

# Cinétique de transformation de phase dans un alliage à mémoire de forme

## Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>109</b>
<b>3.2</b>	<b>Sollicitations uniaxiales et suivi de transformation de phase</b>	<b>109</b>
3.2.1	Matériau	110
3.2.2	Moyens d'essai	110
3.2.3	Exploitation des mesures de résistance électrique	110
3.2.4	Résultats expérimentaux	113
3.2.4.1	Essai de dilatométrie	113
3.2.4.2	Essai de superélasticité	116
3.2.4.3	Essai de pseudoplasticité	119
3.2.4.4	Essais d'effet mémoire assisté	122
<b>3.3</b>	<b>Sollicitations complexes et suivi de transformation de phase</b>	<b>130</b>
3.3.1	Matériau et éprouvette	130
3.3.2	Dispositif expérimental	131
3.3.3	Exploitation des mesures de résistance électrique	132
3.3.4	Notations	133
3.3.4.1	Calcul de la contrainte équivalente $\sigma_{eq}$ pour un AMF [21]	133
3.3.4.2	Calcul de la déformation équivalente de transformation	136
3.3.5	Résultats expérimentaux	138
3.3.5.1	Identification des températures de transformation de phase par DSC	139
3.3.5.2	Essai de traction-compression	140
3.3.5.3	Essai de traction cyclique	143

3.3.5.4	Essai de torsion . . . . .	146
3.3.5.5	Essais proportionnels . . . . .	150
3.3.5.6	Essais non proportionnels . . . . .	152
<b>3.4</b>	<b>Conclusion.</b> . . . . .	<b>176</b>

---

## 3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de constituer une base expérimentale sur le comportement axial et multiaxial des AMF couplé avec un suivi de la cinétique de transformation de phase. Ceci est dans l'intention de comprendre le comportement et la cinétique de transformation de phase dans ce type d'alliages. Cette base servira à alimenter et valider des modèles numériques relatifs à ce type de matériaux.

Dans la première section, une étude expérimentale du comportement thermomécanique d'un alliage à mémoire de forme à base de fils de CuAlBe est exposée. Nous présentons cet AMF ainsi que le matériel d'essai. Par ailleurs, nous développons notre technique de dosage de phase qui nous permet d'atteindre un dosage de phase dans des états biphasés (austénite, martensite orientée/ martensite thermique, martensite orientée) et triphasés (austénite, martensite thermique et martensite orientée) dans nos essais. Nous présentons des résultats originaux, plus particulièrement, dans l'état triphasé qui a été peu abordé dans la littérature.

Dans la seconde section, nous présentons le matériel et la technique expérimentale utilisée aussi que la méthode de dosage de phase relative aux éprouvettes tubulaires. Encore, nous montrons des résultats originaux de trajets de chargements proportionnels et non proportionnels isothermes réalisés sur des éprouvettes tubulaires de CuAlBe. En conséquence, une validation de la relation linéaire entre la déformation de transformation équivalente et le taux de la martensite formée, dans des chargements proportionnels et non proportionnels, sera réalisée.

## 3.2 Sollicitations uniaxiales et suivi de transformation de phase

Les AMF peuvent contenir une phase, deux phases et, dans certains cas de chargements thermomécaniques, trois phases. Ce dernier cas peut avoir lieu dans le chargement d'effet mémoire assisté par exemple.

Dans cette section, nous avons caractérisé le comportement uniaxial d'un alliage à mémoire de forme de CuAlBe avec un suivi de la transformation de phase. Ainsi, nous réalisons un dosage de phase de ce matériau dans un état biphasé où deux phases parmi l'austénite, la martensite thermique et la martensite orientée peuvent être présentes. Aussi, nous réalisons le dosage de phase dans un état triphasé où les trois phases déjà citées peuvent constituer le matériau. Ce dernier cas de dosage triphasé a été rarement abordé dans la littérature [46].

### 3.2.1 Matériau

Dans les essais de cette section, nous avons utilisé des éprouvettes filaires d'un diamètre de 1 mm à base d'AMF de CuAlBe martensitique à température ambiante. Les températures de transformation de phase de ce matériau sont présentées dans le tableau 3.1 de la page 113.

### 3.2.2 Moyens d'essai

Les essais thermomécaniques ont été réalisés en exploitant la même machine électromécanique universelle Zwick ainsi que l'enceinte thermique utilisée dans la section 2.2. Cette machine est dotée d'une cellule d'effort d'une gamme de 500 N. Le même extensomètre epsilon 3550 est utilisé, mais, cette fois-ci avec des lames adaptées aux éprouvettes filaires afin de mesurer la déformation axiale  $\varepsilon$ . Le matériau est déformé avec une faible vitesse qui est de  $10^{-3} \%s^{-1}$  pour éviter l'auto-échauffement des éprouvettes [84]. Une vitesse de déformation élevée cause une augmentation de la température de l'éprouvette influençant la transformation de phase. La température de l'éprouvette est mesurée sur le corps de celle-ci avec deux thermocouples de type K.

Une vitesse de refroidissement de  $2 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$  a été choisie dans les essais non isothermes.

Concernant la résistance électrique de l'éprouvette, elle est mesurée avec la technique de quatre points. Pour ce faire, l'éprouvette doit être isolée électriquement des mors de la machine et de son extensomètre. Par conséquent, un carton isolant est placé entre les mors et des cales intermédiaires qui serrent l'éprouvette. De même, du téflon a été mis entre les lames de l'extensomètre et l'éprouvette.

Avant de présenter les essais réalisés ainsi que leurs résultats, une présentation de la méthode de dépouillement de la tension est présentée.

### 3.2.3 Exploitation des mesures de résistance électrique

Plusieurs études se sont focalisées sur la réalisation du dosage de phase dans un état biphasé où aucune distinction n'est faite entre la martensite orientée et la martensite autoaccommodée. Pour aboutir à ce dosage, nous utilisons les résultats de plusieurs essais thermomécaniques. Aussi, nous présentons ci-dessous les calculs qui sont indispensables à cette opération :

L'évolution du taux des phases présentes dans le matériau est basée, dans cette étude, sur le suivi de la variation de la résistivité moyenne de l'éprouvette étudiée. Nous déduisons cette valeur en mesurant la tension de l'éprouvette par la méthode des quatre

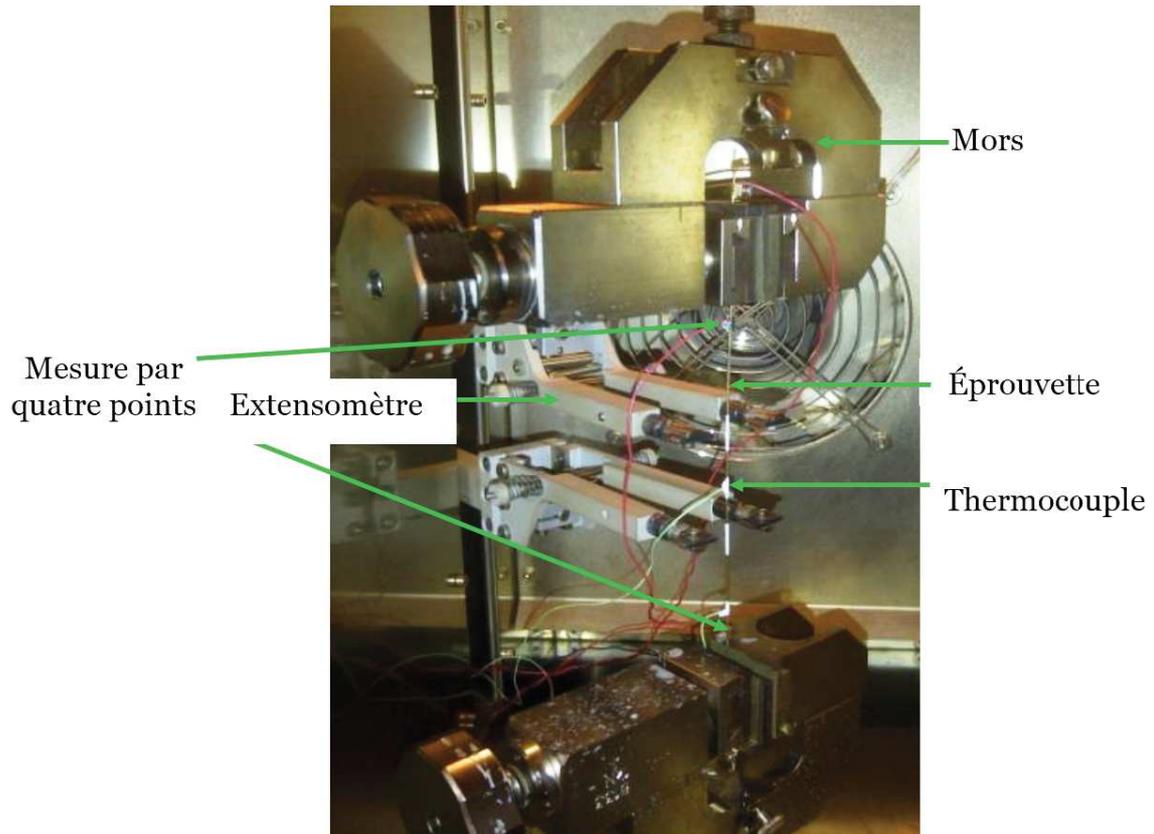


FIGURE 3.1 – Instrumentation d'un fil en CuAlBe.

