

Ce premier chapitre comporte deux parties. La première permet d'expliquer brièvement le comportement spécifique des Alliages à Mémoire de Forme et en particulier le comportement sous chargement cyclique, afin de présenter les différents problèmes rencontrés lors de ces chargements.

La seconde présente le fonctionnement de différents modèles de comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme proposés dans la littérature. Leur comparaison permettra de montrer les problèmes de la première partie qui ne sont pas encore pris en compte et auxquels nous tenterons de répondre dans les chapitres suivants.

1.1 Présentation des Alliages à Mémoire de Forme

Cette section a pour but de présenter rapidement les Alliages à Mémoire de Forme et en particulier leur comportement macroscopique sous chargement thermo-mécanique cyclique.

Tout d'abord nous allons présenter l'origine des spécificités des Alliages à Mémoire de Forme : la transformation de phase solide-solide appelée transformation martensitique par analogie avec les aciers. Cette présentation est relativement succincte mais il est possible de trouver des explications plus détaillées dans les références suivantes : Guélin (1980); Guenin et Gobin (1980); Wayman (1992); Patoor et Berveiller (1994); Berveiller et Fischer (1997); Otsuka et Wayman (1999) et Otsuka et Ren (1999).

Dans une seconde partie, nous présenterons un ensemble d'applications dont le principe de fonctionnement se base sur l'utilisation d'Alliages à Mémoire de Forme. La description de ces applications montrera qu'une grande majorité soumet un chargement cyclique à l'Alliage à Mémoire de Forme. Or c'est justement ce type de chargement qui entraîne la dégradation des propriétés des Alliages à Mémoire de Forme et parfois jusqu'à rupture.

Enfin le comportement des Alliages à Mémoire de Forme sous chargement thermo-mécanique cyclique sera donc étudié plus en détail afin de présenter les points particuliers du comportement pour ce type de chargement. Des déductions sur les mécanismes physiques mis en jeu seront faites afin d'orienter les essais qui seront mis en place par la suite.

1.1.1 Transformation martensitique dans les Alliages à Mémoire de Forme

Les Alliages à Mémoire de Forme tirent leurs propriétés d'un changement de phase displacif, c'est à dire sans diffusion d'atomes et donc de changement de composition chimique. La transformation de phase consiste en un mouvement de l'interface entre les phases. Elle est donc indépendante du temps, uniquement limitée par la vitesse de propagation qui ne peut dépasser la vitesse du son dans l'alliage. Elle se traduit par une déformation homogène du réseau cristallographique et n'entraîne pas de variation de volume (dans le cas des Alliages à Mémoire de Forme). Ces propriétés permettent donc d'avoir une transformation de phase quasiment instantanée et généralement réversible.

Les phases cristallographiques des Alliages à Mémoire de Forme sont respectivement appelées par analogie avec les aciers :

- martensite pour la phase à basse température,
- austénite pour la phase à plus haute température.

La transformation d'une phase de l'alliage à l'autre se fait sur une plage de température qui varie linéairement en fonction de la contrainte et qui dépend du sens de la transformation (austénite en martensite, ou martensite en austénite). Ces limites de transformation sont représentées sur le pseudo-diagramme d'état d'un Alliage à Mémoire de Forme, figure 1.1. Les températures caractéristiques (c'est-à-dire à contrainte nulle) de transformation sont notées :

- M_s^0 température de début de transformation directe (austénite en martensite),
- M_f^0 température de fin de transformation directe,
- A_s^0 température de début de transformation inverse (martensite en austénite),
- A_f^0 température de fin de transformation inverse.

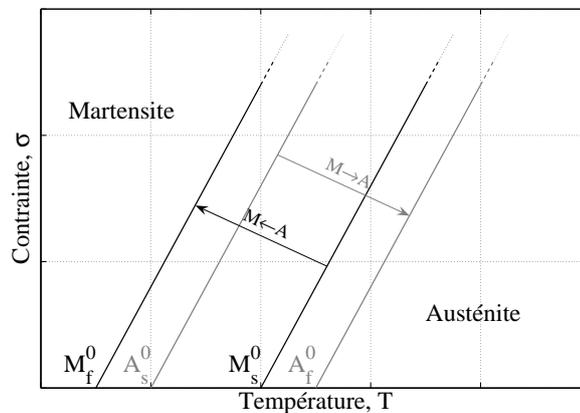


Figure 1.1 – Pseudo-diagramme d'état simplifié d'un Alliage à Mémoire de Forme.

L'interface commune entre les deux phases impose que la transformation soit liée à une déformation dite « à plan invariant ». Il en résulte que seules certaines déformations du réseau cristallographique sont acceptables. La martensite peut donc se présenter sous différentes formes appelées variantes.

Lorsque la transformation directe se fait sous une contrainte suffisamment élevée, seules les variantes les mieux orientées vont apparaître entraînant alors une déformation macroscopique. La martensite créée est alors appelée martensite orientée (figure 1.2a). Par contre, sans contrainte, les différentes variantes de martensite vont apparaître de manière à s'accommoder entre elles et à ne pas introduire de déformation macroscopique. La martensite créée est appelée martensite thermique ou auto-accommodée (figure 1.2b).

Lorsque la direction du chargement change, les variantes de martensite présentes dans le matériau vont se transformer en d'autres variantes mieux orientées. Ce phénomène est appelé la réorientation de la martensite.

Le pseudo-diagramme prenant en compte la présence de la martensite auto-accommodée a été introduit par Bekker et Brinson (1997) (figure 1.3). On y observe les cinq transformations possibles (qui peuvent se faire simultanément) :

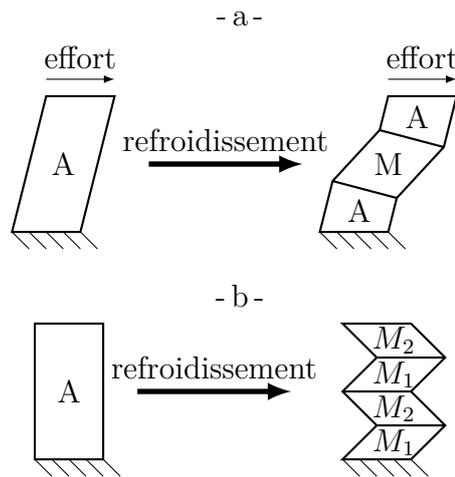


Figure 1.2 – Schématisation des mécanismes de déformation lors de la transformation directe : a) sous contrainte, et b) en variantes auto-accommodées sans contrainte.

