presque le même dans les deux sens de torsion. Nous remarquons, dans le cas de la torsion, une presque absence de dissymétrie.

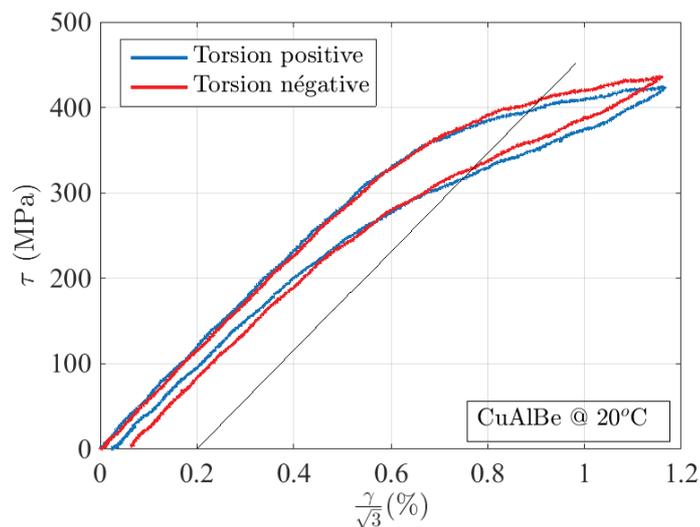


FIGURE 3.34 – Présentation de la dissymétrie pour un essai de torsion.

Nous calculons aussi, le coefficient de dissymétrie en nous basant sur ce résultat et le résultat de l'essai de traction-compression cité précédemment.

Pour un essai de traction, l'équation 3.36 devient,

$$\sigma_{eq}^{trac} = \sigma_0^t g(1) = \sigma_0^t \quad (3.71)$$

et pour un essai de torsion pur, l'équation 3.36 devient,

$$\sigma_{eq}^{tor} = \tau_0^0 g(0) \quad (3.72)$$

Avec τ_0^0 est la contrainte seuil de transformation de phase en torsion.

et

$$g(0) = \cos \left(\frac{\cos^{-1}(1-a)}{3} \right) \quad (3.73)$$

À partir de ces deux relations, et en se basant sur l'égalité des contraintes équivalentes au début de la transformation en traction et en torsion, nous trouvons :

$$\cos \left(\frac{\cos^{-1}(1-a)}{3} \right) = \frac{\sigma_0^t}{\sqrt{3}\tau_0} \quad (3.74)$$

Alors :

$$\frac{\cos^{-1}(1-a)}{3} = \cos^{-1} \left(\frac{\sigma_0^t}{\sqrt{3}\tau_0} \right) \quad (3.75)$$

Donc :

$$1-a = \cos \left(3 \cos^{-1} \left(\frac{\sigma_0^t}{\sqrt{3}\tau_0} \right) \right) \quad (3.76)$$

On en déduit que :

$$a = 1 - \cos \left(3 \cos^{-1} \left(\frac{\sigma_0^t}{\sqrt{3}\tau_0} \right) \right) \quad (3.77)$$

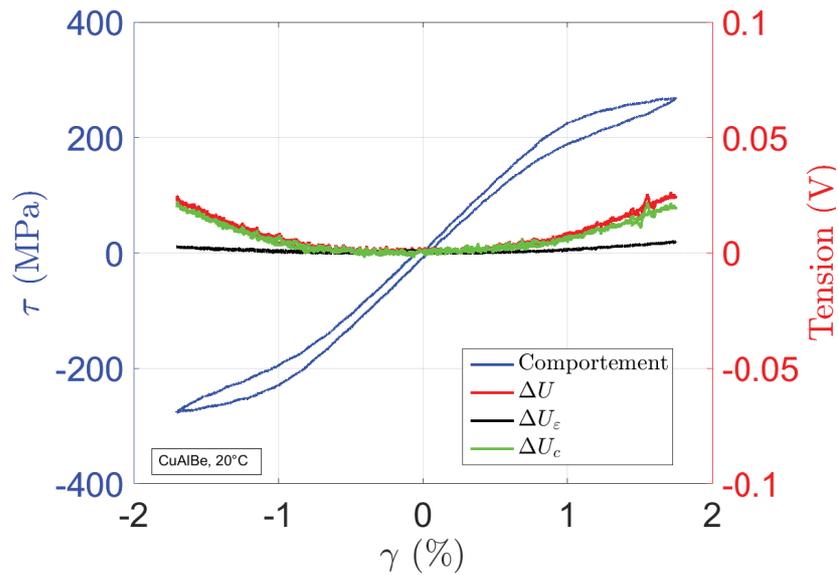
En utilisant les contraintes de début de transformation en traction $\sigma_0^t = 365$ MPa et en torsion $\sqrt{3}\tau_0 = 397$ MPa déterminées à un offset de 0,2%, nous trouvons un coefficient de dissymétrie $a = 0,65$.

En comparant ce facteur avec le facteur de dissymétrie en traction-compression de 0,55, une différence existe. Elle peut venir d'une faible anisotropie dans le matériau.

Nous utilisons dans le reste de dépouillement une valeur du facteur de dissymétrie $a = 0.6$.

La mesure de la tension au cours de l'essai nous permet d'obtenir les courbes suivantes (Figure 3.35).

Nous réalisons le même post-traitement expliqué précédemment à partir de la tension mesurée pour obtenir l'évolution de la fraction volumique de la martensite. De cette manière, nous obtenons, l'évolution de la fraction volumique de martensite en fonction de la déformation équivalente de transformation (Figure 3.36). Cette variation reste linéaire, malgré que la pente de l'évolution de z soit légèrement inférieure à la pente

FIGURE 3.35 – Présentation d'un essai de torsion dans le plan (γ, τ)

estimée. Cela peut s'expliquer par l'apparition d'autres variantes de martensite en torsion. En somme, la relation de linéarité entre la déformation de transformation et la fraction volumique de martensite est validée dans cet essai malgré la différence de la pente observée.

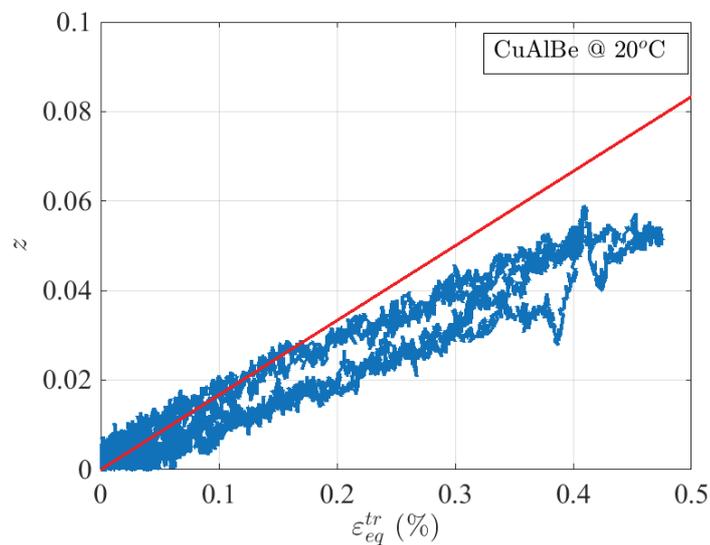


FIGURE 3.36 – Dosage de phase dans un essai de torsion.

Nous avons démontré l'influence de la nature du chargement uniaxial sur la transformation de phase dans notre matériau, pour la traction ou de la torsion un suivi de la transformation est réalisé. L'essai de traction et de traction cyclique montrent une coïncidence entre le comportement superélastique et la transformation de phase. De

même, l'essai de torsion confirme cette observation. Dans ce cas, nous avons réalisé séparément des essais dans deux directions de contraintes différentes. Cela fournit quelques paramètres pour simuler des trajets de chargements simples. Nous avons aussi vérifié la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite et la déformation de transformation équivalente.

Après réalisation des essais uniaxiaux, nous étudions l'influence du type de chargement multiaxial sur la transformation de phase martensitique. Plus particulièrement, la combinaison des deux types de chargements uniaxiaux précédents. D'abord, dans des chargements proportionnels puis dans des chargements non proportionnels.

3.3.5.5 Essais proportionnels

Nous réalisons des chargements proportionnels en combinant la traction et la torsion pour caractériser leur influence sur le comportement et la transformation de phase arrivant dans le matériau. Nous commençons par un trajet proportionnel simple afin de voir comment est le comportement de la transformation de phase dans le matériau.

3.3.5.5.1 Essai de traction-torsion proportionnel

La vitesse de torsion a été calculée pour avoir la même vitesse dans le plan de contraintes équivalentes. Dans cet essai, nous avons chargé l'éprouvette dans le plan de contraintes équivalentes à 45 %. Nous avons piloté cet essai en déplacement et en angle (Figure 3.37(a)) après les avoir estimés à partir des contraintes de traction et de torsion équivalentes voulues.

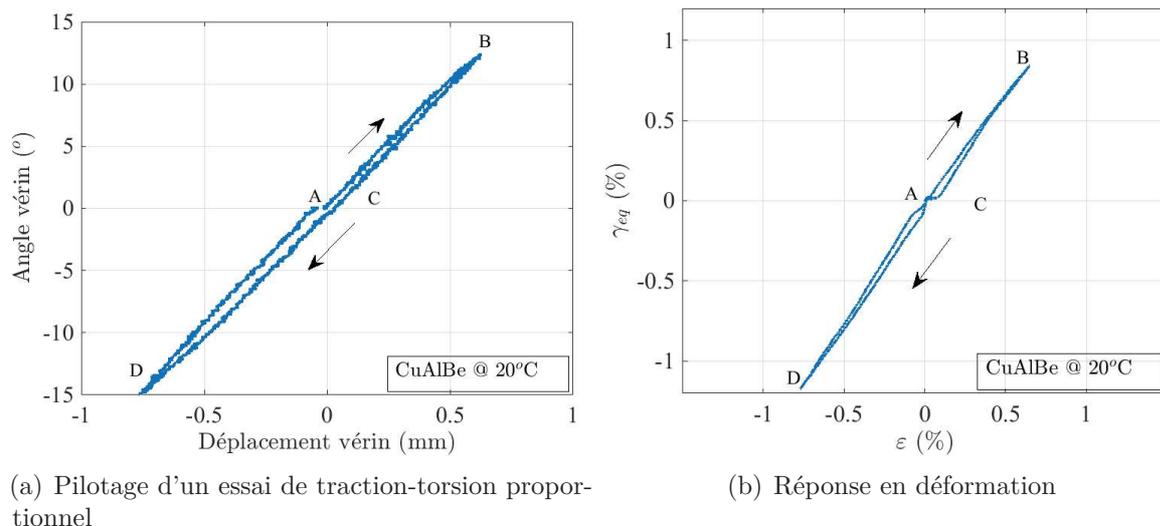


FIGURE 3.37 – Essai de traction-torsion proportionnel

La figure 3.37(b) présente la réponse de cet essai dans le plan des déformations.