points. En effet, la résistance électrique de l'échantillon,  $R$  est une fonction de la tension mesurée,  $U$  et du courant imposé,  $i$  :

$$R = \frac{U}{i} \quad (3.1)$$

La résistivité moyenne,  $\rho$ , de la zone de mesure de l'éprouvette située entre les deux fils de mesure de tension est donnée par la relation suivante :

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3.2)$$

En supposant que le volume de la zone étudiée est constant au cours de l'essai, nous écrivons :

$$V = V_0 = SL = S_0L_0 \quad (3.3)$$

En remplaçant  $S$  par sa valeur à partir de l'équation (3.3) en fonction de  $S_0$ ,  $L_0$  et  $L$ ,

nous obtenons,

$$\rho = \frac{US_0L_0}{iL^2} = \frac{US_0L_0}{i(L_0 + \Delta L)^2} \quad (3.4)$$

Ainsi, nous obtenons, la variation de la résistivité :

$$\rho = \frac{US_0}{iL_0(1 + \varepsilon)^2} \quad (3.5)$$

Par ailleurs, on observe expérimentalement que la résistivité d'une phase pure varie linéairement en fonction de la température (Figure 3.3, page 114). Cela nous amène à noter :

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho^A(T) = \rho_0^A + (T - T_0)\mu^A \\ \rho^{M_s}(T) = \rho_0^{M_s} + (T - T_0)\mu^{M_s} \\ \rho^{M_t}(T) = \rho_0^{M_t} + (T - T_0)\mu^{M_t} \end{array} \right. \quad (3.6)$$

$$\rho^{M_s}(T) = \rho_0^{M_s} + (T - T_0)\mu^{M_s} \quad (3.7)$$

$$\rho^{M_t}(T) = \rho_0^{M_t} + (T - T_0)\mu^{M_t} \quad (3.8)$$

Avec, d'une part  $M_t$  est la martensite thermique et  $M_s$  est la martensite orientée et d'une autre par  $\mu^A$ ,  $\mu^{M_t}$  et  $\mu^{M_s}$  sont respectivement les pentes de variation de la résistivité de l'austénite, de la martensite thermique et de la martensite orientée en fonction de la température.

Aussi, la résistivité globale est supposée suivre la loi de mélange :

$$\rho = (1 - z_s - z_t)\rho^A(T) + z_s\rho^{M_s}(T) + z_t\rho^{M_t}(T) \quad (3.9)$$

Avec  $z_s$  et  $z_t$  sont, respectivement, les fractions volumiques de martensite orientée et thermique. Dans l'opération de dosage de phase que nous réalisons, nous distinguons deux cas :

- Un état dit biphasé : dans cet état, seules deux phases parmi l'austénite, la martensite autoaccommodée et la martensite orientée peuvent être présentes dans le matériau ;
- Un état triphasé : dans ce deuxième cas, les trois phases, à savoir la phase austénitique, la phase martensitique autoaccommodée et la phase martensitique orientée, peuvent être présentes.

Après présentation des calculs indispensables à la caractérisation de la résistivité du matériau, nous présentons les résultats des essais réalisés.

### 3.2.4 Résultats expérimentaux

Des essais uniaxiaux ont été effectués pour réaliser le dosage de phase des éprouvettes dans un état biphasé et triphasé. Dans un premier temps, nous déterminons l'évolution de la résistivité de chaque phase en fonction de la température. Dans un deuxième temps, nous réalisons des essais de superélasticité pour illustrer le comportement superélastique des AMF et pour réaliser un dosage de phase dans un état biphasé. Dans un troisième temps, nous réalisons un essai de pseudoplasticité pour illustrer le comportement pseudoplasticité de notre matériau et effectuer le dosage de phase où la martensite thermique et la martensite orientée existent. Nous finissons par la présentation du dosage de phase dans un cas triphasé dans des essais montrant la propriété d'effet mémoire assisté des AMF.

#### 3.2.4.1 Essai de dilatométrie

Les résistivités de la phase martensitique et de la phase austénitique aussi que les températures de début et de fin de transformation de ces deux phases sont parmi les propriétés des AMF. Ces températures peuvent être déterminées par la technique de mesure de résistivité électrique dans un essai de dilatométrie [32, 45, 62] ou par la DSC (Differential Scanning Calorimetry) [27, 32].

Ainsi, nous réalisons un essai de dilatométrie sur une éprouvette filaire en CuAlBe. Cet essai sert à déterminer l'évolution des résistivités de l'austénite  $\rho_A$  et de la martensite thermique notée  $\rho_{M_t}$  en fonction de la température. Les températures de transformation de l'austénite ( $A_s$ ,  $A_f$ ) et de la martensite ( $M_s$ ,  $M_f$ ) sont aussi déterminées à partir de cet essai.

Pour ce faire, nous refroidissons l'éprouvette sous contrainte nulle d'une température de 125 °C à une température de 22 °C. Puis nous la réchauffons pour atteindre une température de 125 °C. En parallèle de ce chargement thermique, la variation de la tension de l'éprouvette est mesurée (Figure 3.2). Nous déduisons de cette dernière la variation de la résistivité de l'échantillon en fonction de la température en la calculant avec l'équation (3.5). Cette dernière variation est illustrée sur la figure 3.3.

Par ailleurs, nous déduisons les températures de transformation résumées dans le tableau 3.1. Ce sont des températures auxquelles, la pente de la variation linéaire de la résistivité du matériau change.

TABLE 3.1 – Températures de transformation des éprouvettes filaires en CuAlBe.

Température de transformation	$M_s$	$M_f$	$A_s$	$A_f$
Valeur (°C)	75	49	80	98

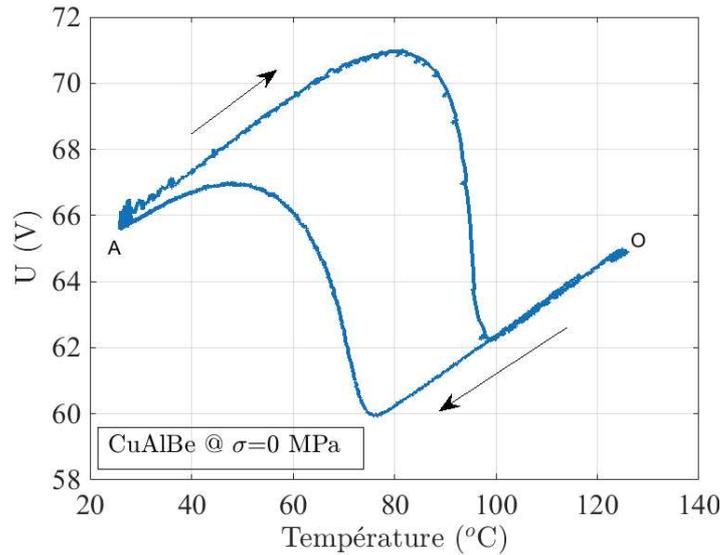


FIGURE 3.2 – Variation de la tension au cours d’un cycle thermique réalisé sur un fil en CuAlBe.