- la transformation directe d’austénite en martensite orientée lorsque la contrainte est suffisamment élevée ($A \rightarrow M_\sigma$),
- la transformation inverse de la martensite orientée en austénite ($M_\sigma \rightarrow A$),
- la transformation directe d’austénite en martensite auto-accommodée pour de faibles contraintes ($A \rightarrow M_{th}$),
- la transformation inverse de martensite auto-accommodée en austénite ($M_{th} \rightarrow A$),
- la transformation de la martensite auto-accommodée en martensite orientée ($M_{th} \rightarrow M_\sigma$).

On remarque que la transformation de la martensite orientée en martensite auto-accommodée n’est pas possible sans passer par l’état austénitique.

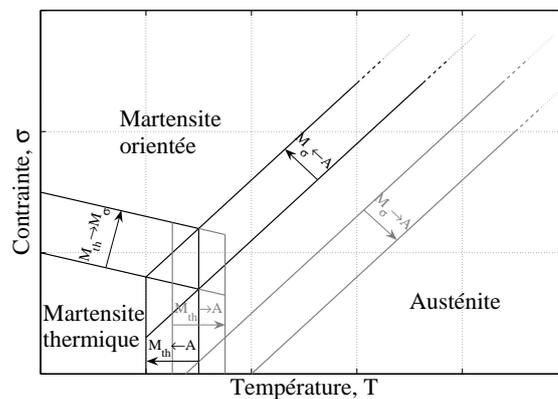


Figure 1.3 – Pseudo-diagramme d’état prenant en compte les trois phases d’un Alliage à Mémoire de Forme (Bekker et Brinson (1997)).

Il existe plusieurs types d’alliages qui présentent cette transformation de phase martensitique et donc ces propriétés. Ils font donc partie des Alliages à Mémoire de Forme mais présentent des comportements qui peuvent être relativement différents. Ils se répartissent principalement dans deux familles :

- Les alliages de Ni-Ti se composent d'environ la moitié de nickel et l'autre moitié de titane, plus quelques additifs (du cuivre ou du niobium par exemple). Ceux-ci permettent entre autres de définir les températures caractéristiques de transformation sur une plage allant de -100°C à 100°C . La déformation de transformation de ces alliages peut aller jusqu'à 10% en moyenne. L'évolution des températures de transformation en fonction de la contrainte est d'environ 7 MPa par $^{\circ}\text{C}$. Les alliages de Ni-Ti présentent la grande majorité du temps, un comportement à plateau traduisant l'aspect instable de la transformation dans ces alliages (figure 1.4).

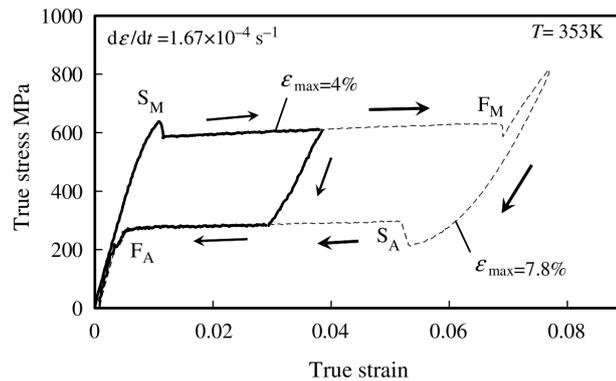


Figure 1.4 – Courbe contrainte-déformation d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti soumis à un chargement mécanique (Tobushi *et al.* (1995)).

- Les alliages à base de cuivre comportent une grande partie de cuivre, de l'aluminium et généralement un autre composant en faible quantité (zinc, nickel ou béryllium). Là aussi la composition exacte de l'alliage permet de faire varier les températures caractéristiques de transformation sur une plage allant de -200°C à 150°C . Ces alliages ont une déformation de transformation maximale d'environ 6% en moyenne. L'évolution des températures de transformation en fonction de la contrainte est d'environ 3 MPa par $^{\circ}\text{C}$. Ces alliages ne présentent pas de comportement à plateau comme pour les Ni-Ti et la taille de l'hystérésis est plus faible (figure 1.5).

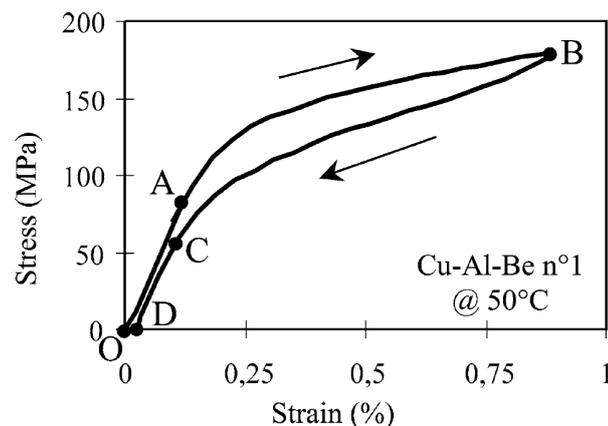


Figure 1.5 – Courbe contrainte-déformation d'un Alliage à Mémoire de Forme en Cu-Al-Be soumis à un chargement mécanique (Bouvet *et al.* (2004)).

Bien qu'ils soient très différents dans leurs compositions, tous les Alliages à Mémoire de Forme présentent les mêmes types de comportement en fonction du trajet de chargement défini sur le schéma du pseudo-diagramme figure 1.6.

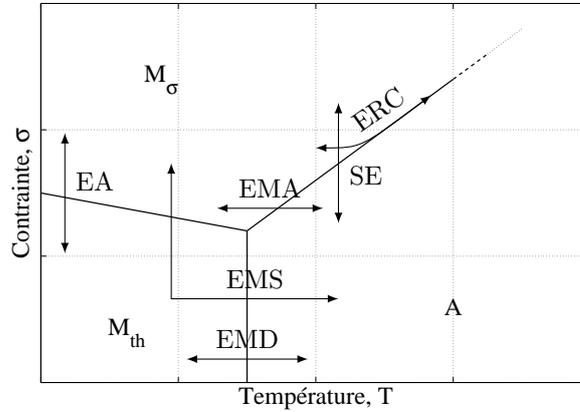


Figure 1.6 – Chargements thermo-mécaniques à l'origine des différentes propriétés des Alliages à Mémoire de Forme.