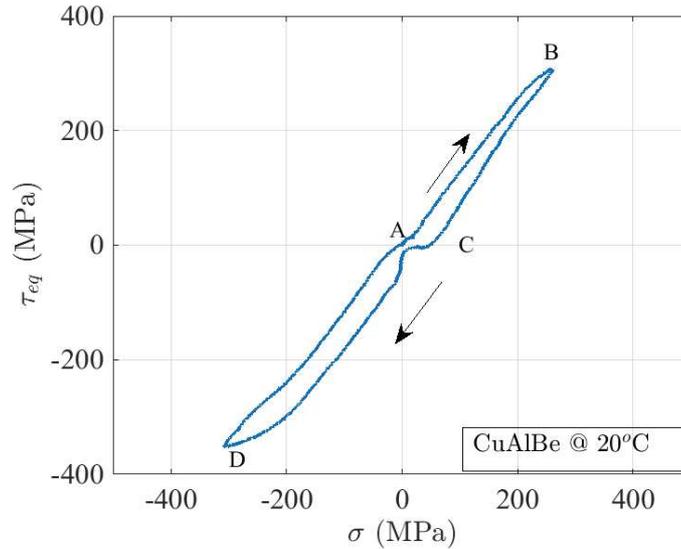


FIGURE 3.38 – Réponse en contrainte d'un essai de traction-torsion proportionnel.

La figure 3.38 illustre la réponse dans de cet essai dans le plan (τ_{eq}, σ)

Nous remarquons sur les deux figures 3.39(a) et 3.39(b), dans la première phase de l'essai que le comportement du matériau est élastique dans les deux directions de chargement. Ce comportement caractérise l'élasticité de l'austénite. Un changement de la pente caractérisant le comportement superélastique de notre alliage est le signe d'une transformation de phase qui se produit en traction et en torsion. Lors de la décharge, la transformation inverse se produit dans les deux sens. Arrivant à une contrainte équivalente nulle, le chargement en compression et en torsion dans un sens opposé au premier est opéré. Les mêmes observations relevées dans la première partie du trajet de chargement sont relevées dans ce sens.

Donc, nous concluons que le chargement proportionnel permet d'illustrer une transformation de phase qui se produit en traction-torsion et en compression-torsion.

Dans cet essai de traction-torsion proportionnel, le couplage de la traction et de la torsion crée une transformation de phase dans le matériau.

Nous avons mesuré la tension électrique de l'éprouvette au cours de l'essai. On en déduit la courbe de dosage de phase (Figure 3.40).

Nous mettons en évidence, l'influence du chargement proportionnel sur la transformation de phase dans notre alliage. Nous observons que l'évolution de la transformation de phase en fonction de la déformation équivalente de transformation est globalement linéaire. Cela confirme les résultats déjà obtenus [26]. Alors, nous nous sommes penchés sur la vérification de cette même relation dans d'autres chargements multiaxiaux non proportionnels qui manquent de résultats dans la littérature.

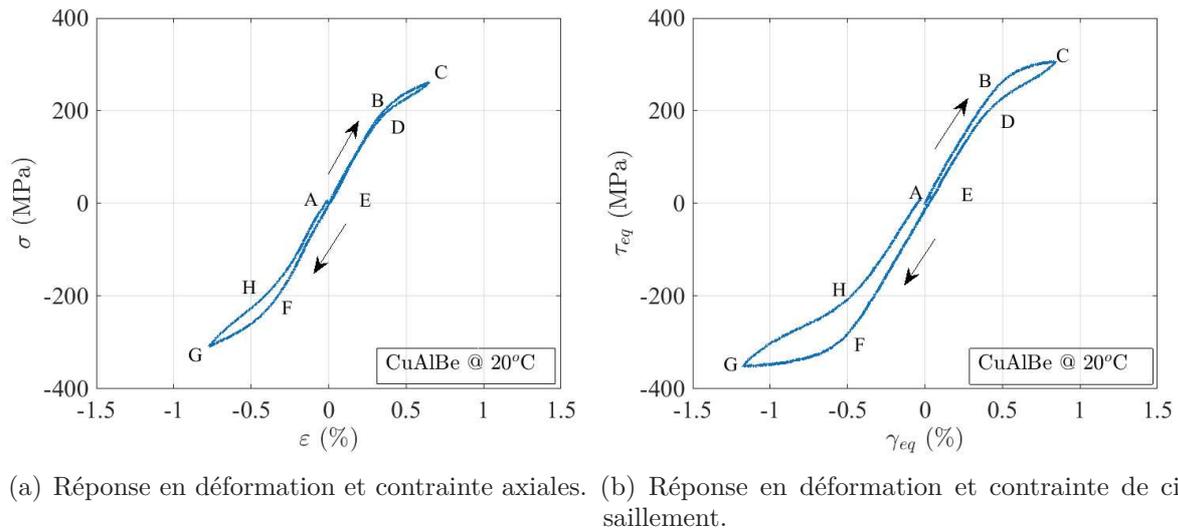


FIGURE 3.39 – Réponse dans le plan de déformation-contrainte d'un essai de traction, torsion proportionnel

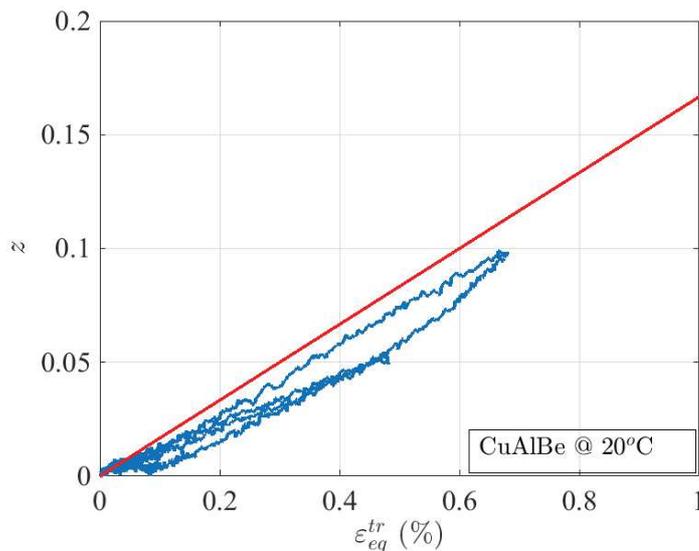


FIGURE 3.40 – Dosage de phase dans un essai de traction torsion proportionnel

3.3.5.6 Essais non proportionnels

La complexité des chargements auxquels sont soumises les pièces mécaniques à base d'AMF oblige d'étudier ce type de chargement non proportionnel. Durant, ce type de chargement, la création de la martensite par une étape de chargement et sa réorientation par une autre étape peuvent se produire. Aussi, la création d'autres variantes de martensite peut avoir lieu. Par conséquent, ce type de chargements reste intéressant à explorer dans la démarche de caractérisation du comportement de notre alliage. Ainsi, des résultats expérimentaux de base seront fournis pour élaborer, vérifier

et valider des modèles numériques dans des chargements avec des changements de direction de chargement. Particulièrement, nous vérifierons la validité de la relation linéaire entre la fraction volumique de martensite et la déformation de transformation équivalente dans des chargements non proportionnels.

À l'exception des essais carrés, la mesure de la déformation dans les essais non proportionnels est réalisée par le système de stéréo corrélation d'images GOM.

3.3.5.6.1 Essais triangle (Traction → Traction-Torsion → Torsion)

Nous avons réalisé plusieurs trajets de chargement non proportionnel dans le plan (σ, τ_{eq}) illustrés sur la figure 3.41. Les niveaux de contraintes équivalentes programmés sont : 250 MPa, 375 MPa et 400 MPa.

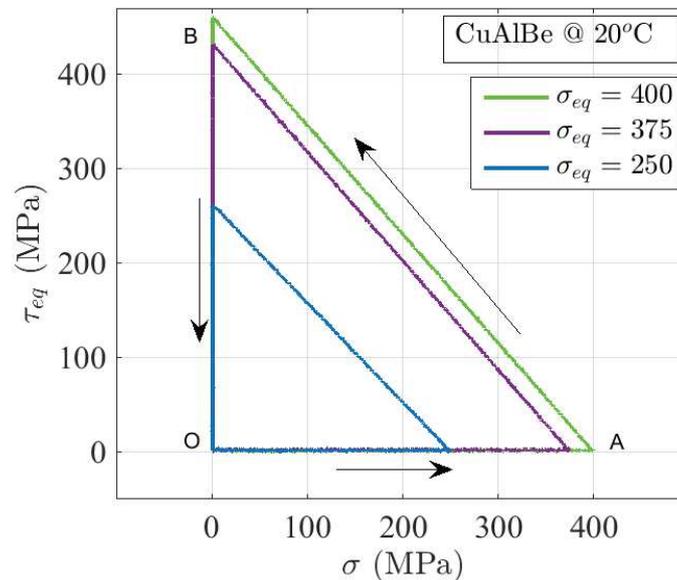


FIGURE 3.41 – Trajet de chargement dans le plan (σ, τ_{eq}) .

Ainsi, la courbe de la figure 3.42 présente la réponse de ces essais dans le plan des déformations $(\varepsilon, \gamma_{eq})$.

Nous présentons en détail l'essai réalisé à une contrainte 400 MPa (Figure 3.43). Au départ, une contrainte de traction de 400 MPa est appliquée sur l'éprouvette à une vitesse de $0,1 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$ tout en gardant un couple nul en torsion. Arrivant à cette contrainte maximale (Point A, Figure 3.43), l'éprouvette est chargée en torsion tout en déchargeant la traction. À la fin de cette phase (Point B, Figure 3.43), la contrainte de traction est nulle, tandis que la contrainte en torsion est maximale. Par la suite, nous déchargeons la torsion tout en gardant la contrainte axiale nulle pour atteindre une contrainte nulle en torsion.

La réponse du matériau dans le plan des déformations est présentée sur la figure 3.44.

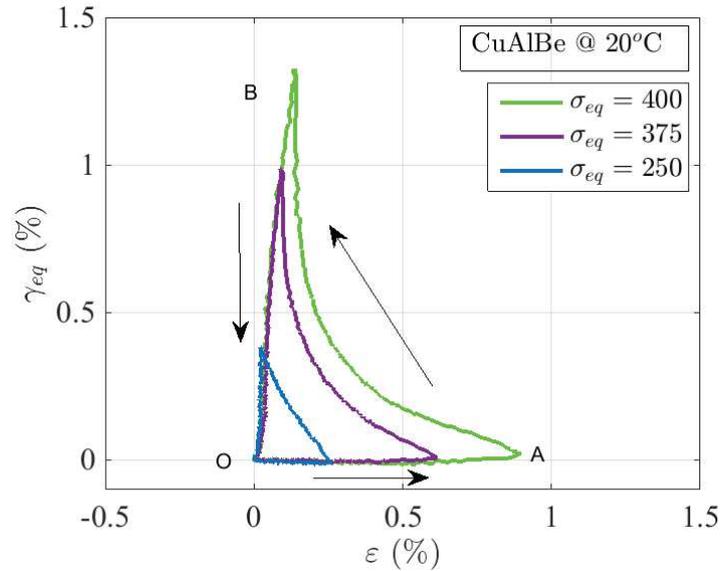


FIGURE 3.42 – Évolution des déformations pour un essai triangulaire (ε , γ_{eq}).

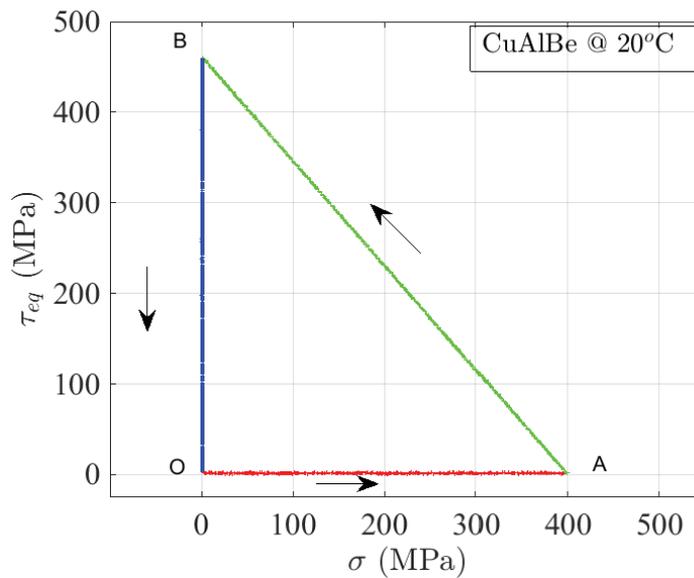


FIGURE 3.43 – Trajet de chargement.