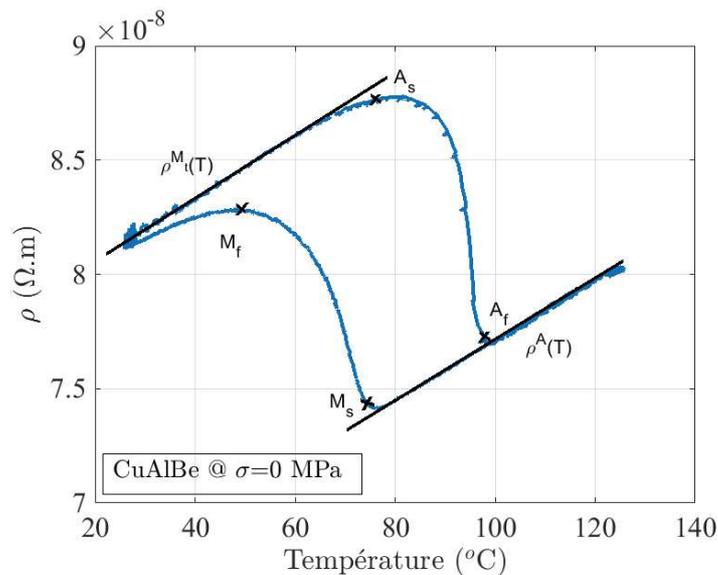


FIGURE 3.3 – Variation de la résistivité au cours d’un cycle thermique réalisé sur un fil en CuAlBe.

Nous déduisons les résistivités des phases austénitique et martensitique thermique à partir des pentes de la courbe. Lorsque l’éprouvette est refroidie à une température de début de transformation martensitique  $M_s$ , le matériau commence à se transformer en martensite. Il devient dans un état biphasé où l’austénite et la martensite thermique existent. En continuant le refroidissement, le matériau continue à se transformer, jusqu’à atteindre un état martensitique pur à  $M_f$ . Inversement, la résistivité du matériau évolue linéairement en fonction de la température au cours du chauffage tant que la

température est inférieure à celle de début de transformation austénitique  $A_s$ , puisqu'il reste dans un état complètement martensitique. Cette évolution caractérise la résistivité de la martensite thermique ( $M_t$ ). Lorsque la température atteint  $A_s$ , le début d'une transformation de phase caractérisée par une diminution de la résistivité commence. Le matériau se transforme d'un état à base de martensite induite thermiquement à un état biphasé à base d'austénite et de  $M_t$  et atteint à la température de fin de transformation austénitique  $A_f$  un état austénitique pur. Par conséquent, la pente de résistivité redevient linéaire caractérisant de cette façon la variation de la résistivité de l'austénite en fonction de la température.

Ainsi, ce premier essai nous permet de déterminer l'évolution de la résistivité de l'austénite et de la martensite induite thermiquement en fonction de la température.

Nous rappelons la loi de mélange utilisée.

$$\rho = (1 - z_s - z_t)\rho^A(T) + z_s\rho^{M_s}(T) + z_t\rho^{M_t}(T) \quad (3.10)$$

Dans ce cas et en l'absence de contrainte, la fraction volumique de martensite orientée est nulle. Alors, nous déduisons la valeur de  $z_t$  en remplaçant  $z_s$  par 0 dans l'équation 3.10.

Nous obtenons les valeurs de  $z_t$  et de  $z_s$  suivant les équations ci-dessous.

$$\left\{ \begin{array}{l} z_t = \frac{\rho - \rho^A(T)}{\rho^{M_t}(T) - \rho^A(T)} \\ z_s = 0 \\ z_a = 1 - z_t \end{array} \right. \quad (3.11)$$

$$(3.12)$$

$$(3.13)$$

La détermination de la variation de résistivité de l'austénite et de la martensite thermique en fonction de la température permet, en exploitant les relations (3.11), (3.12) et (3.13) dans le cas du dosage de phase dans un état biphasé, d'obtenir les courbes de dosage de phase mentionnées sur la figure 3.4. Lorsqu'on refroidit l'éprouvette, la transformation de l'austénite en martensite commence à  $M_s$  et se termine à  $M_f$  où la microstructure du matériau redevient martensitique.

À une température inférieure à  $A_s$  le matériau est totalement martensitique; le taux de la martensite est égal à 1. Au fur et à mesure que la température dépasse  $A_s$ , le matériau se transforme en un état mixte où la martensite autoaccommodée et l'austénite existent. Arrivant à une température supérieure à  $A_f$  le matériau devient totalement austénitique; le taux de l'austénite est égal à 1 ( $z_a = 1$ ). Tandis que le taux de la martensite autoaccommodée devient nul ( $z_t = 0$ ).

Ainsi, la détermination de l'évolution de la résistivité de l'austénite et de la martensite

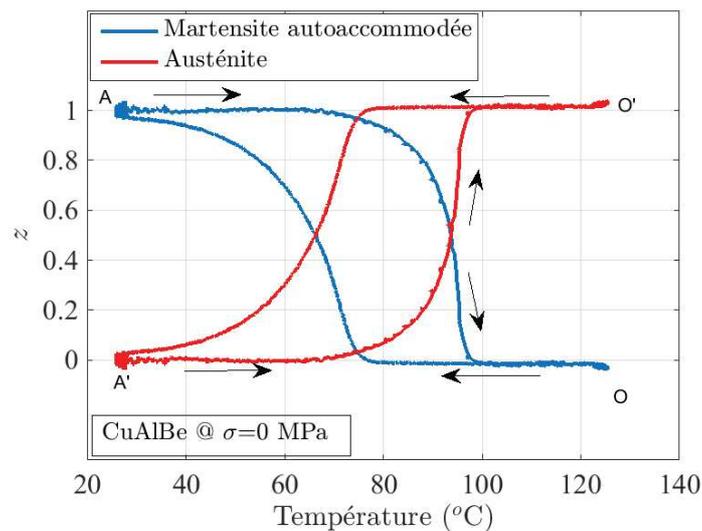


FIGURE 3.4 – Variation de la fraction volumique de l'austénite et de la martensite autoaccommodée durant un cycle thermique appliqué sur un fil en CuAlBe.

thermique, nous permet d'aboutir au dosage de phase dans les essais thermomécaniques que nous présenterons.

### 3.2.4.2 Essai de superélasticité

Nous avons réalisé un essai de traction à  $120^{\circ}\text{C}$  sur une éprouvette filaire en CuAlBe. Nous commençons par le chauffage de l'éprouvette pour finir avec un chargement en traction puis un déchargement (Figure 3.5).

Nous présentons dans la figure 3.6 le comportement superélastique du matériau et l'évolution de la tension de l'éprouvette mesurée avec la méthode de mesure par quatre points.

Vu que la température de l'essai est supérieure à  $A_f$ , alors, l'éprouvette de cet essai, se trouve dans un état austénitique. Le comportement élastique, au départ de l'essai, est relatif à la déformation élastique de l'austénite. Le changement de la pente du comportement du matériau est le signe d'une transformation de phase. Pendant la décharge de la traction, une transformation inverse est produite dans le matériau. Le comportement du matériau redevient élastique sans aucune déformation résiduelle. Ainsi, nous mettons en évidence l'effet de superélasticité dans celui-ci.

Nous calculons à partir de la tension mesurée, l'évolution de la résistivité de notre éprouvette que nous présentons dans la figure 3.7. Nous exploitons ainsi, la loi des mélanges (Équation (3.9)) en considérant que seule la martensite orientée peut se former dans ses conditions d'essai. Chose que nous avons montrée ci-dessus. De ce fait, nous considérons que la fraction volumique de martensite  $z_t$  est nulle.