1.1.1.1 Super-élasticité (SE)

Le chargement de super-élasticité est noté « SE » sur la figure 1.6. Il consiste à se placer au dessus de la température de fin de transformation inverse, A_f^0 , lorsque l'alliage est entièrement austénitique. Si on le soumet à une contrainte, celle-ci va favoriser l'apparition des variantes de martensite les mieux orientées. Ces variantes entraînent alors une déformation due à la transformation. Lors de la décharge, la transformation inverse se produit et la déformation de transformation disparaît avec les variantes de martensite.

Comme on peut le voir sur la figure 1.7 montrant le comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Cu-Al-Be soumis à un chargement de traction uniaxial, à partir du point O et jusqu'au point A le comportement de l'alliage est l'élasticité de l'austénite. Entre le point A et le point B la transformation directe se produit et l'austénite se transforme progressivement en martensite orientée, entraînant une déformation de transformation en plus de la déformation élastique. Lors de la décharge, entre le point B et le point C la transformation inverse se produit et la martensite ainsi que la déformation de transformation disparaissent. Enfin jusqu'au point D le comportement est à nouveau l'élasticité de l'austénite.

On observe le même comportement pour un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti sur la figure 1.8, même si la forme des courbes est différente. À partir du point O et jusqu'au point S_M le comportement de l'alliage est l'élasticité de l'austénite. Entre le point S_M et le point F_M la transformation directe se produit et l'austénite se transforme progressivement en martensite orientée, entraînant une déformation de transformation en plus de la déformation élastique. Puis le comportement est l'élasticité de la martensite jusqu'au point M, ainsi que lors de la décharge jusqu'au point S_A . Entre le point S_A et le point F_A la transformation inverse se produit et la martensite ainsi que la déformation

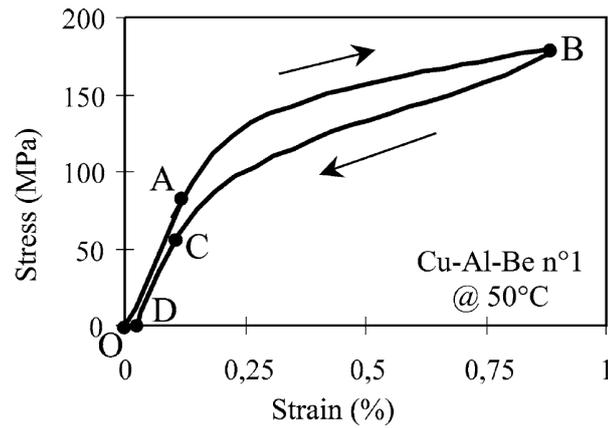


Figure 1.7 – Comportement super-élastique d'un Alliage à Mémoire de Forme en Cu-Al-Be par Bouvet *et al.* (2004).

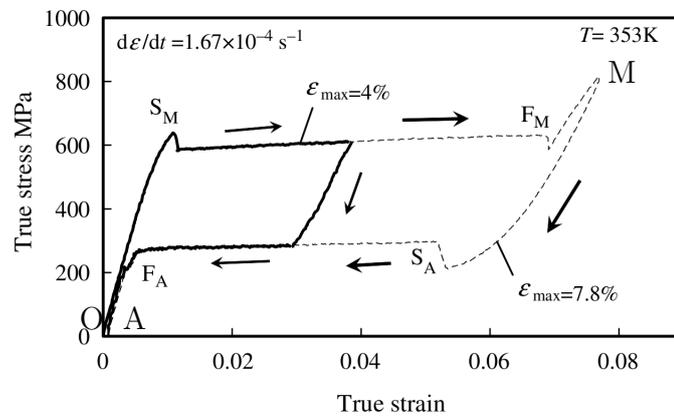


Figure 1.8 – Comportement super-élastique d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti par Tobushi *et al.* (1995).

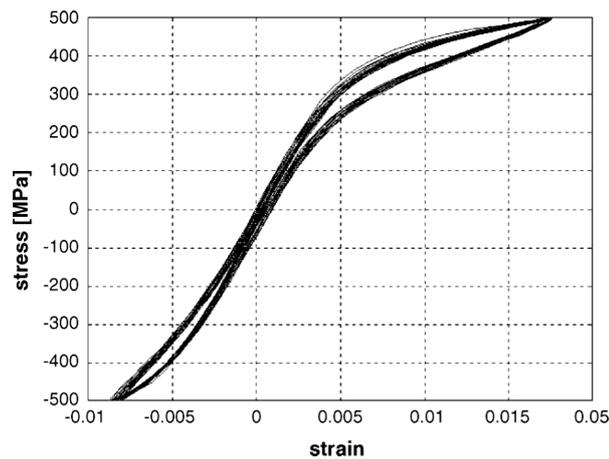


Figure 1.9 – Comportement super-élastique en traction-compression d'un Alliage à Mémoire de Forme en Cu-Al-Be par Montecinos *et al.* (2006).

de transformation disparaissent. Enfin jusqu'au point A le comportement est à nouveau l'élasticité de l'austénite.

On peut aussi remarquer lors de chargements de traction-compression comme celui montré sur la figure 1.9 qu'il existe une dissymétrie entre la contrainte seuil de transformation en traction et en compression. Celle-ci est en effet plus importante en compression qu'en traction. Une étude réalisée par Bouvet *et al.* (2004) a permis de déterminer la forme de la limite seuil de transformation dans le plan des contraintes principales (σ_I, σ_{II}) (figure 1.10). On peut voir que la forme ne correspond pas au critère seuil de von Mises mais dépend apparemment du troisième invariant des contraintes, y_σ .