La réponse dans le plan (ε , σ) est donnée dans la figure 3.45. Durant la charge en traction, le comportement élastique du matériau est relatif à la déformation élastique de l'austénite (Figure 3.45). Juste après, nous observons, le début de changement de pente relatif à la transformation de phase directe de l'austénite en martensitique. De même, lorsque le chargement en torsion et la décharge en traction commencent, nous observons que la transformation inverse de la martensite en austénite commence dans la courbe de traction et que le matériau récupère sa pente élastique relative à l'austénite. Cela ne dure pas longtemps, vu que le matériau commence à se transformer en torsion avec un

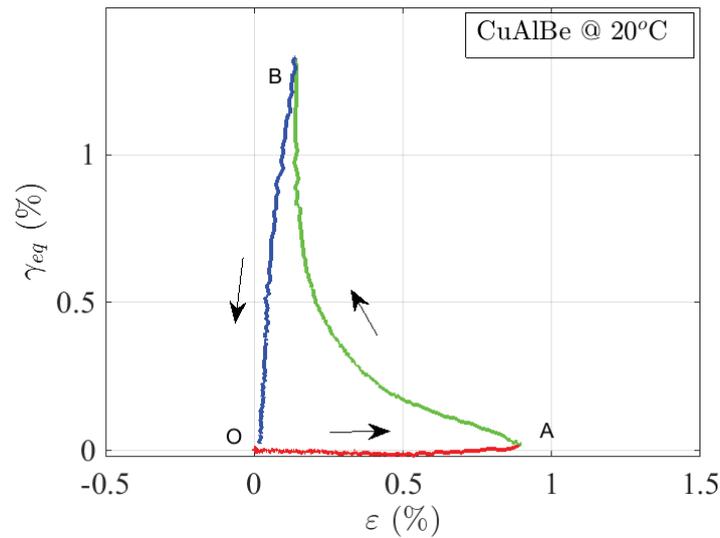


FIGURE 3.44 – Réponse dans le plan des déformations.

changement de la pente élastique comme le montre la figure 3.46. À la fin de la décharge en traction et la charge en torsion, une déformation résiduelle est observée en traction qui est relative à la martensite formée en torsion. La décharge de la torsion permet de récupérer cette déformation résiduelle. Ainsi, le matériau illustre un comportement superélastique dans la globalité de ce trajet de chargement.

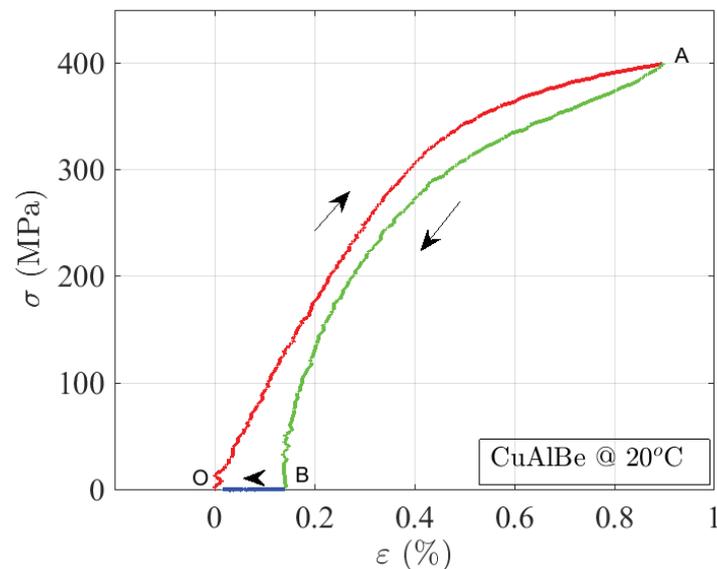


FIGURE 3.45 – Réponse en déformation et contrainte axiales.

La mesure de la tension électrique permet d'avoir une courbe de tension brute notée ΔU , d'une tension relative à la déformation axiale notée ΔU_e et d'une tension corrigée notée ΔU_c relative à la transformation de phase (Figure 3.47).

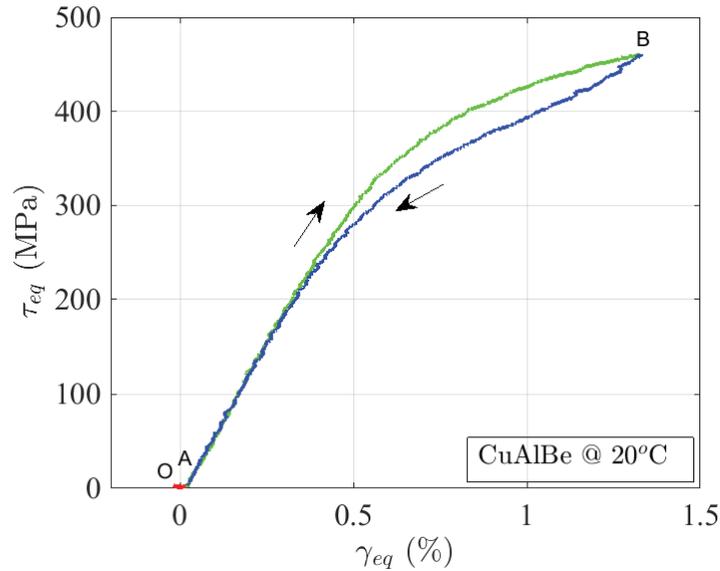


FIGURE 3.46 – Réponse en déformation et contrainte de cisaillement.

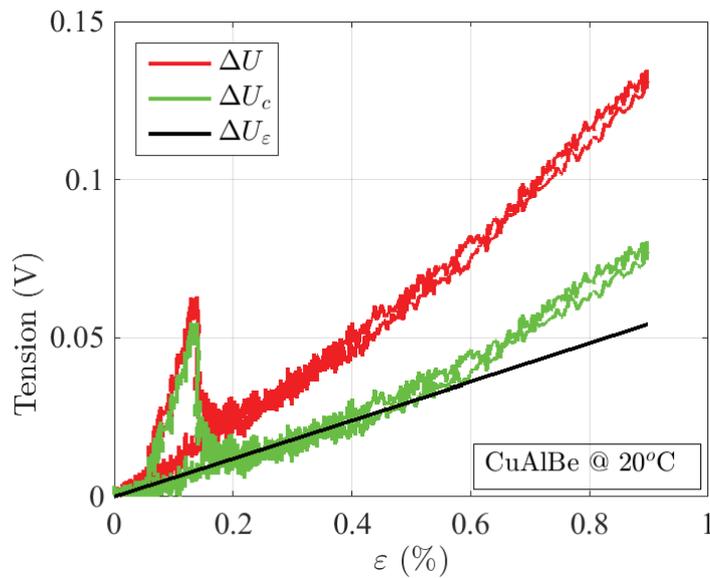


FIGURE 3.47 – Évolution de la tension.

À partir de cette mesure de tension électrique et à partir du calcul de la déformation de transformation équivalente, nous obtenons, la courbe de dosage de phase (Figure 3.48). Sur cette courbe, l'évolution de la transformation de phase reste linéaire par rapport à la déformation de transformation équivalente. Toutefois, un écart par rapport à la pente repère est peut-être dû à une sous-estimation de la tension finale. L'allure pendant le chargement en traction et lors de la décharge en traction, charge en torsion est la même, sauf qu'au début de la déformation en torsion, la pente de cette dernière change. Cela est peut-être dû à la réorientation de martensite ou à la création d'autres variantes de

martensite différentes de celles créées en traction.

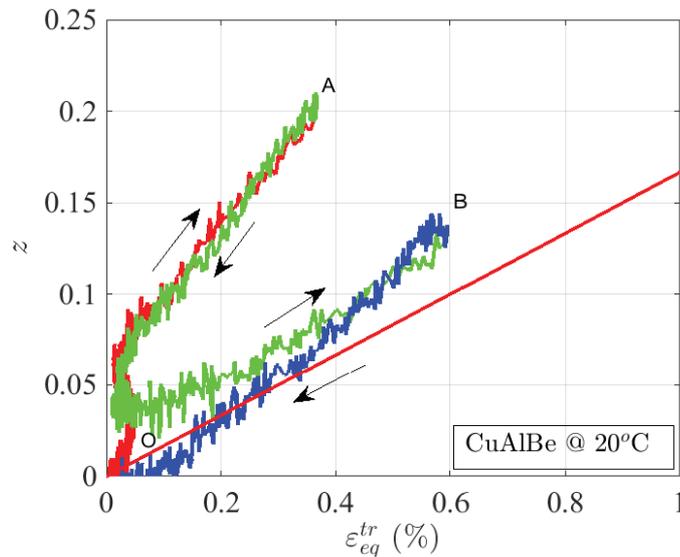


FIGURE 3.48 – Dosage de phase pour un essai triangle

En conclusion, nous montrons dans ce trajet de chargement que l'évolution de la fraction volumique de martensite que ça soit en traction ou en torsion reste linéaire en fonction de la déformation de transformation équivalente. Cela confirme les résultats obtenus précédemment dans les essais uniaxiaux et dans les essais proportionnels que nous avons déjà réalisés.

Après post-traitement des résultats des différents trajets de chargement triangulaires non proportionnels commençant par la traction, nous obtenons la courbe de dosage de phase (Figure 3.49).

Nous avons montré, pour ce type de trajet de chargement non proportionnel que la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite et la déformation de transformation équivalente est vérifiée. Ainsi, nous changeons le type de trajet de chargement pour démontrer la validité de cette même relation.

3.3.5.6.2 Essais triangles (Traction-Torsion \rightarrow Torsion \rightarrow Traction)

Nous avons réalisé différents trajets de chargement de ce type, avec différents niveaux de contraintes. La figure 3.50 illustre un résumé des chargements appliqués dans le plan (σ, τ_{eq}) .

Nous obtenons les réponses de ces trajets de chargement en déformation sur la figure 3.51.

Le dosage de phase réalisé dans ces essais est présenté dans la figure 3.52. Nous observons, en majorité que l'évolution de la fraction volumique de martensite est linéaire en fonction de la déformation de transformation. Pour le chargement à 250 MPa, la

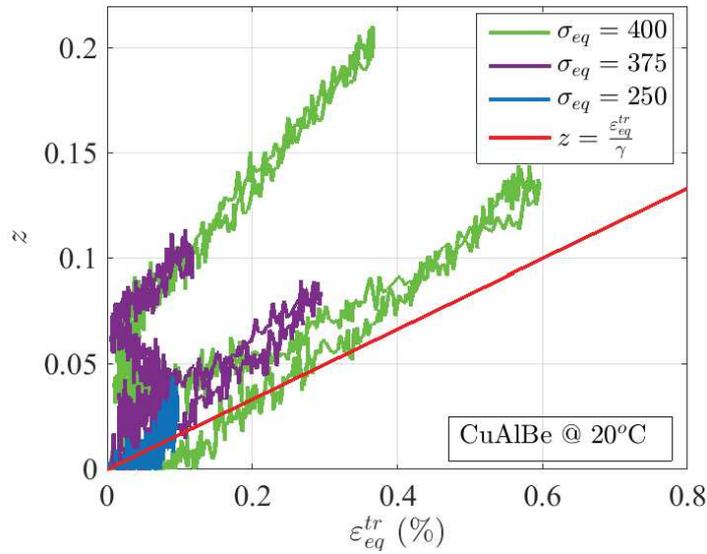


FIGURE 3.49 – Évolution de la fraction volumique de martensite pour des chargements non proportionnels.