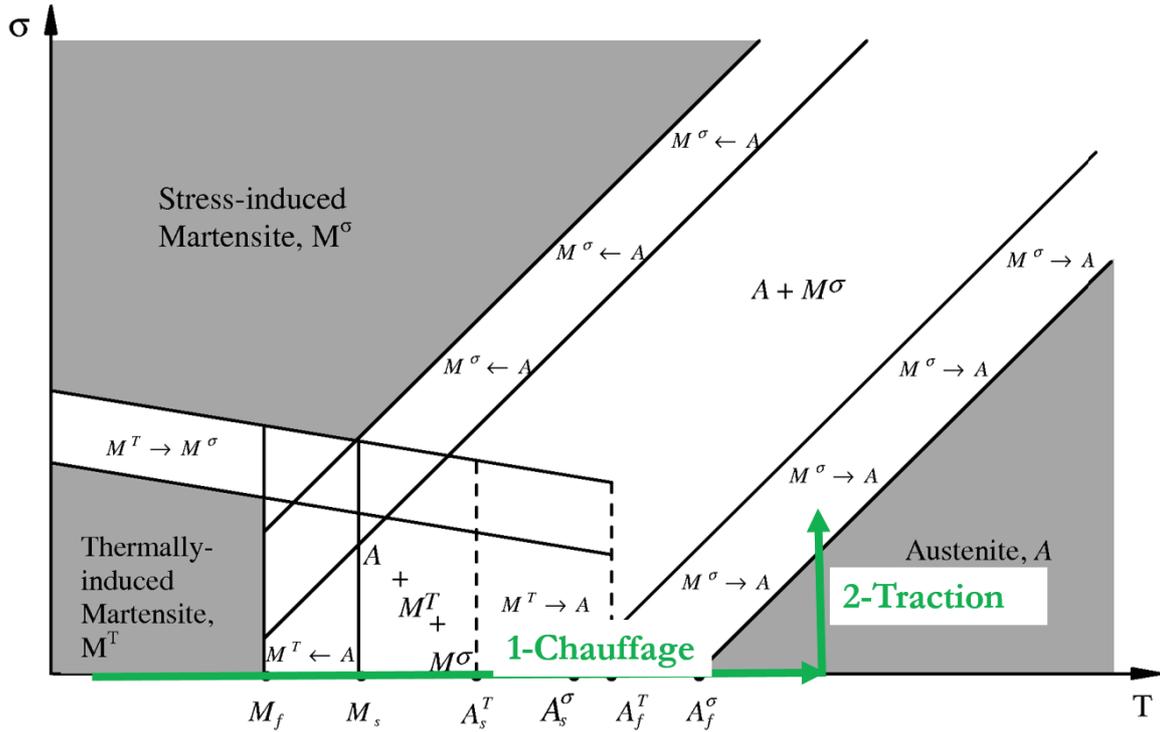


FIGURE 3.5 – Trajet de chargement thermomécanique dans le pseudodiagramme d'état pour un essai de superélasticité à 120 °C.

À partir de ces conditions, nous obtenons le dosage de phase dans un état biphasé où l'austénite et la martensite orientée sont les deux phases qui peuvent être présentes en utilisant la loi de mélange (Équation (3.14)).

$$\rho = (1 - z_s - z_t)\rho^A(T) + z_s\rho^{M_s}(T) + z_t\rho^{M_t}(T) \quad (3.14)$$

Puisque  $z_t = 0$ , nous déduisons les équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} z_s = \frac{\rho - \rho^A(T)}{\rho^{M_s}(T) - \rho^A(T)} \end{array} \right. \quad (3.15)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_t = 0 \end{array} \right. \quad (3.16)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_a = 1 - z_s \end{array} \right. \quad (3.17)$$

Vu que nous n'avons pas pu mesurer l'évolution de la résistivité de la martensite orientée, nous supposons que la variation de la résistivité de la martensite orientée  $\rho_{M_\sigma}$  à la même pente que celle de la martensite thermique  $\rho_{M_t}$ , nous notons  $\mu^{M_t} = \mu^{M_s}$ .

En exploitant les équations (3.15) et (3.17), nous trouvons l'évolution de la fraction volumique de martensite orientée et de l'austénite. La figure 3.8 montre l'évolution du taux de la martensite orientée et de l'austénite. Cette martensite qui est créée par la transformation de l'austénite suite à la contrainte de traction appliquée. Nous obtenons

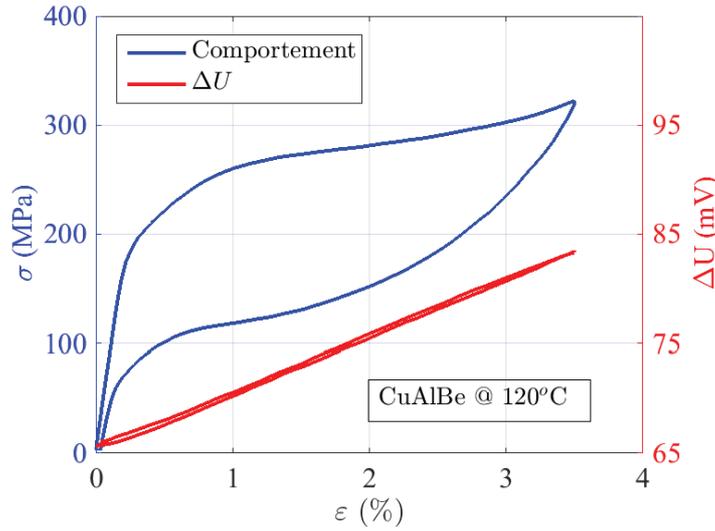


FIGURE 3.6 – Évolution de la contrainte et de la tension en fonction de la déformation pour un essai de superélasticité à 120 °C.

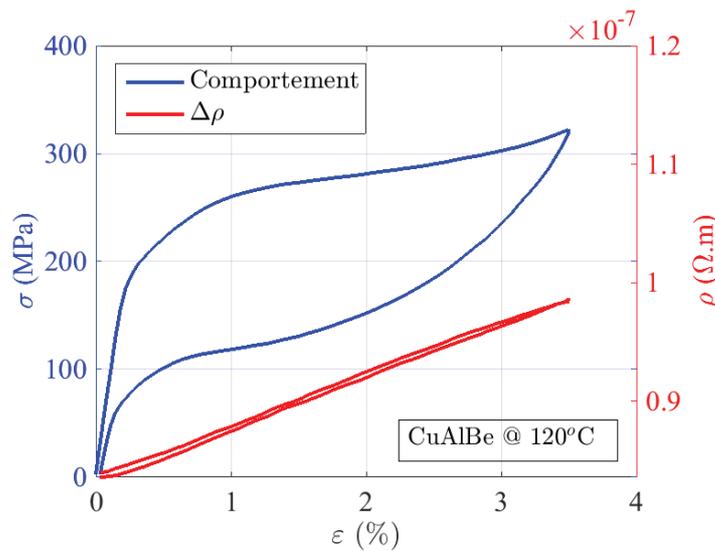


FIGURE 3.7 – Évolution de la contrainte et de la résistivité de l'éprouvette en fonction de la déformation pour un essai de superélasticité à 120 °C.

un taux de 0,55 de martensite pour une déformation de transformation de 2.8 %. Le taux de la martensite autoaccommodée est nul durant cet essai.

Par conséquent, nous avons réalisé le dosage de phase de nos éprouvettes dans un essai de superélasticité. Nous en déduisons que la fraction volumique de martensite orientée obéit à la relation de linéarité.

$$z_s = \frac{\varepsilon^{tr}}{\gamma}$$

Après vérification de la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite

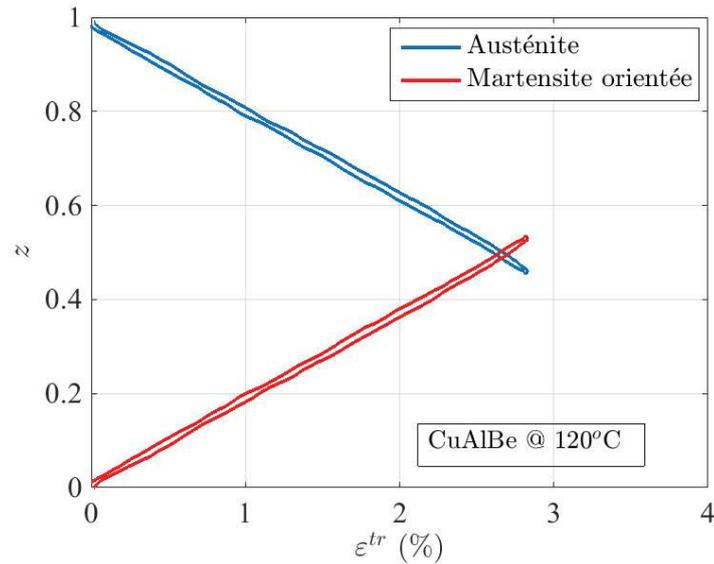


FIGURE 3.8 – Dosage de phase pour un essai de superélasticité sur un fil en CuAlBe.

orientée et la déformation de transformation dans un essai superélastique, nous nous focaliserons sur la vérification de cette relation dans d'autres types de chargements thermomécaniques.

### 3.2.4.3 Essai de pseudoplasticité

La pseudoplasticité est un aspect du comportement mécanique des AMF. Ce phénomène se produit à des températures inférieures à la température  $M_f$ . Dans ce cas, le matériau est initialement dans un état martensitique induit thermiquement.