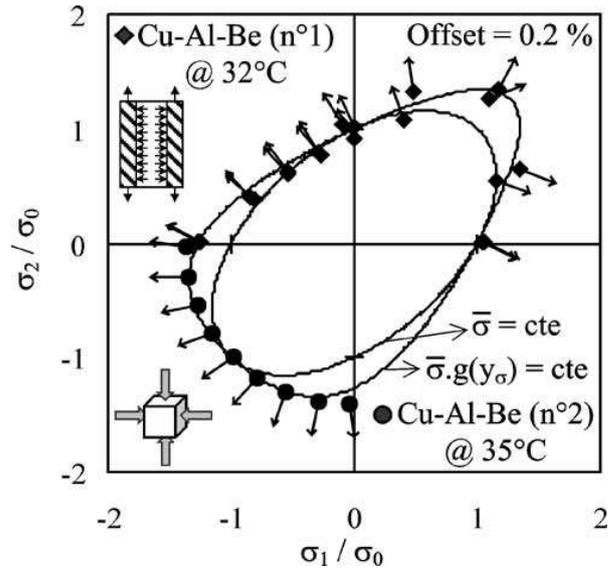


Figure 1.10 – Forme du critère de transformation dans le plan des contraintes principales (σ_I, σ_{II}) par Bouvet *et al.* (2004).

1.1.1.2 Effet mémoire simple-sens (EMS)

Comme montré sur la figure 1.6, le chargement d'effet mémoire simple-sens, noté « EMS », consiste à se placer en dessous de la température de fin de transformation directe, M_f^0 , avec un alliage constitué de martensite auto-accommodée (point O sur la figure 1.11). Le fait d'appliquer un chargement mécanique va orienter les variantes de martensite et donc entraîner une déformation (entre les points A et B). Lorsque l'on supprime le chargement les variantes de martensite restent en place et il subsiste alors une déformation permanente (point C).

Si on chauffe l'alliage au dessus de la température de fin de transformation inverse, A_f^0 , la martensite va se transformer en austénite et la déformation va disparaître (entre les points D et E) et l'alliage retrouve sa forme initiale.

Par contre, le refroidissement de l'alliage en dessous de la température de fin de transformation directe, M_f^0 , provoque la formation de martensite auto-accommodée et n'entraîne donc pas de déformation (entre les points F et O).

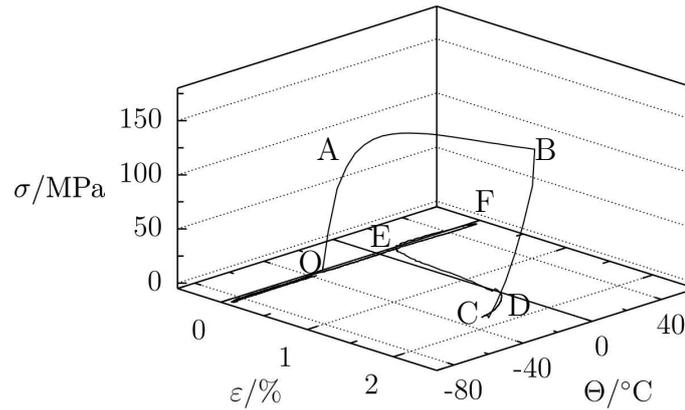


Figure 1.11 – Comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti soumis à un chargement d'effet mémoire simple-sens par Grabe et Bruhns (2009).

1.1.1.3 Effet mémoire assisté (EMA)

L'effet mémoire assisté consiste à réaliser un cycle thermique entre l'austénite et la martensite orientée en appliquant une contrainte constante au cours du cycle (figure 1.6, trajet de chargement noté « EMA »). Avec le chargement mécanique, la formation de martensite orientée entraîne une déformation de transformation.

Lorsque l'on refroidit l'alliage à partir de l'état austénitique (point O sur la figure 1.12), celle-ci va se transformer en martensite orientée grâce à la contrainte qui va favoriser l'apparition de certaines variantes de martensite et une déformation de transformation apparaît (entre les points A et B).

Lors du chauffage, la martensite va se re-transformer en austénite et la déformation va disparaître (entre les points D et E). Il s'agit de l'effet mémoire assisté par une contrainte.

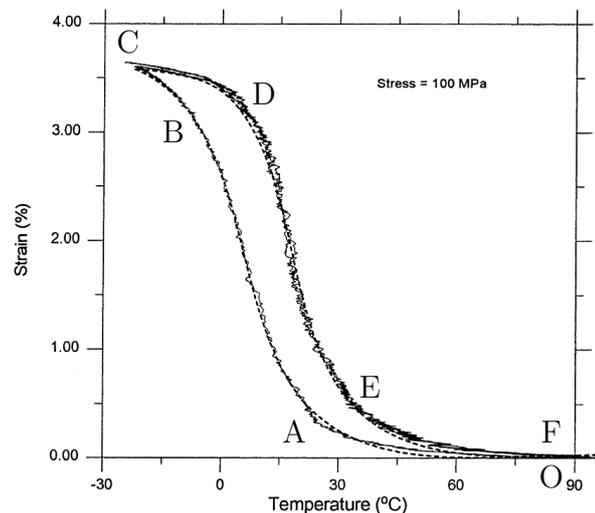


Figure 1.12 – Comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti lors d'un chargement d'effet mémoire assisté avec une contrainte imposée de 100 MPa par Bo et Lagoudas (1999a).

1.1.1.4 Effet mémoire double sens (EMD)

Il est aussi possible d'avoir un effet mémoire dans les deux sens de transformation sans avoir besoin de contrainte pour orienter la martensite lors de la transformation directe (figure 1.6, trajet de chargement noté « EMD »). Pour cela il faut appliquer préalablement à l'alliage une phase d'éducation qui consiste en un cyclage thermique sous contrainte ou en un cyclage mécanique. La création de défauts (précipités, dislocations, ...) est à l'origine d'un champ de contraintes internes. Celui-ci va privilégier par la suite l'apparition de certaines variantes de martensite et donc l'apparition d'une déformation.

À partir de l'état austénitique (point A sur la figure 1.13), le refroidissement de l'alliage à contrainte nulle entraîne donc la transformation de l'austénite en martensite orientée et donc une déformation de transformation apparaît (entre les points M_s et M_f). En chauffant, la martensite se transforme en austénite et cette déformation disparaît (entre les points A_s et A_f).