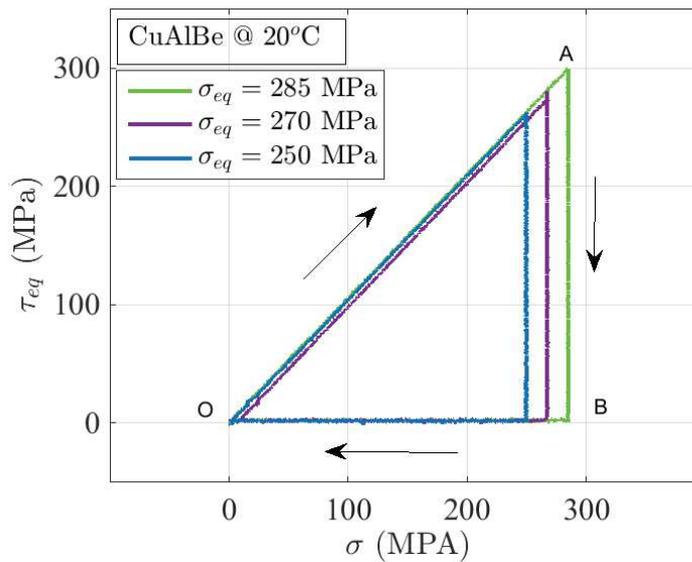


FIGURE 3.50 – Pilotage des essais triangle débutant par la traction-torsion.

transformation de phase est très faible pour être correctement identifiée par notre technique.

Nous présentons en détail le cas de chargement à 285 MPa où nous avons eu le taux de transformation de phase le plus important (Figure 3.53).

La courbe de la figure 3.54 présente la réponse obtenue en déformation.

Durant la charge proportionnelle, la déformation axiale et celle de cisaillement augmentent proportionnellement (Figure 3.54). Lors de la décharge en torsion, la déformation de cisaillement diminue ainsi que la petite partie de déformation axiale due

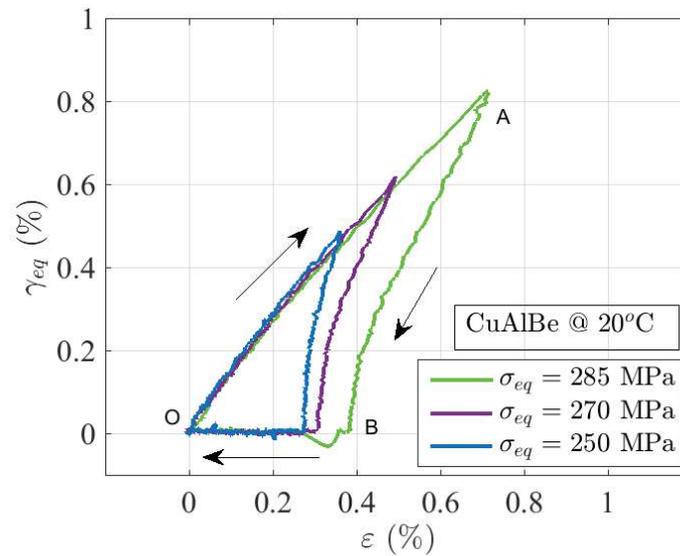


FIGURE 3.51 – Réponse en déformation des essais triangle débutant par la traction-torsion.

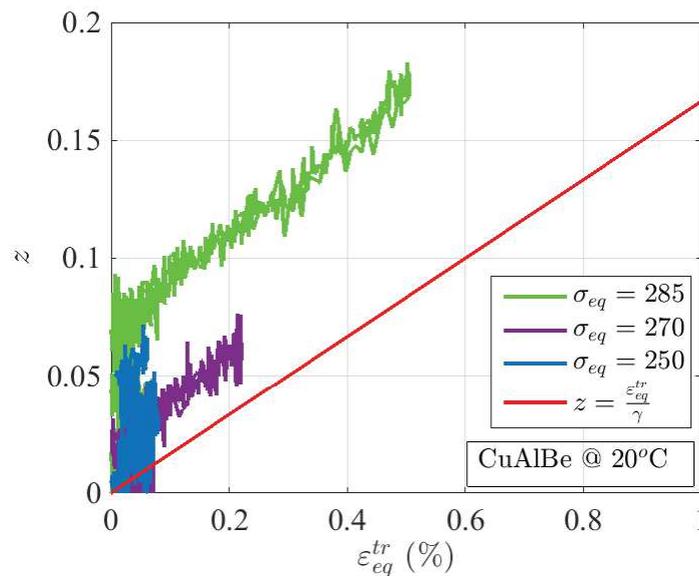


FIGURE 3.52 – Réponse en déformation des essais triangle débutant par la traction-torsion.

à la déformation de cisaillement. Lors de la décharge en contrainte axiale, la déformation axiale diminue avec la contrainte.

Nous présentons cet essai dans le plan (ε, σ) sur la figure 3.55 et dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) sur la figure 3.56.

Nous observons une pente élastique relative au comportement élastique de l'austénite en chargeant l'éprouvette en traction-torsion sur les deux courbes des figures 3.55 et 3.56. La variation de la pente du comportement coïncide avec une transformation de phase

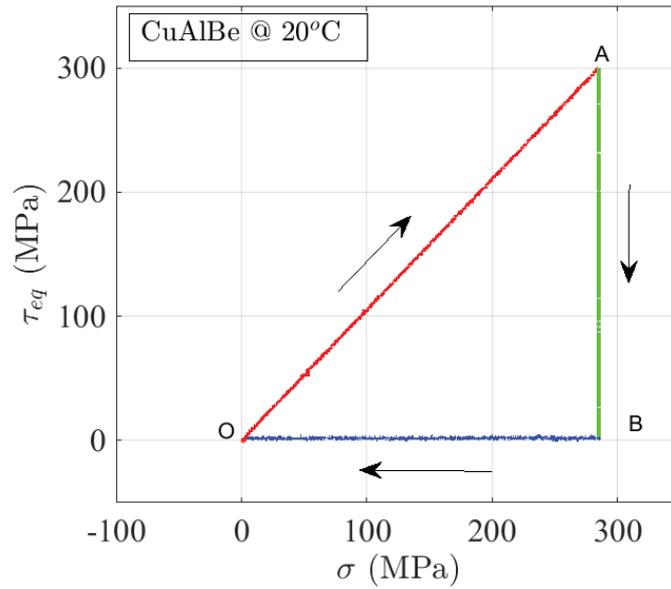


FIGURE 3.53 – Chargement triangulaire dans le plan équivalent $AMF(\sigma, \tau_{eq})$.

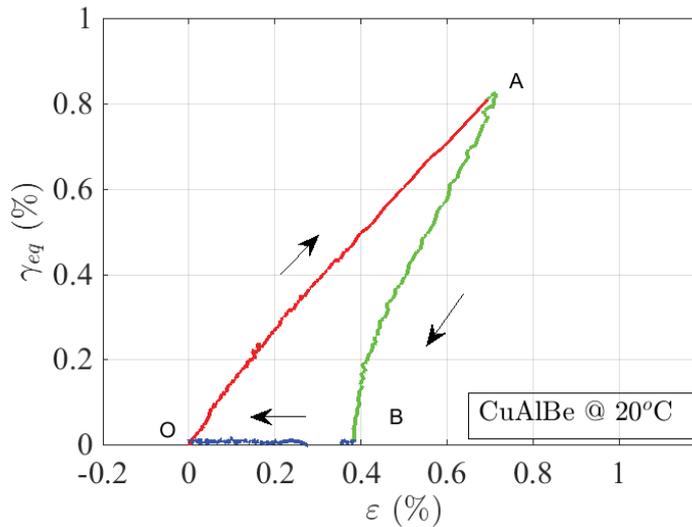
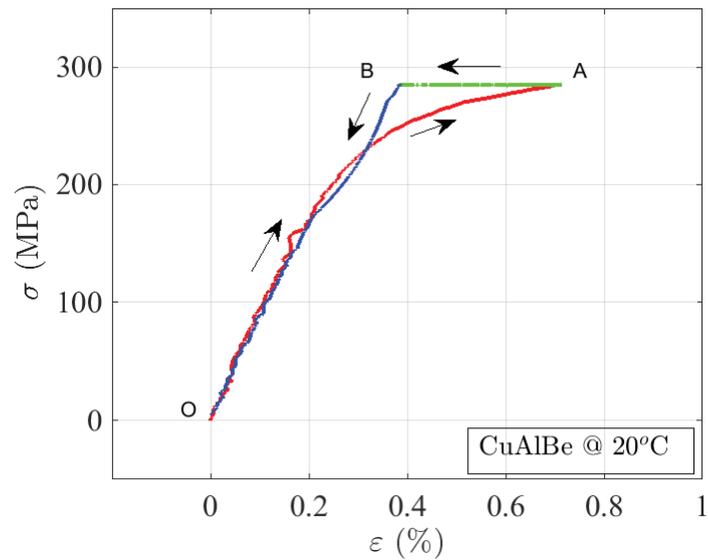
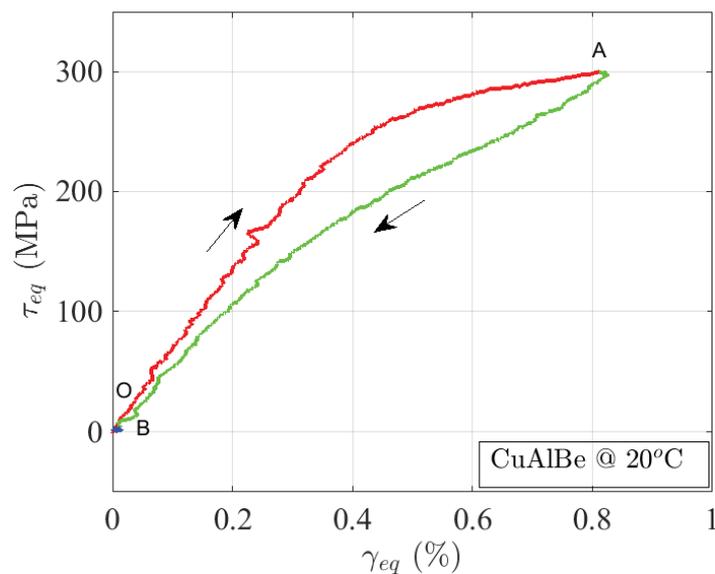


FIGURE 3.54 – Réponse en déformation dans le plan (ϵ, γ_{eq}) .

directe qui a lieu dans les deux directions de chargement. Cette transformation s'inverse lors de la deuxième partie du trajet de chargement jusqu'au point où la contrainte de torsion devient nulle. Par la suite, la décharge de traction permet d'atteindre une déformation nulle.

La correction de la tension mesurée en fonction de la déformation est présentée sur la figure 3.57.

Le dosage de phase de cet essai est présenté sur la figure 3.58. On note que la relation de linéarité entre la déformation de transformation et la fraction volumique de

FIGURE 3.55 – Réponse du matériau dans le plan (ε, σ) .FIGURE 3.56 – Réponse du matériau dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) .

martensite dans ce type de trajet de chargement non proportionnel est vérifiée.