Cet essai de pseudoplasticité sur un AMF de CuAlBe est réalisé pour montrer l'évolution de la fraction volumique de martensite induite par la contrainte en fonction de la déformation de réorientation.

Nous avons réalisé un essai de pseudoplasticité à une température de 0 °C ( $0\text{ °C} < M_f$ ) où notre matériau est composé de martensitique induite thermiquement.

Ainsi, nous refroidissons l'éprouvette à une température de 0 °C puis nous appliquons un chargement et un déchargement en traction (Figure 3.9).

À la suite de l'application d'une contrainte, la martensite est orientée et au bout du compte, nous obtenons de la martensite induite par la contrainte. L'évolution de la contrainte  $\sigma$  et de la résistivité électrique en fonction de la déformation axiale sont représentées sur la figure 3.10.

En effet, la martensite se déforme avec une pente élastique jusqu'à atteindre le point où la déformation devient pseudoplastique. Durant la décharge, le matériau garde sa déformation pseudoplastique.

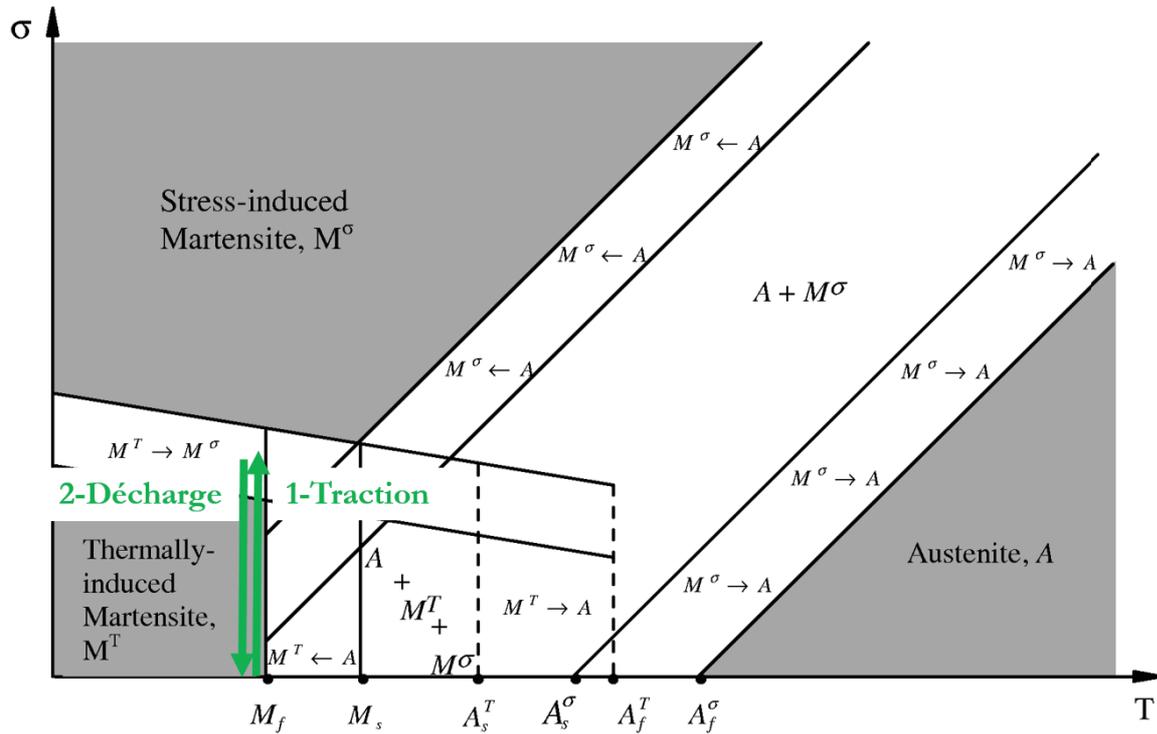


FIGURE 3.9 – Trajet de chargement thermomécanique dans le pseudodiagramme d'état dans un essai de pseudoplasticité à 0 °C.

Une réorientation de  $M_t$  en  $M_\sigma$  est activée durant le chargement en traction. Pendant le déchargement, la transformation  $M_\sigma$  en  $M_t$  est probablement légèrement activée. Cela engendre la présence d'une déformation résiduelle ou pseudoplastique à la fin de l'essai.

Dans cet essai, nous réalisons un dosage de phase dans un état biphasé où la martensite thermique avec de la martensite orientée peuvent être présentes. Ainsi, nous obtenons les relations de dosage de phase à partir de la loi de mélange (Équation 3.18) :

$$\rho = (1 - z_s - z_t)\rho^A(T) + z_s\rho^{M_s}(T) + z_t\rho^{M_t}(T) \quad (3.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_s = \frac{\rho - \rho^{M_t}(T)}{\rho^{M_s}(T) - \rho^{M_t}(T)} \end{array} \right. \quad (3.19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_t = 1 - z_s \end{array} \right. \quad (3.20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} z_a = 0 \end{array} \right. \quad (3.21)$$

Par conséquent, nous obtenons la courbe de dosage de phase (Figure 3.11) dans un état biphasé où la martensite thermique de même que la martensite orientée sont présentes.

Nous notons que la fraction volumique de martensite induite par la contrainte

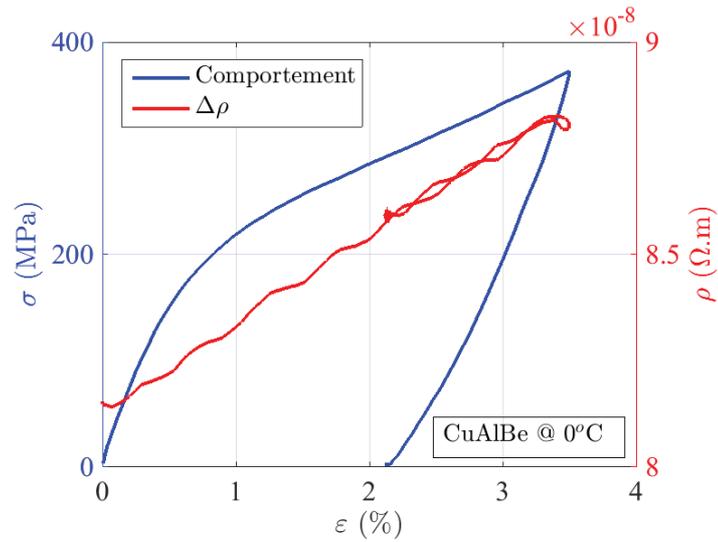


FIGURE 3.10 – Évolution de la contrainte et de la résistivité en fonction de la déformation dans un essai de pseudoplasticité à 0 °C.

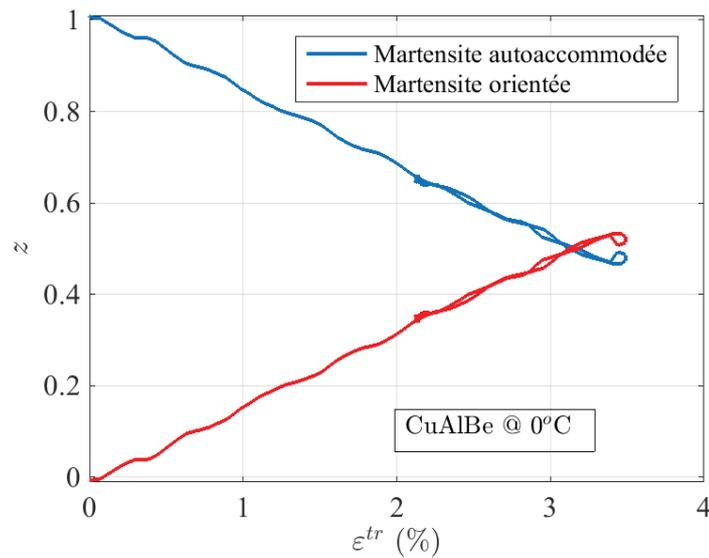


FIGURE 3.11 – Dosage de phase en fonction de la déformation dans un essai de pseudoplasticité à 0 °C.

augmente linéairement par rapport à la déformation de réorientation (Figure 3.11). Inversement, le taux de la martensite autoaccommodée diminue. Une bonne partie de la martensite orientée reste durant la décharge.