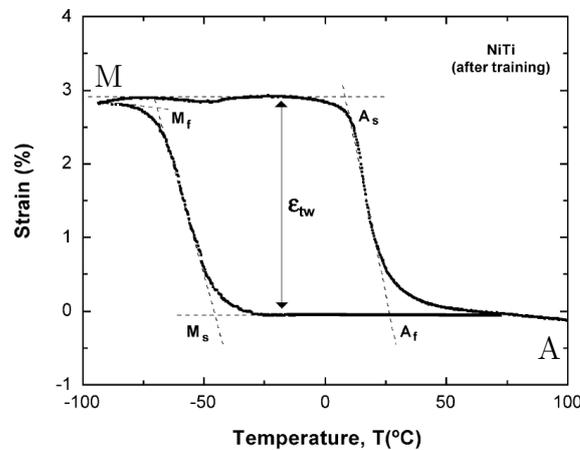


Figure 1.13 – Comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ni-Ti lors d'un chargement d'effet mémoire double-sens par Lahoz et Puértolas (2004).

1.1.1.5 Effet retour contraint (ERC)

Un échantillon d'Alliage à Mémoire de Forme sous la forme de martensite orientée possède une déformation due à la transformation depuis l'état austénitique ou bien de martensite auto-accommodée. Si l'on bloque la déformation, un chauffage implique alors une augmentation de la contrainte lors de la transformation (figure 1.6, trajet de chargement noté « ERC »).

À partir de martensite orientée, si l'on bloque la déformation globale de l'échantillon lors du chauffage, la transformation de la martensite en austénite entraîne la disparition de la déformation de transformation. Celle-ci est alors compensée par une augmentation de la déformation élastique. La contrainte qui est proportionnelle à la déformation élastique augmente donc dans le matériau.

Comme le montre la figure 1.14, le chargement inverse est aussi possible : à partir de l'austénite pré-chargée (point O), le refroidissement de l'alliage (entre les points O et A) entraîne la transformation en martensite orientée qui s'accompagne d'une déformation

de transformation. Or la déformation totale étant fixée, l'apparition de la déformation de transformation est compensée par la baisse de la déformation élastique et donc de la contrainte. Lors du chauffage, la transformation inverse se produit (entre les points A et B), la déformation de transformation disparaît donc, ce qui entraîne l'augmentation de la déformation élastique et de la contrainte.

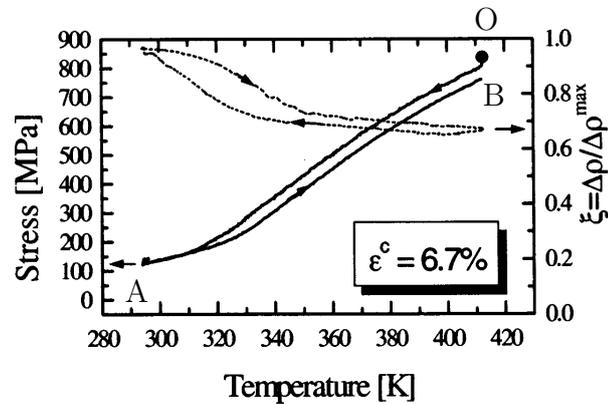


Figure 1.14 – Comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ti-Ni-Cu lors d'un chargement de retour contraint avec une déformation imposée de 6,7% par Šittner *et al.* (2000). La courbe en pointillé indique la fraction volumique de martensite évaluée grâce à des mesures de résistivité.

1.1.1.6 Effet amortissant (EA)

L'effet amortissant utilise la réorientation de la martensite (figure 1.6, trajet de chargement noté « EA »). En inversant la direction du chargement (par exemple en traction-compression comme sur la figure 1.15), on change aussi les variantes de martensite les mieux orientées. Le frottement interne associé aux mouvements des interfaces entre les différentes variantes entraîne une dissipation d'énergie permettant par exemple d'amortir des vibrations.

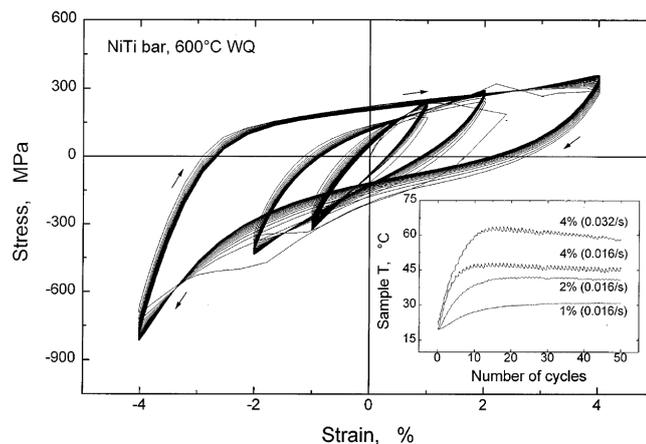


Figure 1.15 – Comportement d'un Alliage à Mémoire de Forme en Ti-Ni lors d'un chargement d'effet amortissant par Liu *et al.* (1999).

1.1.2 Utilisation des Alliages à Mémoire de Forme

Les Alliages à Mémoire de Forme présentent donc plusieurs types de comportement en fonction du trajet de chargement imposé dans l'espace contrainte-déformation-température. On les retrouve donc dans différentes applications que l'on peut regrouper en deux catégories :

- les systèmes actifs qui agissent sur leur environnement afin de le modifier,
- les systèmes passifs qui subissent les changements de leur environnement et s'accommodent de façon utile à ces changements.

1.1.2.1 Systèmes actifs

Ce sont des systèmes qui agissent directement sur leur environnement. Ils transforment l'énergie thermique qu'ils reçoivent en énergie mécanique. L'énergie est soit captée de l'environnement, soit imposée grâce à une commande. On peut donc voir deux types d'applications :

- les systèmes adaptatifs qui réagissent à un changement de l'environnement,
- les systèmes commandés qui agissent lorsqu'une commande leur est envoyée (généralement un courant électrique dans le cas des Alliages à Mémoire de Forme).