3.3.5.6.3 Essai triangle (Traction-Torsion → Traction → Torsion)

Nous résumons les essais réalisés dans la figure 3.59.

Nous obtenons la réponse en déformation illustrée sur la figure 3.60.

Le dosage de phase de ces essais est sur la figure 3.61.

Malgré le petit écart noté à 0 % de déformation de transformation équivalente et qui peut venir des paramètres de calcul de cette déformation, l'évolution de la fraction

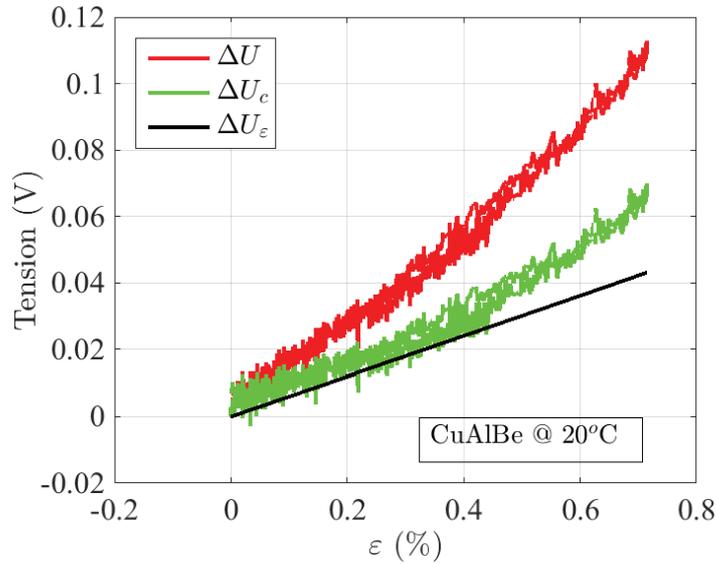


FIGURE 3.57 – Variation de la tension en fonction de la déformation.

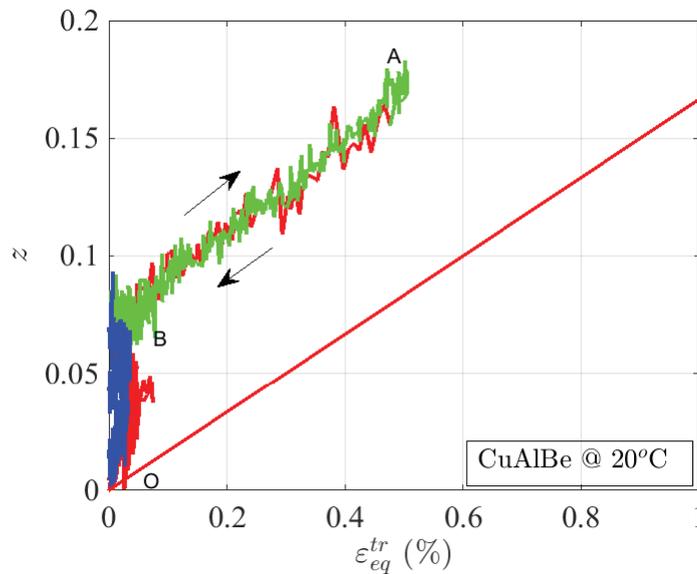


FIGURE 3.58 – Dosage de phase des essais triangle débutant par la traction-torsion.

volumique est linéaire en fonction de la déformation de transformation.

Nous présentons les résultats détaillés concernant l'essai réalisé à une contrainte de 300 MPa. Le trajet de chargement programmé dans cet essai est présenté sur la figure 3.62.

La réponse du matériau dans le plan des déformations $(\varepsilon, \gamma_{eq})$ est donnée dans la figure 3.63.

Nous représentons aussi, les réponses dans le plan (ε, σ) ainsi que la réponse dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) respectivement sur les figures 3.64 et 3.65.

Nous remarquons sur les deux courbes des figures 3.64 et 3.65 un effet de superélasticité.

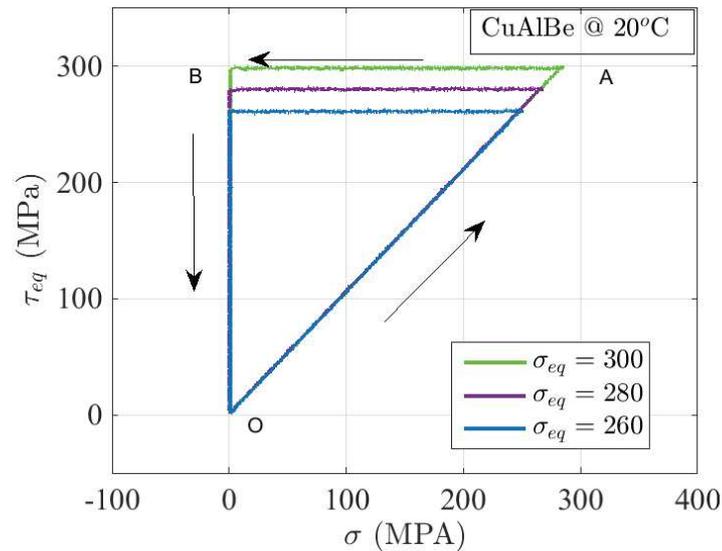


FIGURE 3.59 – Pilotage des essais triangle débutant par la traction-torsion.

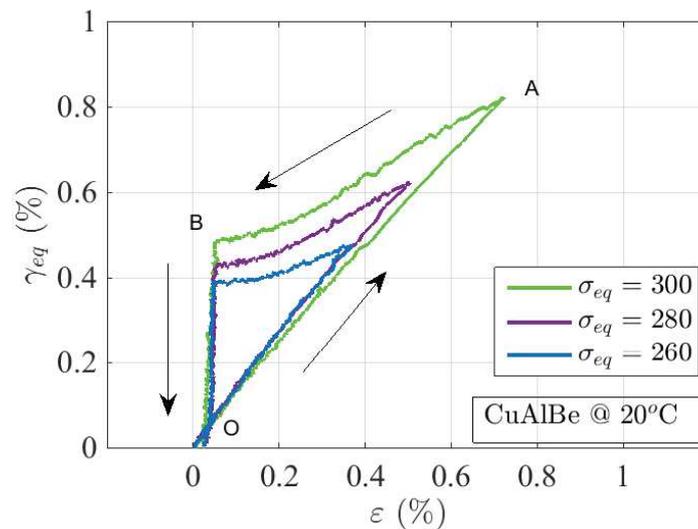


FIGURE 3.60 – Réponse en déformation des essais triangle débutant par la traction-torsion.

Il est caractérisé par l'inflexion du comportement du matériau, juste après la pente élastique de la phase austénitique, dans les deux directions de chargement. En effet lors de la phase de traction-torsion, de la martensite est créée dans notre éprouvette. Durant la décharge en traction, la transformation inverse est activée. La décharge finale (B-O) correspondant à la fin de l'essai, aucune déformation résiduelle ne subsiste.

Le dosage de phase obtenu dans cet essai est présenté sur la figure 3.66.

Nous observons que pendant la phase de traction torsion, le taux de la martensite évolue linéairement en fonction de la déformation de transformation (Figure 3.66).

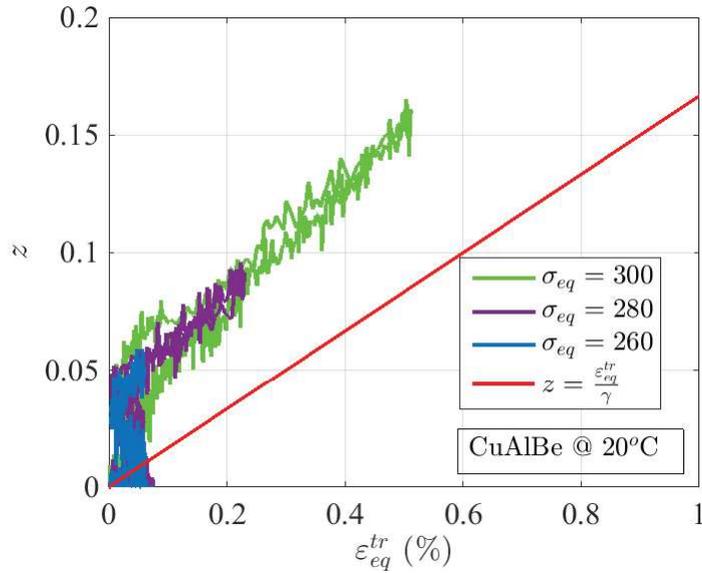


FIGURE 3.61 – Dosage de phase des essais triangle débutant par la traction-torsion.

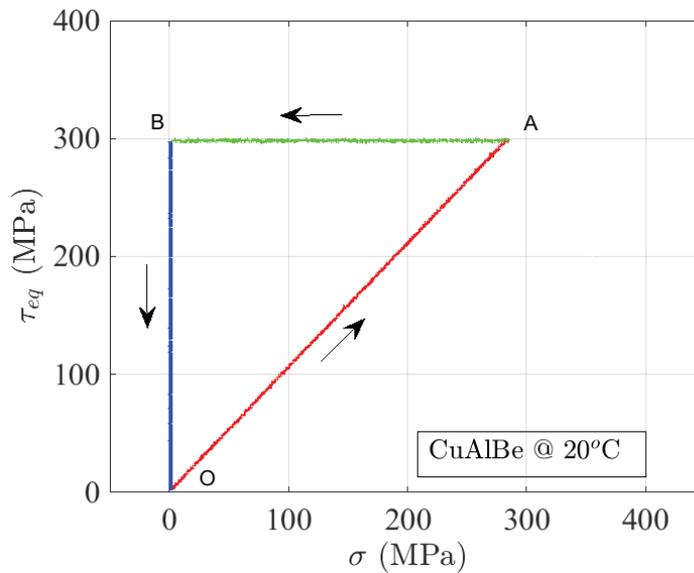
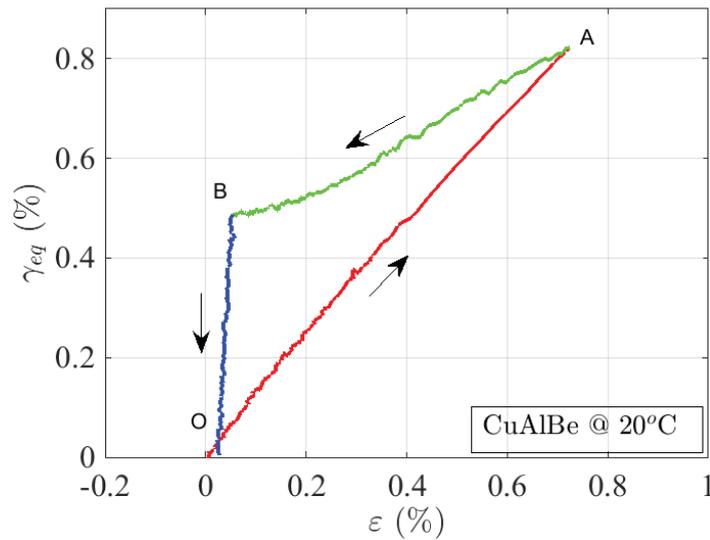
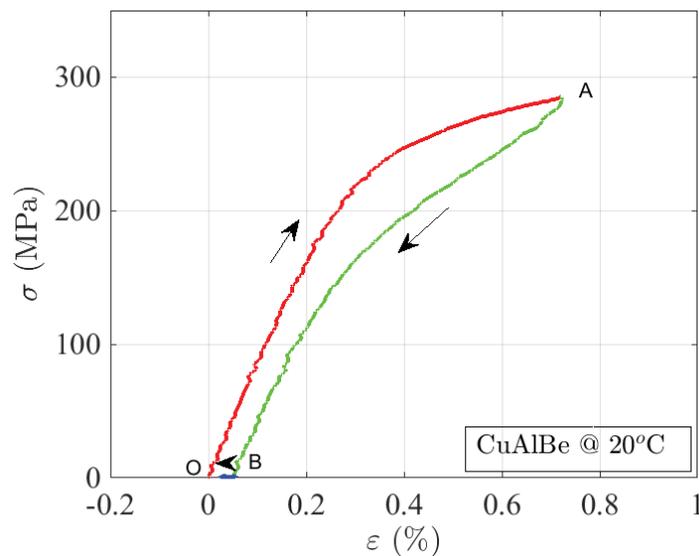


FIGURE 3.62 – Pilotage d'un essai triangulaire dans le plan (σ, τ_{eq})

Aussi, lors de la décharge de la traction, la transformation inverse baisse le taux de la martensite d'une manière linéaire aussi. Un faible taux de transformation de phase est généré par la torsion dans cet essai. Nous concluons de cet essai que la linéarité est aussi validée pour cet essai.