Nous avons réalisé le dosage de phase de nos éprouvettes dans un essai de pseudoplasticité. Nous concluons aussi que la fraction volumique de martensite orientée obéit à la relation de linéarité suivante.

$$z_s = \frac{\varepsilon^{tr}}{\gamma}$$

Nous avons réalisé le dosage de phase dans un cas biphasé dans deux chargements en traction distincts. Dans l'essai de superélasticité, la fraction volumique de l'austénite et de la martensite orientée a été déterminée. Par similitude, l'évolution du taux de la martensite orientée et de la martensite thermique a été caractérisée lors d'un essai de pseudoélasticité.

Nous avons conclu comme le montrent les figures 3.8 et 3.11 que la fraction volumique de la martensite orientée évolue linéairement en fonction de la déformation de transformation.

Dans certaines conditions d'utilisation, l'effet mémoire de forme des AMF est mis en application comme nous l'avons cité dans le chapitre 1. Dans ce type de chargement thermomécanique, on obtient un état où les trois phases, à savoir, de l'austénite, de la martensite orientée et de la martensite thermique peuvent coexister. Il en découle l'intérêt de réaliser ce type de dosage de phase.

#### 3.2.4.4 Essais d'effet mémoire assisté

Nous réalisons des essais à effet mémoire assisté à différents niveaux de contrainte (55, 130 et 250 MPa). Le pseudo-diagramme d'état de la figure 3.12 illustre le trajet de chargement appliqué dans ces essais.

Dans ce type de chargement, de l'austénite, de la martensite orientée et de la martensite thermique peuvent être présentes simultanément dans le matériau testé. En effet, de la martensite orientée est créée sous la contrainte appliquée lorsque la température baisse. Aussi, un taux de l'austénite est transformé en martensite autoaccommodée lorsqu'on continue le refroidissement et en atteint la température de début de transformation  $M_s$ . Par ailleurs, une partie de l'austénite non transformée reste aussi dans le matériau. Sous contrainte, une opération de chauffage cause la transformation inverse de la martensite autoaccommodée et de la martensite orientée en austénite. Cela nécessite un dosage de phase de cet état triphasé lors d'un chargement à effet mémoire de forme.

Dans cet essai, nous chauffons l'éprouvette à 150 °C afin d'avoir un matériau dans un état austénitique pur. En effet, cette opération de chauffage cause la transformation de la martensite autoaccommodée en austénite. Une contrainte de traction, inférieure à celle de début de transformation martensitique, est alors appliquée sur l'éprouvette et gardée constante le long de cet essai anisotherme (Figure 3.13).

L'application d'un chargement thermique dans le domaine de transformation de phase sur une éprouvette en AMF soumise à une contrainte permet d'illustrer l'effet mémoire

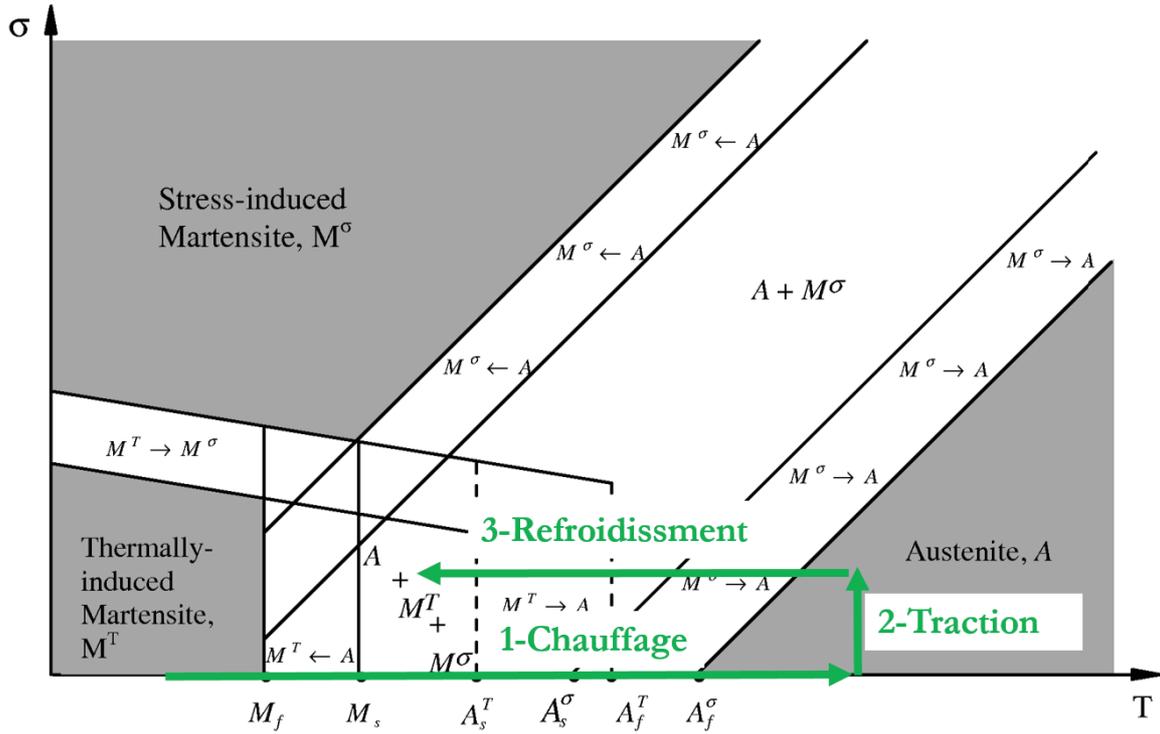


FIGURE 3.12 – Illustration de l'effet mémoire de forme.

de forme de ce type de matériau. Dans l'essai illustré sur la figure 3.13 la contrainte de traction appliquée sur l'éprouvette est de 55 MPa. Cette transformation de phase produit une déformation réversible de 1.5 %.

Après vérification de l'hypothèse de linéarité entre la fraction volumique de martensite orientée et la déformation de transformation :  $z_s = \frac{\varepsilon^{tr}}{\gamma}$  dans les essais précédents, nous déterminons le dosage de phase dans un cas triphasé où l'austénite, la martensite orientée et la martensite thermique peuvent coexister.

Nous développons les calculs réalisés afin d'obtenir le dosage de phase dans ce type de chargement.

En élasticité, nous avons ;

$$\sigma = E\varepsilon^e \quad (3.22)$$

Avec  $E$  le module de Young total du matériau obtenu par une loi de mélange ;

$$E = (1 - z_s - z_t)E^A + z_s E^{M_s} + z_t E^{M_t} \quad (3.23)$$

et la déformation totale donnée par :

$$\varepsilon^e = \varepsilon - \varepsilon^{tr} - \varepsilon^{th} \quad (3.24)$$

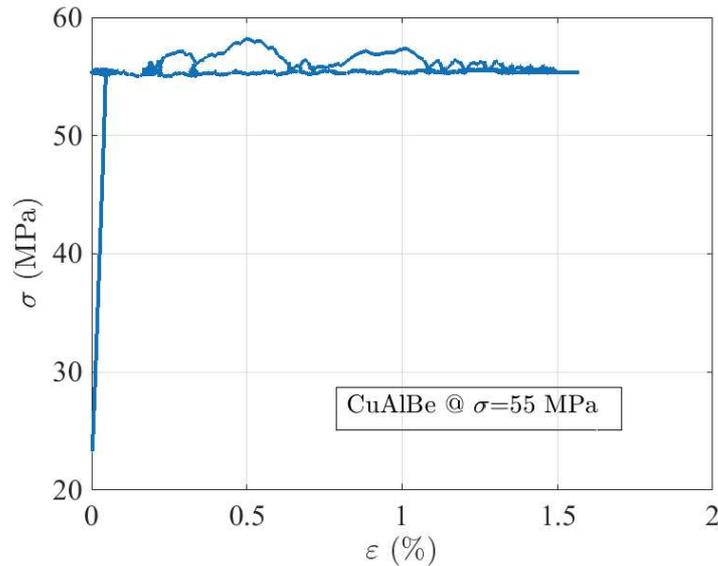


FIGURE 3.13 – Évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans un essai d'effet mémoire assisté à 55 MPa.