1.1.2.1.1 Systèmes adaptatifs

Contrôle de la température :

Grâce à l'effet mémoire simple-sens, l'effet mémoire double-sens ou encore l'effet mémoire assisté, les Alliages à Mémoire de Forme permettent de détecter le franchissement d'une température (correspondant à la température de transformation de l'alliage utilisé) et d'agir sur le mécanisme. Ce principe est utilisé par exemple pour des indicateurs de non-rupture de la chaîne du froid dans l'alimentaire (figure 1.16). Lors de la congélation, le ressort en Alliage à Mémoire de Forme se contracte et libère un marqueur vert indiquant que le système est armé. Une augmentation de température entraîne la libération d'un marqueur rouge indiquant la rupture de la chaîne du froid.

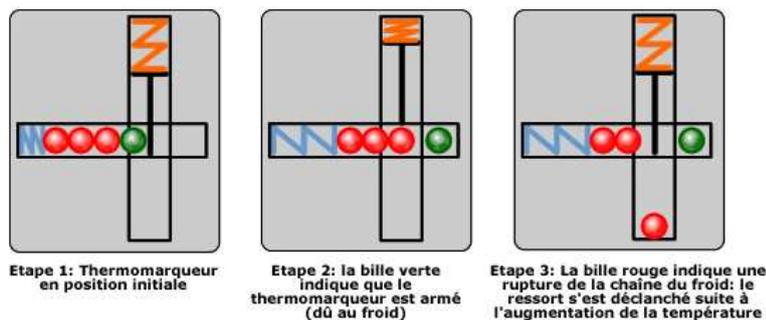


Figure 1.16 – Thermo-marqueur permettant de détecter une rupture de la chaîne du froid à l'aide d'un ressort en Alliage à Mémoire de Forme, par Nimesis.

La figure 1.17 présente un mécanisme de robinet thermostatique de douche permettant de réguler automatiquement la température de l'eau. L'eau chaude et l'eau froide se mélangent et passent dans un ressort en Alliage à Mémoire de Forme qui positionne un tiroir de distribution. Si l'eau est trop froide, le ressort se contracte et déplace le tiroir pour faire venir plus d'eau chaude. Si l'eau est trop chaude, le ressort se détend et déplace le tiroir pour faire venir plus d'eau froide. Le réglage de la température de l'eau se fait via un ressort élastique qui vient comprimer le ressort en Alliage à Mémoire de Forme.

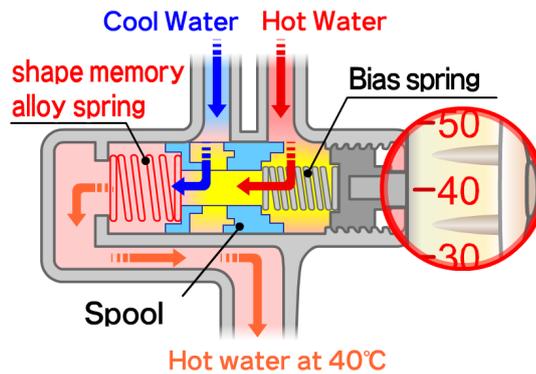


Figure 1.17 – Robinet thermostatique de douche réglant automatiquement les débits d'eau chaude/froide pour obtenir la bonne température, par Furukawa Techno Material.

La figure 1.18 montre le schéma d'un clapet automatique utilisé dans le système de lubrification du Shinkansen. À grande vitesse la température de l'huile de lubrification augmente et entraîne la fermeture du clapet. Cela permet de diminuer la quantité du bain d'huile et d'éviter un échauffement trop important de celui-ci.

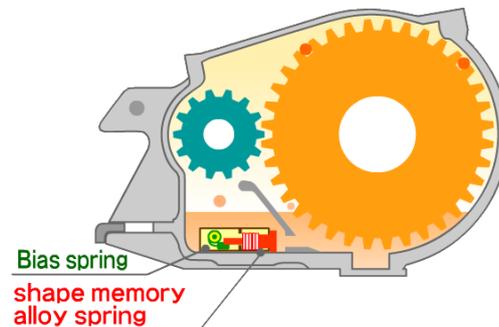


Figure 1.18 – Clapet automatique permettant de réguler la lubrification en fonction de la température, par Furukawa Techno Material.

La figure 1.19 présente le schéma d'une soupape de cocotte-minute. Lorsque la température à l'intérieur de la cocotte-minute est trop élevée, un ressort en Alliage à Mémoire se détend et ouvre une soupape qui permet de libérer de la vapeur d'eau. Un autre mécanisme consiste à fermer automatiquement un système d'aération de maison lorsque la température extérieure est trop basse afin d'éviter les déperditions de chaleur (figure 1.20).

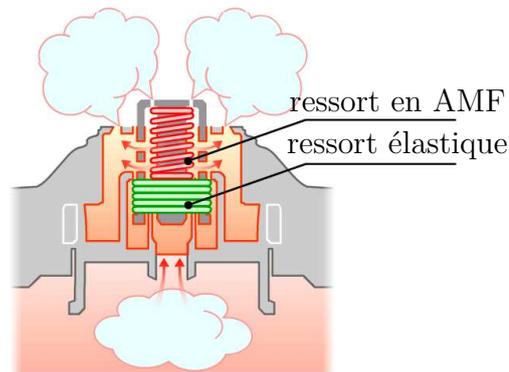


Figure 1.19 – Soupape de cocotte-minute libérant automatiquement la vapeur pour une température trop élevée, par Furukawa Techno Material.

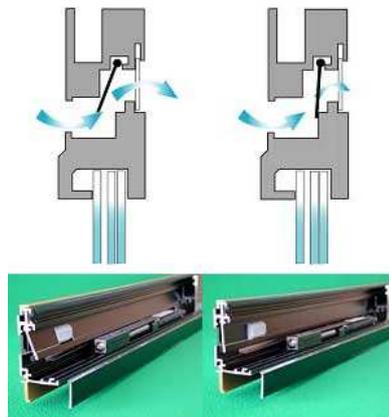


Figure 1.20 – Système d'aération se fermant automatiquement lorsque la température extérieure est trop basse, par Furukawa Techno Material.

1.1.2.1.2 Systèmes commandés

Simple-sens :

L'effet mémoire simple-sens permet de réaliser des actionneurs simple-sens qui entraînent une déformation lors du chauffage. Il est utilisé pour réaliser des stents vasculaires qui sont repliés à température ambiante, insérés dans une artère et se déplient alors avec la chaleur du corps afin de dilater l'artère et ainsi éviter qu'elle ne se bouche (figure 1.21).