3.3.5.6.4 Essai carré.

Cet essai a été piloté en déplacement et en angle du vérin. Nous avons estimé les déplacements et les angles équivalents aux contraintes de torsion et de traction

FIGURE 3.63 – Réponse dans le plan $(\varepsilon, \gamma_{eq})$ d'un essai triangle.FIGURE 3.64 – Réponse dans le plan (ε, σ)

équivalentes pour illustrer l'effet de la nature de ce type de chargement non proportionnel sur la transformation de phase.

La figure 3.67 illustre le trajet de chargement programmé.

La réponse dans le plan $(\varepsilon, \gamma_{eq})$ est présentée sur la figure 3.68.

La réponse de ce chargement en contrainte est présentée dans la figure 3.69.

L'évolution des contraintes de traction et de cisaillement en fonction de leurs déformations sont respectivement présentées sur les figures 3.70 et 3.71.

Nous remarquons que dans la globalité du chargement (Figure 3.72), l'évolution de la transformation de phase est linéaire en fonction de la déformation de transformation.

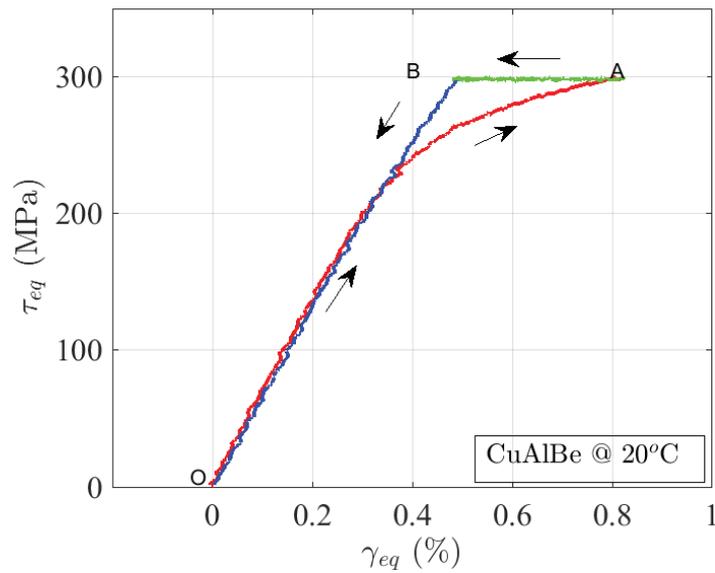


FIGURE 3.65 – Réponse dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq})

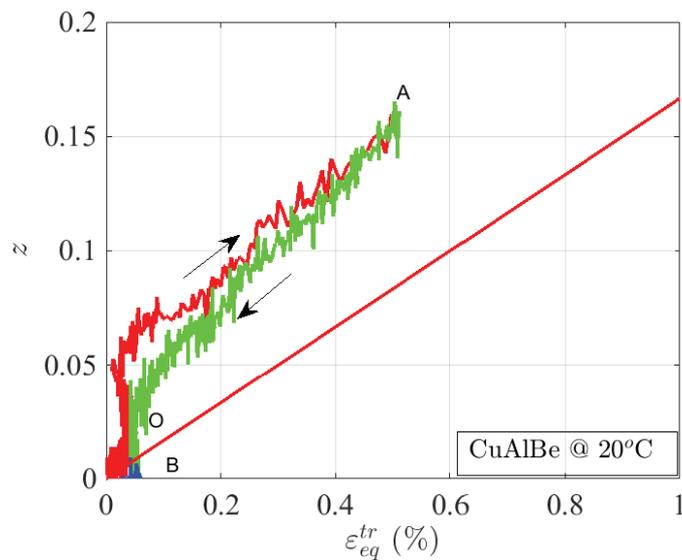


FIGURE 3.66 – Dosage de phase des essais triangle débutant par la traction-torsion.

Le léger écart observé par rapport à la fraction volumique suivant la loi $z = \frac{\varepsilon_{eq}^{tr}}{\gamma}$ durant la phase de torsion est peut-être dû aux paramètres de dépouillement utilisés pour le calcul de la déformation de transformation équivalente.

3.3.5.6.5 Essai carré positif

Cet essai carré non proportionnel est piloté en contrainte et dont le trajet est présenté sur la figure 3.73.

La réponse de cet essai en déformation est présentée sur la figure 3.74.

Nous remarquons un début de la transformation de phase en traction. Durant, le

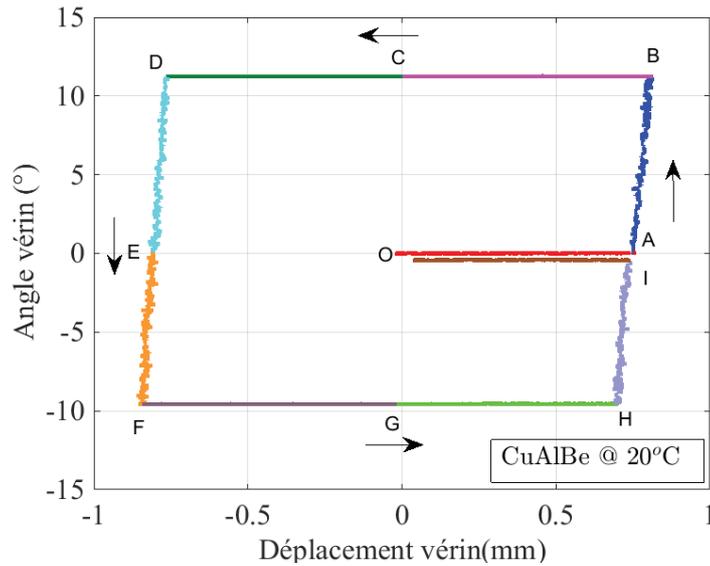
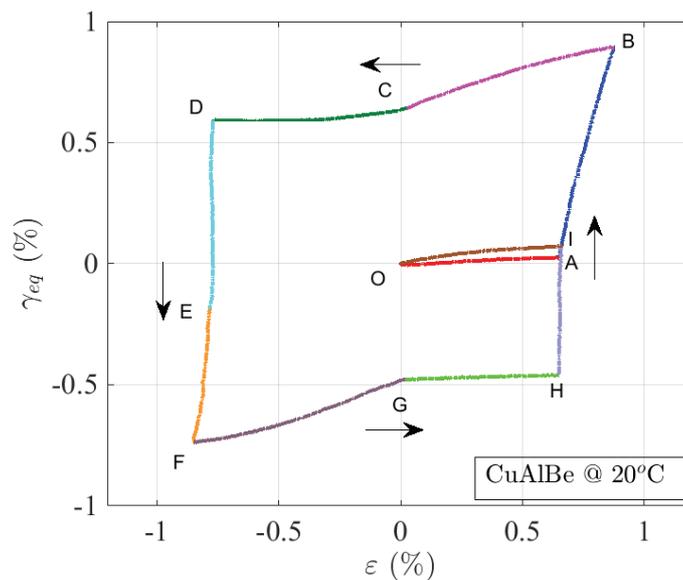


FIGURE 3.67 – Commande du vérin pour un essai carré.

FIGURE 3.68 – Déformation dans le plan (ϵ, γ) .

maintien d'un niveau de contrainte constant, une déformation axiale de l'éprouvette est produite. Cela se voit clairement sur la courbe de déformation (Figure 3.74). Avec l'augmentation de la déformation en torsion, la déformation axiale augmente. Cela est dû au début de la transformation de phase qui démarre lors de la fin de la traction.

Les figures 3.75 et 3.76 illustrent respectivement les réponses de cet essai dans les plans (ϵ, σ) et (γ_{eq}, τ_{eq}) .

L'évolution de la tension mesurée et la tension corrigée est présentée sur la figure 3.77.

Nous montrons dans cet essai (Figure 3.78), dont la déformation de transformation

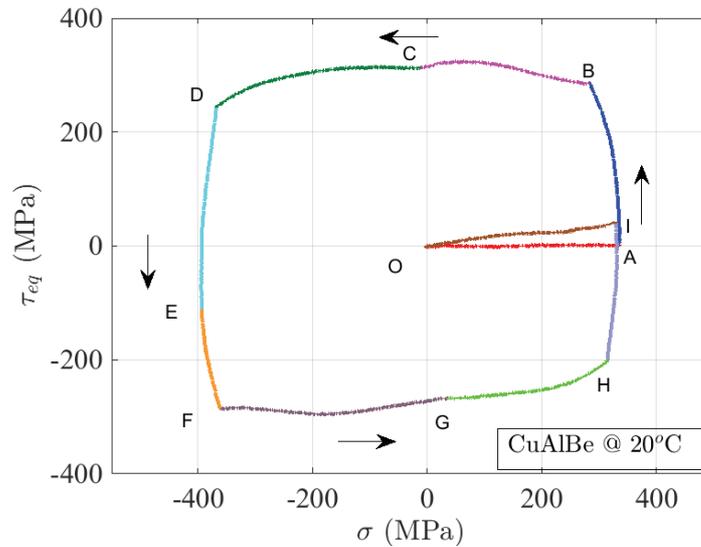


FIGURE 3.69 – Réponse dans le plan (ε, σ) d'un essai non proportionnel.

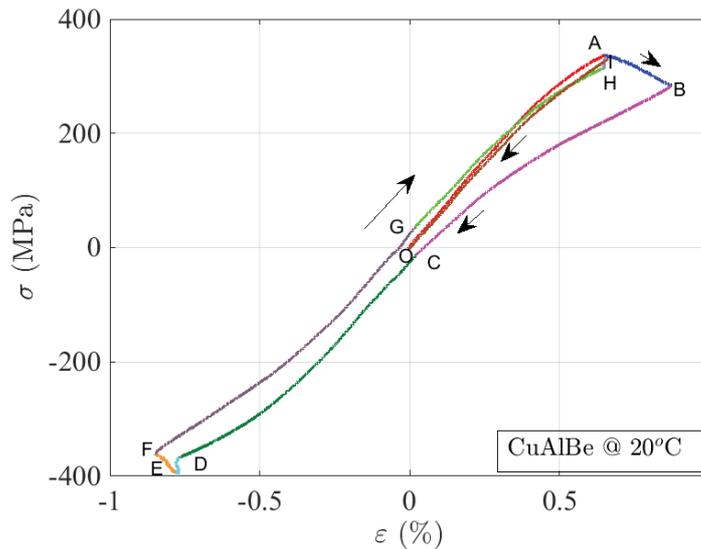


FIGURE 3.70 – Réponse dans le plan (ε, σ) .