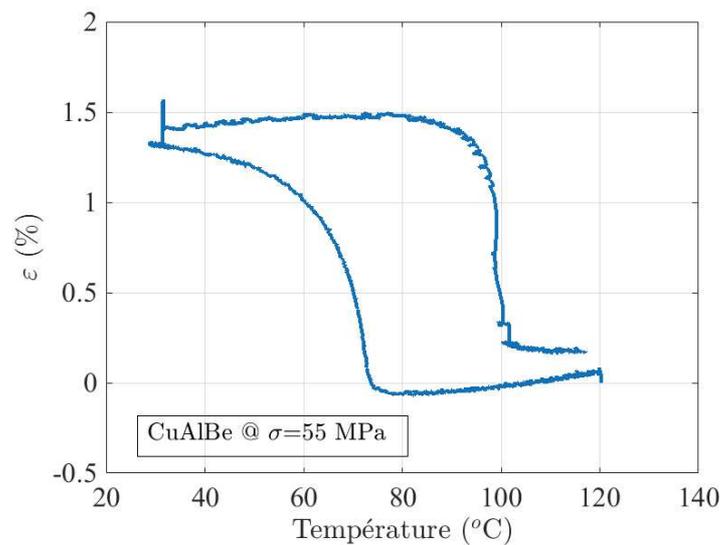


FIGURE 3.14 – Évolution de la déformation en fonction de la température dans un essai d'effet mémoire assisté à 55 MPa.

Avec  $\varepsilon^{th} = \alpha T$  tel que  $\alpha$  est le coefficient de dilatation thermique de notre matériau déterminé lors de l'essai de dilatométrie.

Nous avons :

$$E^{M_s} = E^{M_t} = E^M \quad (3.25)$$

À partir de la loi de mélange (Équation (3.26)),

$$\rho = (1 - z_s - z_t)\rho^A(T) + z_s\rho^{M_s}(T) + z_t\rho^{M_t}(T) \quad (3.26)$$

Nous obtenons la valeur de la fraction volumique de martensite thermique :

$$z_t = \frac{\rho + (z_s - 1)\rho^A - z_s\rho^{M_s}}{\rho^{M_t} - \rho^A} \quad (3.27)$$

En remplaçant  $E^{M_s}$ ,  $E^{M_t}$  par  $E^M$  et en remplaçant par l'équation 3.24 et l'équation 3.27 dans l'équation 3.22, nous obtenons la relation suivante.

$$(\varepsilon - \varepsilon^{tr} - \varepsilon^{th}) \left( \left( 1 - \frac{\rho - \rho^A}{\rho^{M_t} - \rho^A} \right) E^A + \frac{\rho - \rho^A}{\rho^{M_t} - \rho^A} E^M + \left( 1 - \frac{\rho^{M_s} - \rho^A}{\rho^{M_t} - \rho^A} \right) \frac{E^M - E^A}{\gamma} \varepsilon^{tr} \right) = \sigma \quad (3.28)$$

Soient  $a$  et  $b$  tels que

$$(\varepsilon - \varepsilon^{tr} - \varepsilon^{th}) (a + b\varepsilon^{tr}) = \sigma \quad (3.29)$$

Alors

$$\varepsilon^{tr} = \frac{\sqrt{(a - b(\varepsilon - \varepsilon^{th}))^2 - 4b(\sigma - a(\varepsilon - \varepsilon^{th}))} - (a - b(\varepsilon - \varepsilon^{th}))}{2b} \quad (3.30)$$

Enfin, nous obtenons la valeur de la fraction volumique de martensite thermique en fonction de la martensite orientée.

$$z_t = \frac{\rho - \rho^A(T) - z_s(\rho^{M_s}(T) - \rho^A(T))}{\rho^{M_t}(T) - \rho^A(T)} \quad (3.31)$$

Ainsi, en exploitant la mesure de la résistivité du matériau au cours de l'essai et la linéarité entre la fraction volumique de martensite orientée et la déformation de transformation équivalente, démontrée dans les essais précédents, nous obtenons la variation de la fraction volumique de la martensite thermique (Figure 3.15).

Dans cet essai, une opération de dosage de phase triphasé est réalisée. Le passage d'un état austénitique à un état martensitique, où deux types de martensite existent, est réalisé en exploitant les relations de dosage de phase (Figure 3.15). Les valeurs qui sont inférieures à 0 sont dues à la chute de tension observée dans la zone où la martensite thermique atteint un taux approximatif de 0,8.

Nous réalisons, un deuxième essai de dosage de phase à une contrainte plus élevée de 130 MPa (Figure 3.16).

Pour l'essai réalisé à 130 MPa, nous obtenons l'évolution de la déformation en fonction de la température (Figure 3.17).

Aussi, nous obtenons le dosage de phase dans un cas où l'austénite, la martensite thermique et de la martensite orientée existent. Nous affichons dans la figure 3.18

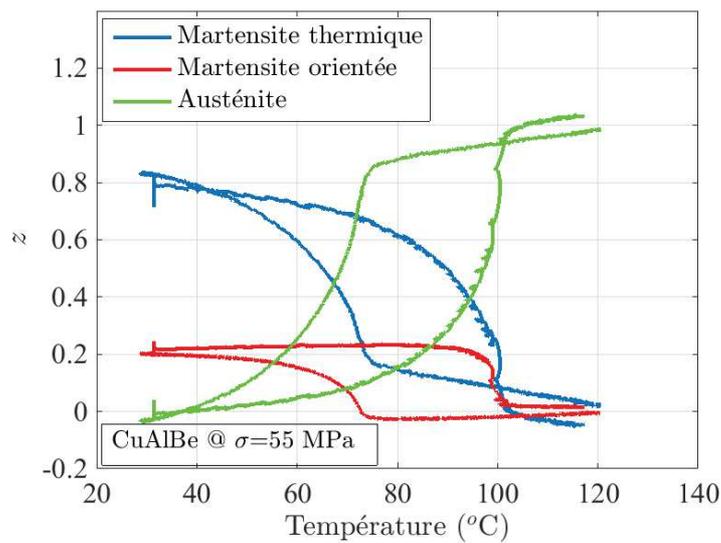


FIGURE 3.15 – Évolution de la fraction volumique de la martensite orientée et de la martensite autoaccommodée en fonction de la température dans un essai d'effet mémoire assisté à 55 MPa.

l'évolution de l'austénite, de la martensite orientée et de la martensite thermique en fonction de la température.

Les valeurs négatives de la fraction volumique observées lors du dosage de phase sont dues à des chutes de tension lors de l'essai.

Le même essai d'effet mémoire est réalisé à une contrainte de 250 MPa. Après chauffage de l'éprouvette à une température supérieure à  $A_f$ , une contrainte en traction

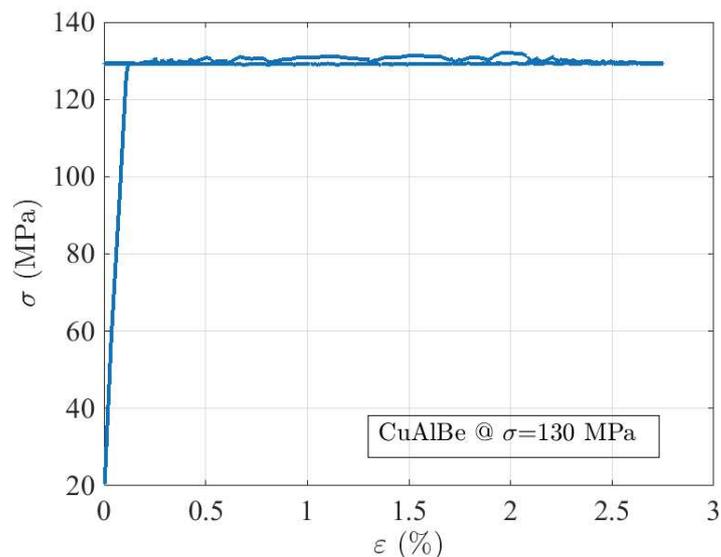


FIGURE 3.16 – Évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans un essai d'effet mémoire assisté.