Figure 1.21 – Stent vasculaire en Alliage à Mémoire de Forme thermo-mécanique servant à dilater des artères.

Effet retour contraint :

L'effet retour contraint permet de réaliser des actionneurs qui entraînent un effort lors du chauffage. Le pilotage se fait par un courant électrique qui chauffe l'Alliage à Mémoire de Forme par effet Joule. Il permet par exemple grâce à l'effort généré de casser un système d'accroche. Ce principe est utilisé pour le déploiement de panneaux solaires ou d'antennes de satellites (figure 1.22) : une bague en Alliage à Mémoire de Forme est insérée sous la tête d'une vis pré-découpée. Lorsque l'on fait passer un courant électrique dans la bague, celle-ci s'échauffe et la transformation en austénite se produit. La déformation étant bloquée par la vis, la contrainte augmente alors, jusqu'à rupture de celle-ci libérant le mécanisme de déploiement.

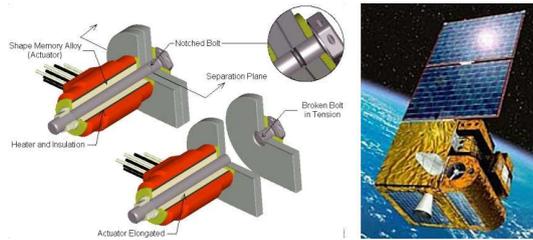


Figure 1.22 – Système de découplage par rupture de vis sans explosion à base d'Alliage à Mémoire de Forme permettant le déploiement de panneaux solaires ou d'antennes de satellites, par TiNi Aerospace.

La figure 1.23 montre des exemples d'utilisation des Alliages à Mémoire de Forme pour réaliser des systèmes d'accouplement. Une bague est déformée dans l'état martensitique. Après mise en place de la bague sur les éléments à assembler, le fait de la chauffer au dessus de la température de transformation entraîne une déformation de la bague qui va serrer les éléments afin de les maintenir ensemble.



Figure 1.23 – Système d'accouplement par serrage à l'aide de bagues en Alliage à Mémoire de Forme, par Intrinsic Devices.

De même, il est utilisé pour réaliser des agrafes osseuses (figure 1.24). À température ambiante l'agrafe est à l'état de martensite orientée, mais lorsque l'Alliage à Mémoire de Forme est chauffé par la chaleur du corps, la déformation bloquée entraîne l'apparition d'un effort sur l'os qui permet d'aider la guérison de fractures.

Double-sens :

L'effet mémoire double-sens et l'effet mémoire assisté permettent de réaliser des actionneurs double-effet qui entraînent un déplacement lors du chauffage et reviennent



Figure 1.24 – Agrafes osseuses en Alliage à Mémoire de Forme aidant à la guérison de fractures.

à leur position initiale lors du refroidissement. Le principe utilisé est généralement celui des ressorts antagonistes : la partie mobile de l'actionneur est fixée entre deux ressorts, l'un en Alliage à Mémoire de Forme, l'autre dans un matériau classique. Lors du chauffage piloté par un courant électrique, le ressort en Alliage à Mémoire de Forme s'allonge et entraîne le déplacement de la partie mobile de l'actionneur. Lors du refroidissement, le ressort reprend sa forme initiale grâce à l'effort exercé par l'autre ressort (figure 1.25).

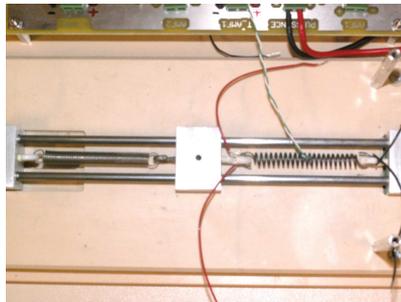


Figure 1.25 – Actionneur mécanique basé sur un ressort en Alliage à Mémoire de Forme par Gedouin *et al.* (2009).

Ce principe sert aussi à réaliser des micro-pinces (figures 1.26 et 1.27). Lorsqu'une partie de la pince est chauffée par effet Joule, celle-ci se déforme et entraîne la fermeture de la pince. L'ouverture de la pince peut se faire soit par un refroidissement passif, ce qui a le désavantage d'être généralement lent, soit en chauffant une autre partie de la pince.



Figure 1.26 – Micro-pince en Alliage à Mémoire de Forme permettant de saisir des micro-lentilles optiques, par Bellouard (2008).

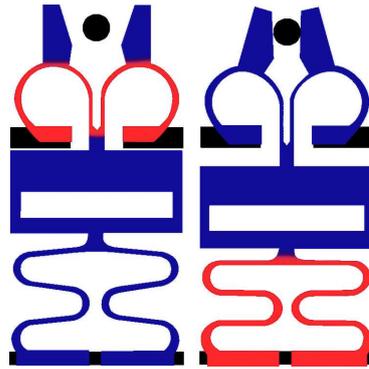


Figure 1.27 – Micro-pince en Alliage à Mémoire de Forme permettant de saisir des fibres optiques d'un diamètre de $140\ \mu\text{m}$ par Kohl *et al.* (2002).

Un autre exemple d'application est un aileron déformable (figure 1.28). Des fils en alliages à Mémoire de Forme sont chauffés par effet Joule et entraînent la déformation de l'aileron.



Figure 1.28 – Aileron déformable utilisant des fils en Alliage à Mémoire de Forme par Rediniotis *et al.* (2002).

La figure 1.29 présente le schéma d'une micro-pompe à base d'Alliage à Mémoire de Forme. Deux clapets anti-retours servent à autoriser l'entrée et la sortie du fluide. La circulation du fluide est imposée par une membrane en Alliage à Mémoire de Forme qui se déforme grâce au changement de température induit par un courant électrique. La membrane reprend sa forme lors du refroidissement grâce à une pression (ou une dépression selon le sens de fonctionnement de la pompe) de l'autre côté.