équivalente ainsi que la fraction volumique de martensite sont très importantes, que la relation de linéarité est respectée à un écart près. Celui-ci est dû au choix de coefficient de dissymétrie ainsi que des modules de Young et de cisaillement utilisés pour le calcul de la déformation de transformation équivalente.

3.3.5.6.6 Essai elliptique

Nous réalisons un trajet de chargement ayant la forme présentée sur la figure 3.79. Nous avons limité la contrainte en compression pour éviter un flambement de l'éprouvette durant la phase de compression-torsion de l'essai.

La courbe de la figure 3.80 présente la réponse obtenue en déformation.

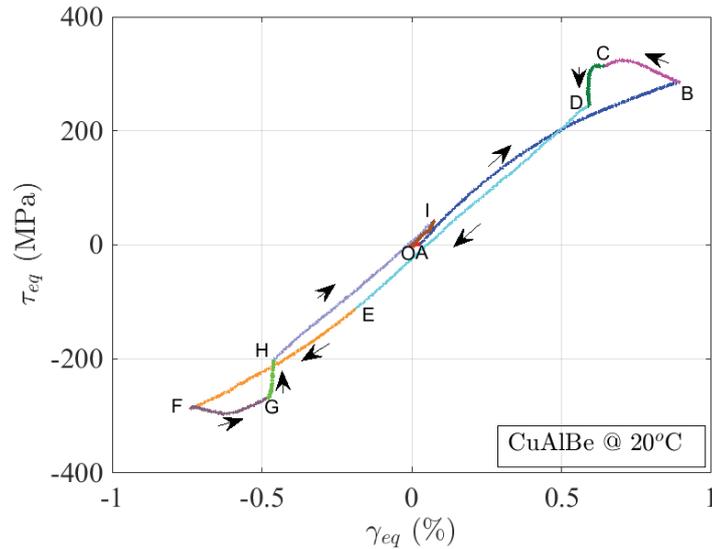
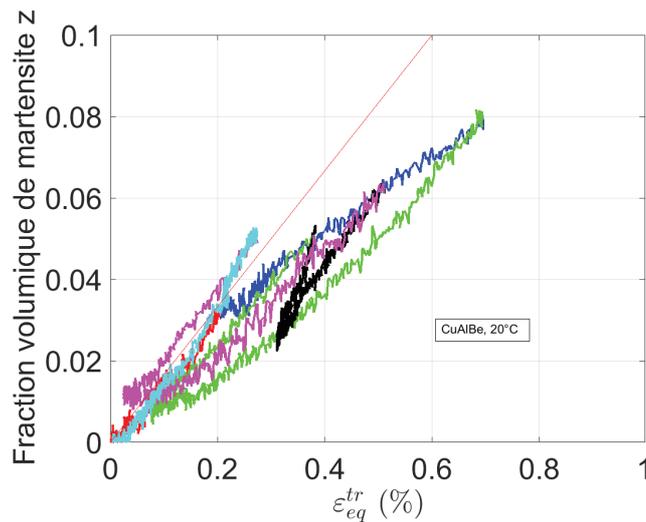
FIGURE 3.71 – Réponse dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) .

FIGURE 3.72 – Dosage de phase lors d'un chargement non proportionnel.

Nous présentons cet essai dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) (Figure 3.82) et dans le plan (ε, σ) (Figure 3.81).

La correction de la tension mesurée en fonction de la déformation est présentée sur la figure 3.83.

Dans cet essai (Figure 3.84), l'évolution de la fraction volumique de martensite reste linéaire durant la phase de traction. Cette déformation est inversée pendant la décharge en traction et puis reprend lorsque la déformation en torsion devient plus importante. Lors de la compression, la transformation inverse continue et une transformation directe s'opère lorsque la contrainte équivalente dépasse la limite de transformation. Lors de la recharge en traction et en torsion, la transformation directe reprend. Lors de la décharge

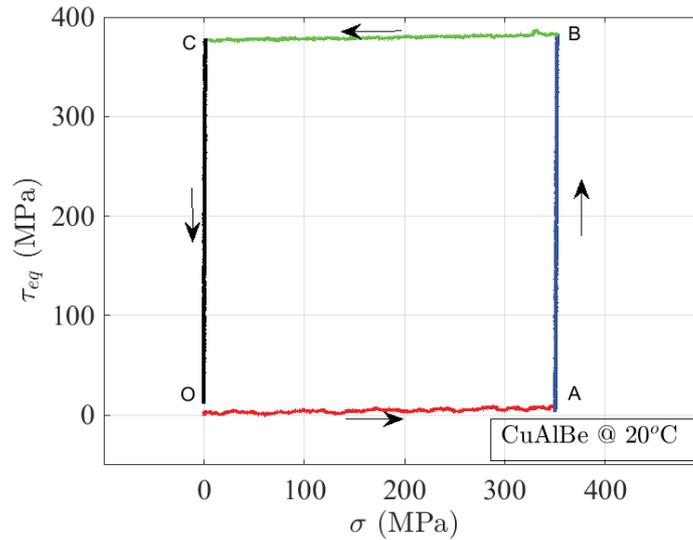


FIGURE 3.73 – Essai carré non proportionnel sur une éprouvette en CuAlBe à température ambiante.

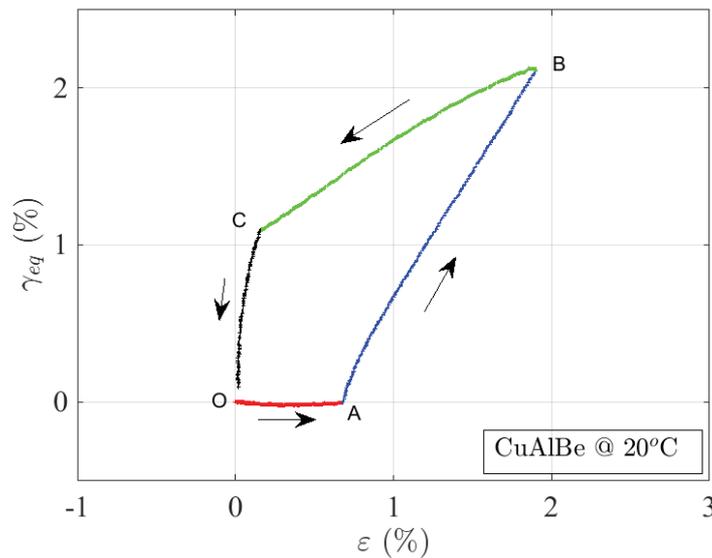


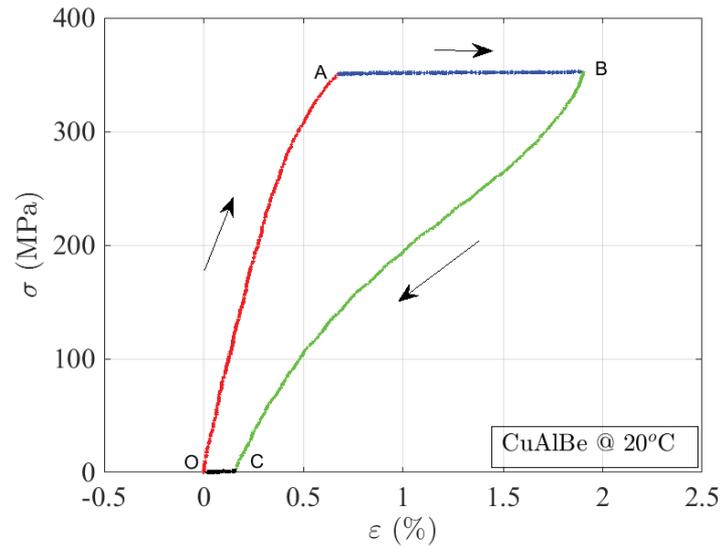
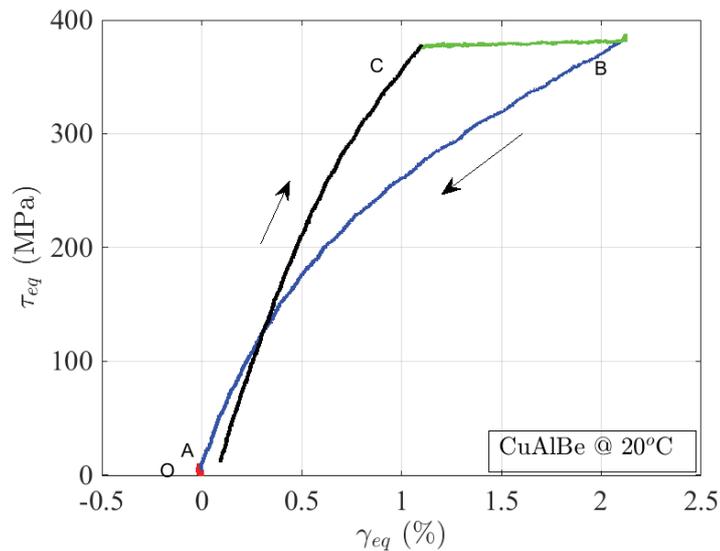
FIGURE 3.74 – Comportement du matériau dans le plan $(\varepsilon, \gamma_{eq})$

de la traction, la transformation inverse s'opère.

La complexité de ce type de chargement causant de la transformation de phase et de la réorientation de la martensite ne nous a pas permis de conclure concernant la linéarité de la fraction volumique z et la déformation de transformation équivalente ε_{eq}^{tr} .

En somme, les résultats obtenus lors des essais réalisés dans cette section restent en concordance avec les résultats obtenus pour des trajets de chargements proportionnels [94].

D'une part, nos résultats pour des trajets de chargements proportionnels concernant

FIGURE 3.75 – Comportement du matériau dans le plan (ε, σ) .FIGURE 3.76 – Comportement du matériau dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq})

la variation de z répondent à la loi de linéarité citée ci-dessus. D'autre part, dans la totalité des essais non proportionnels, l'écart observé entre les résultats expérimentaux et la réponse linéaire théorique concernant la fraction volumique de martensite z et la déformation de transformation équivalente ε_{eq}^{tr} reste faible. Cet écart peut être dû à la méthode d'identification des paramètres matériaux nécessaires au calcul de la déformation de transformation équivalente tels que les modules de Young et de cisaillement. Il peut être aussi dû à l'estimation de la tension finale relative à la transformation martensitique totale. Néanmoins, cet écart nous n'empêche pas de conclure que la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite et la

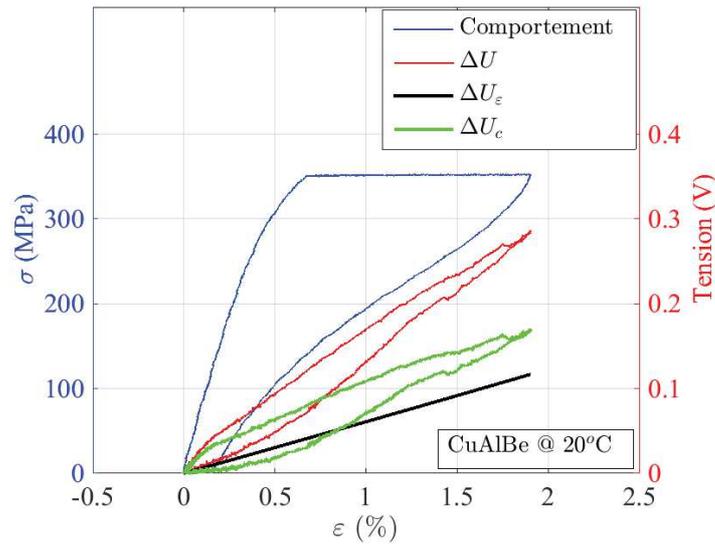


FIGURE 3.77 – Évolution de la tension électrique et de la contrainte en fonction de la déformation au cours d'un essai non proportionnel.