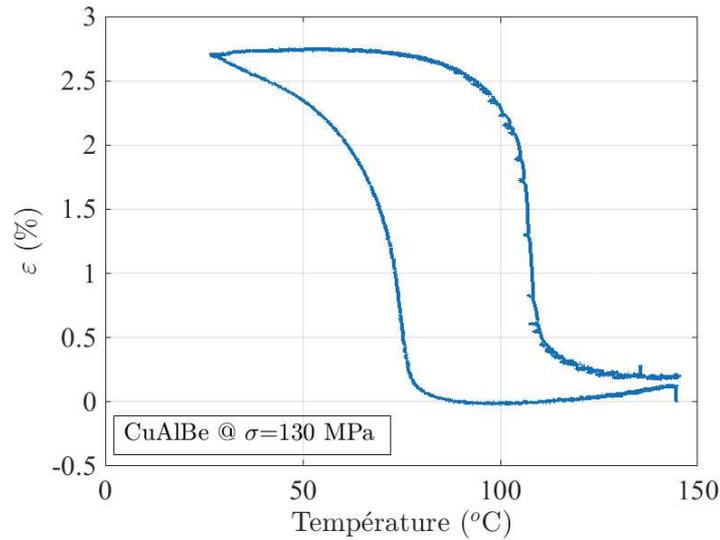


FIGURE 3.17 – Évolution de la déformation en fonction de la température dans un essai d'effet mémoire assisté à 130 MPa.

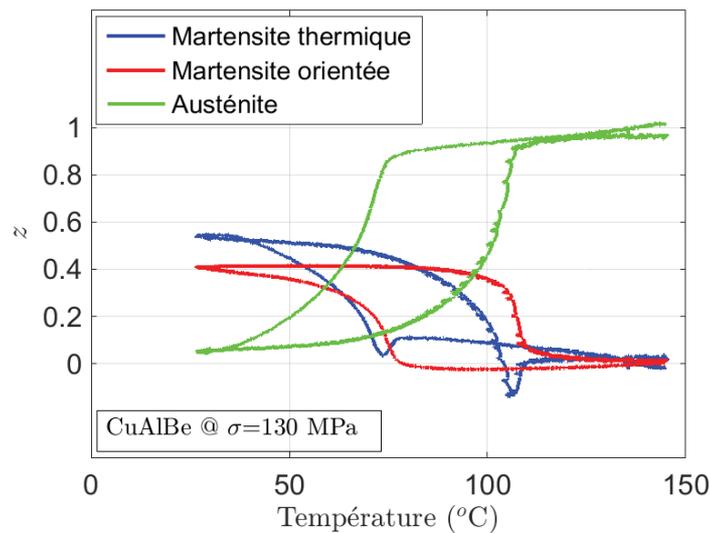


FIGURE 3.18 – Évolution de la fraction volumique de l'austénite, de la martensite orientée et de la martensite autoaccommodée en fonction de la température dans un essai d'effet mémoire assisté à 130 MPa.

est appliquée sur l'éprouvette (Figure 3.19). Celle-ci subit, par la suite un cyclage thermique à basse température. La figure 3.20 montre l'évolution de la déformation en fonction de la variation de la température. Nous observons que le matériau atteint une déformation importante de 5 % à peu près, lors de cet essai d'effet mémoire.

Ainsi, l'augmentation de la contrainte au départ, avant de lancer le refroidissement de l'éprouvette, favorise davantage la transformation de phase et par conséquent l'effet mémoire de forme.

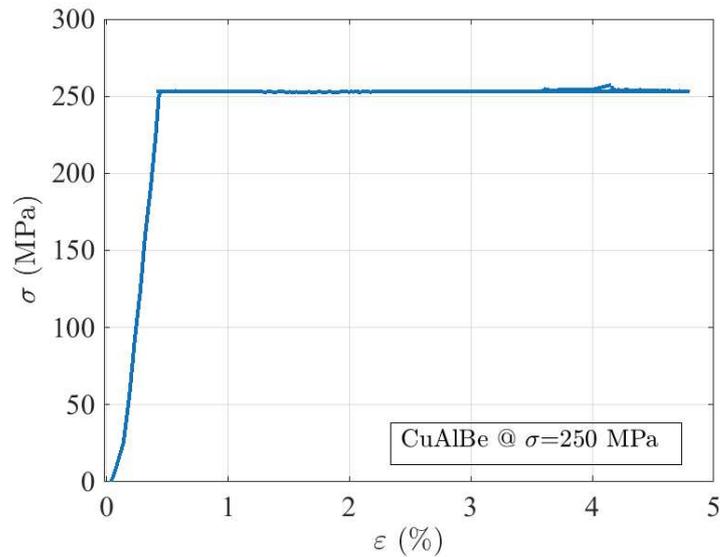


FIGURE 3.19 – Évolution de la contrainte en fonction de la déformation dans un essai d'effet mémoire assisté à 250 MPa.

Nous traçons l'évolution de la déformation en fonction de la température sur la figure 3.20.

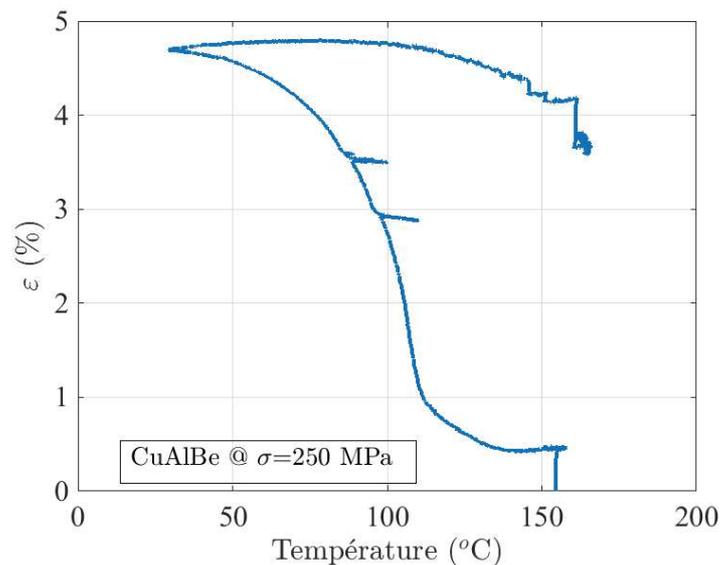


FIGURE 3.20 – Évolution de la déformation en fonction de la température dans un essai d'effet mémoire assisté 250 MPa.

Aussi, nous obtenons, l'évolution de l'austénite, de la martensite orientée et de la martensite thermique en fonction de la température (Figure 3.21). Le taux de la martensite orientée est supérieur dans cet essai au taux de la martensite thermique. Cela cause une déformation plus importante de l'éprouvette.

En somme, nous avons identifié les températures de transformation d'un alliage à

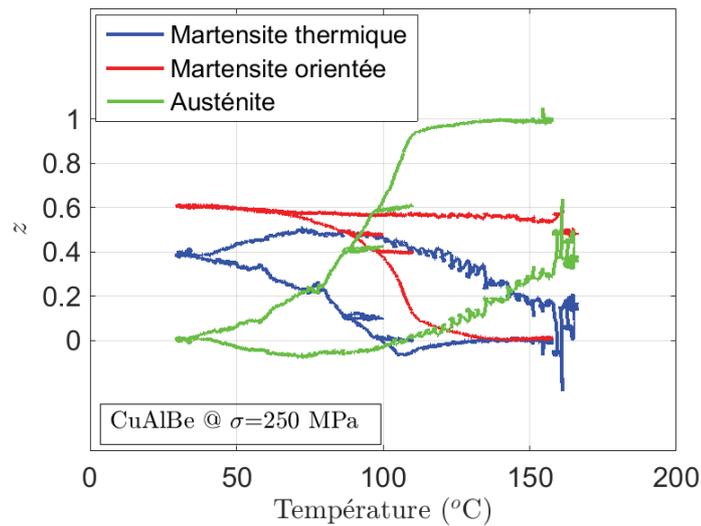


FIGURE 3.21 – Évolution de la fraction volumique de l’austénite et de la martensite orientée et de la martensite autoaccommodée en fonction de la température dans un essai d’effet mémoire assisté à 250 MPa.

mémoire de forme à base de CuAlBe ainsi que l’évolution des résistivités des phases austénitique, martensitique orientée et thermique en fonction de la température. Des essais thermomécaniques dans lesquels une opération de dosage de phase est réalisée, ont été effectués. Une détermination du taux de l’austénite, de la martensite thermique et de la martensite orientée a été obtenue pour des trajets de chargement de superélasticité et de pseudoélasticité. Une validation de la relation de linéarité entre la fraction volumique de martensite orientée et de la déformation de transformation est effectuée dans ces deux premiers types de chargements thermomécaniques. Ainsi, une opération de dosage de phase triphasé a été effectuée dans un essai d’effet mémoire assisté.

Ainsi, dans la section suivante, nous nous intéressons à un alliage du même type que celui étudié dans cette section, mais cette fois-ci dans un cadre multiaxial.