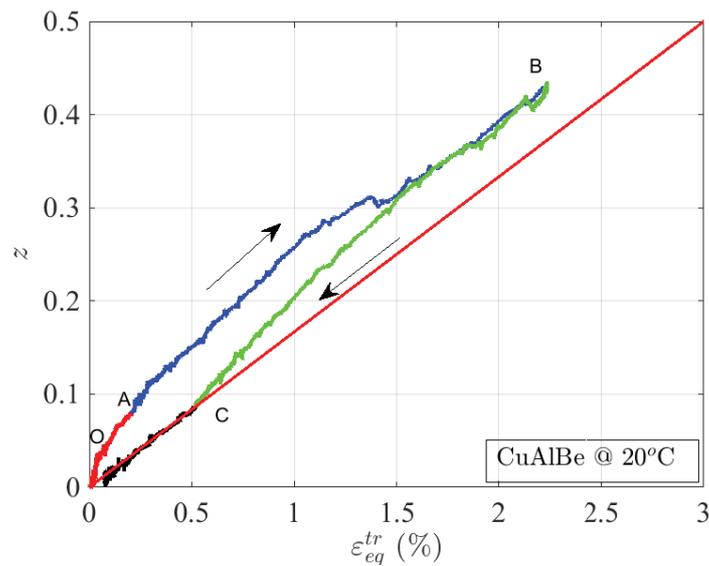


FIGURE 3.78 – Évolution de la fraction volumique de la martensite au cours d'un essai non proportionnel carré.

déformation de transformation équivalente est validée dans le cas de chargements proportionnels et non proportionnels.

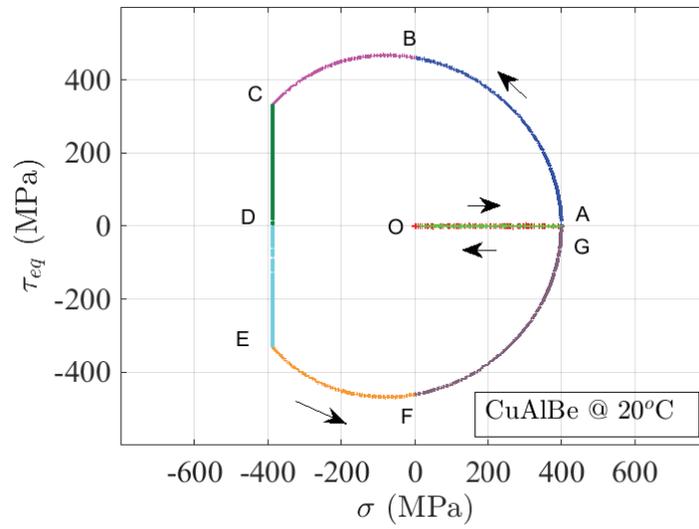


FIGURE 3.79 – Réponse en contrainte dans le plan (σ, τ_{eq}) .

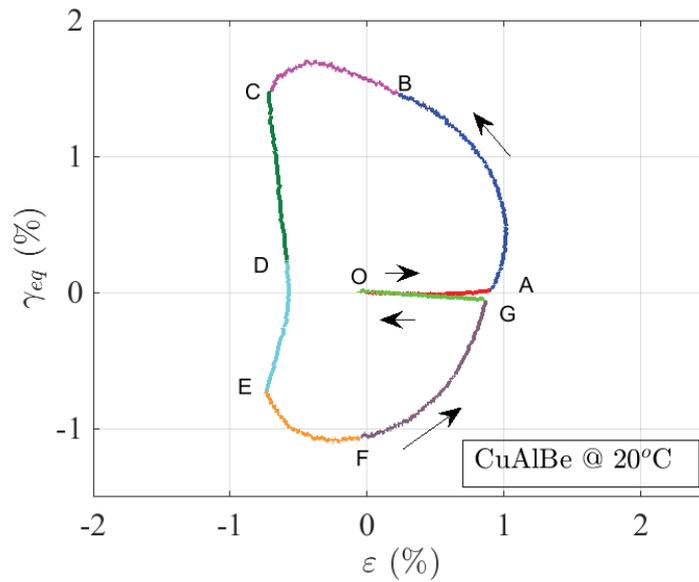


FIGURE 3.80 – Réponse en déformation dans le plan $(\varepsilon, \gamma_{eq})$.

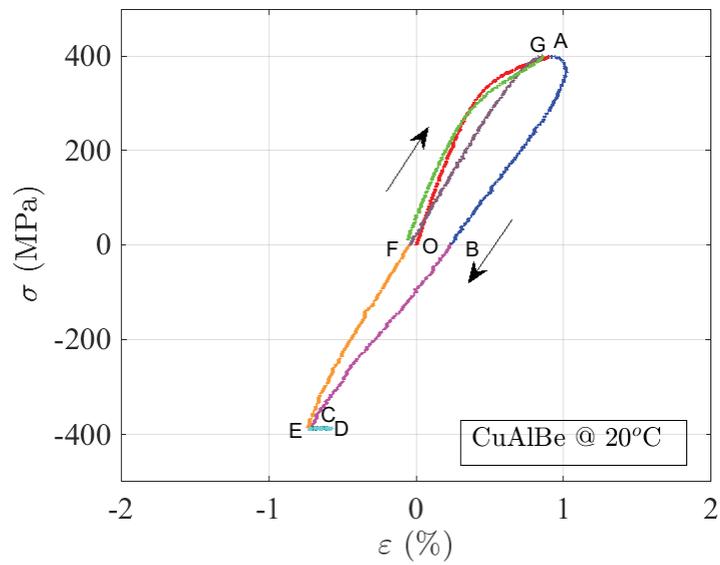


FIGURE 3.81 – Réponse du matériau dans le plan (ϵ, σ) .

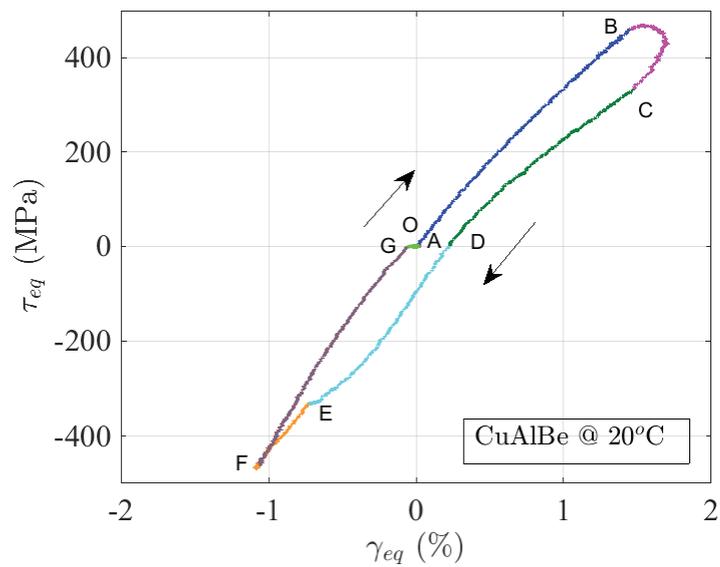


FIGURE 3.82 – Réponse du matériau dans le plan (γ_{eq}, τ_{eq}) .

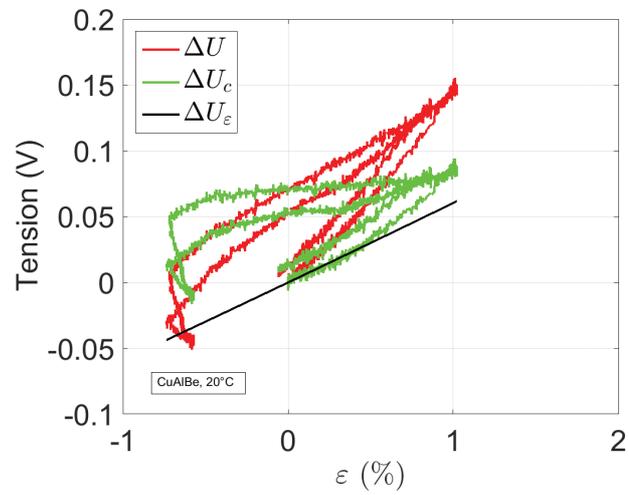


FIGURE 3.83 – Variation de la tension en fonction de la déformation.

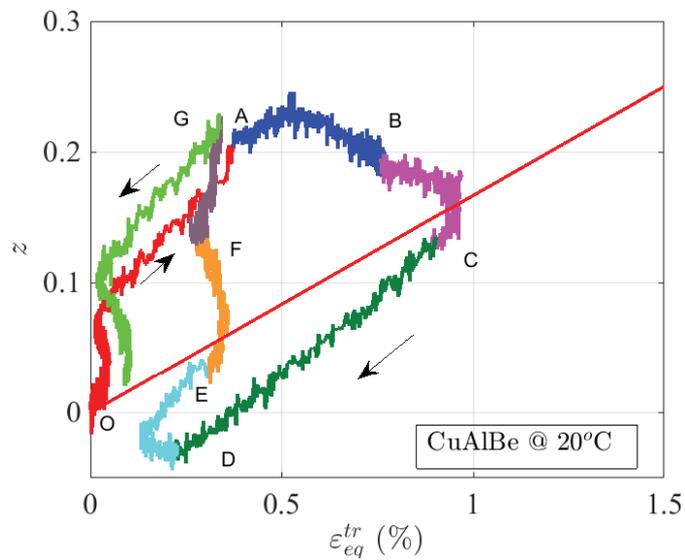


FIGURE 3.84 – Évolution de la fraction volumique de martensite pour un essai non proportionnel.

3.4 Conclusion.

Dans ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, des résultats originaux de dosage de phase réalisé dans le cas de chargements uniaxiaux anisothermes sur des éprouvettes filaires à base d'un AMF de CuAlBe. Plus particulièrement, un dosage de phase dans un état triphasé où de l'austénite, de la martensite thermique et de la martensite orientée peuvent être présentes dans le matériau est réalisé.

Aussi, nous avons présenté des résultats d'essais multiaxiaux proportionnels et non proportionnels suivant différents trajets de chargement dans un deuxième temps.

La variété des trajets de chargement que nous avons réalisés permet de comprendre le comportement des AMF pendant des chargements thermomécaniques complexes et de cette façon, identifier les paramètres indispensables aux modèles concernant ce type de matériaux.

Un dosage de phase de l'AMF étudié est réalisé à partir de l'évolution de la mesure de tension électrique.

Lors de ces essais, la tendance générale de l'évolution de la fraction volumique de martensite est linéaire en fonction de la déformation de transformation dans cet essai. Ainsi, nous confirmons les résultats obtenus précédemment. En conséquence, nous avons validé la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite z et la déformation de transformation ε_{eq}^{tr} pour des trajets de chargements multiaxiaux proportionnels et non proportionnels.

$$z = \frac{\varepsilon_{tr}}{\gamma} \quad (3.78)$$

Par conséquent, nous avons constitué une base expérimentale sur les chargements axiaux, cycliques et multiaxiaux avec suivi de la cinétique de transformation de phase sur un même matériau. Cette base est complétée par les données de dosage de phase vu qu'un suivi de la cinétique de transformation de phase a été réalisé.