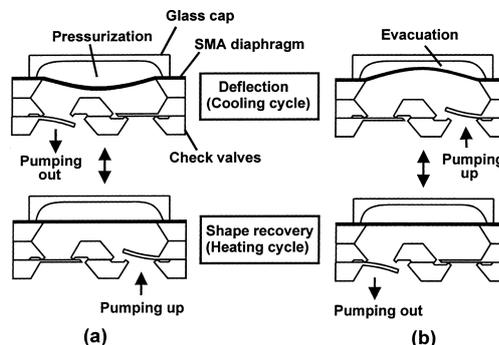


Figure 1.29 – Micro-pompe utilisant une membrane en Alliage à Mémoire de Forme par Makino *et al.* (2001).

La figure 1.30 montre la photo d'un micro-robot avançant à l'aide d'un fil en Alliage à Mémoire de Forme. Il repose sur deux essieux dont la rotation est bloquée dans le sens d'avancement du robot. Lorsque le fil en Alliage à Mémoire de Forme est chauffé par effet Joule, il se contracte et le robot se déforme de manière à écarter l'entraxe entre les essieux. L'essieu avant se déplace alors. Lors du refroidissement, le robot reprend sa forme initiale grâce à l'action du ressort élastique reliant les deux parties du robot. L'essieu arrière se rapproche donc de celui de l'avant. Le robot s'est donc déplacé à la fin de ce cycle.

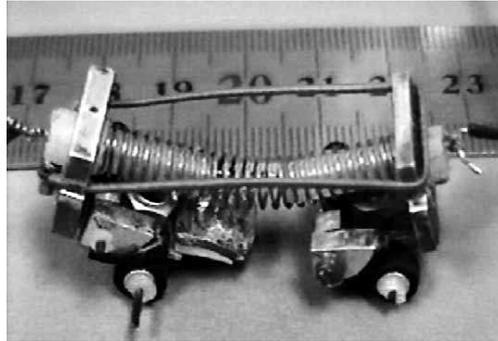


Figure 1.30 – Micro-robot utilisant un fil en Alliage à Mémoire de Forme par Chang-jun *et al.* (2004).

Il est aussi possible de réaliser des moteurs rotatifs à base d'Alliage à Mémoire de Forme (figure 1.31). Les fils passent successivement dans de l'eau chaude qui entraîne leur raccourcissement et dans l'air où ils se refroidissent et s'allongent alors grâce à l'effort généré par les fils suivants. L'allongement et le raccourcissement successif des fils entraîne la mise en rotation du mécanisme.

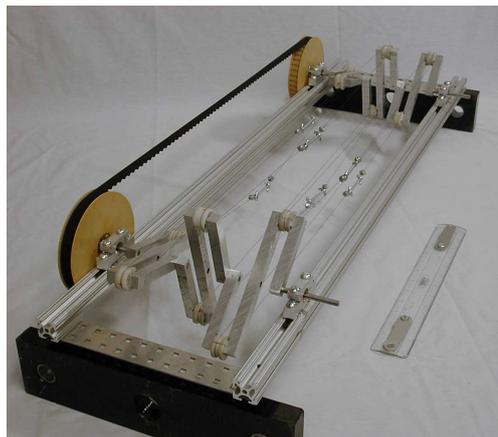


Figure 1.31 – Moteur rotatif à base de fils en Alliage à Mémoire de Forme par Schiller (2002).

La figure 1.32 présente le schéma de principe d'un mécanisme de blocage de la trappe de pellicule d'un appareil photo réalisé à l'aide d'un fil en Alliage à Mémoire

de Forme. Lorsque la pellicule photo est entièrement rembobinée, le fil en Alliage à Mémoire de Forme soulève un levier, débloquent alors le mécanisme d'ouverture de la trappe.

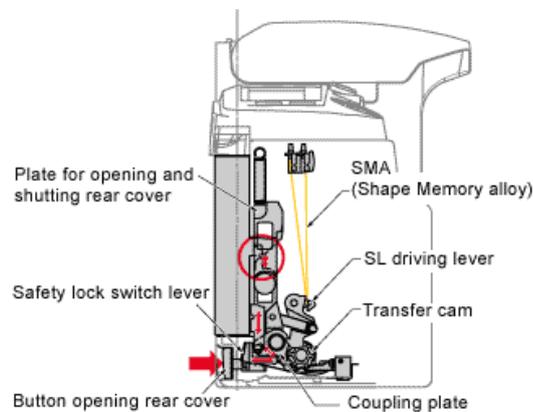


Figure 1.32 – Mécanisme de blocage de la trappe de pellicule d'un appareil photo réalisé à l'aide d'un fil en Alliage à Mémoire de Forme, par Furukawa Techno Material.

1.1.2.2 Systèmes passifs

L'autre type d'application utilisant des Alliages à Mémoire de Forme concerne les mécanismes passifs. Ils permettent d'adapter automatiquement l'effort appliqué ou sa déformation à son environnement lors du fonctionnement.

Limiteur de force :

Le comportement super-élastique des Alliages à Mémoire de Forme en Ni-Ti présente généralement un plateau sur la courbe contrainte-déformation (figure 1.8). Cette propriété permet d'appliquer un effort constant malgré une déformation qui varie sensiblement. Ce principe est utilisé par exemple pour des pinces chirurgicales qui permettent d'éviter d'abîmer les tissus humains à cause d'un effort de serrage trop important (figure 1.33). Lorsque la pince est fermée l'effort appliqué est identique quelque soit l'épaisseur de tissu pincé.

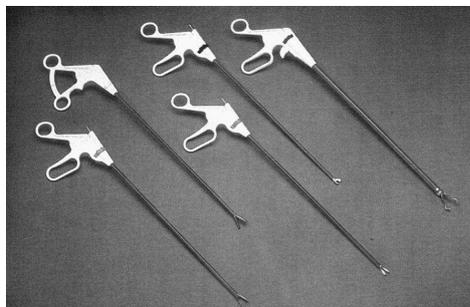


Figure 1.33 – Pinces chirurgicales permettant de limiter l'effort appliqué grâce aux Alliages à Mémoire de Forme, par Memry.

Ce principe est aussi utilisé dans l'orthodontie pour les appareils dentaires (figure 1.34). Le fil applique un effort constant sur toutes les dents malgré que celles-ci bougent pour se remettre en place. Cela évite d'avoir à régler l'appareillage trop souvent et accélère la « guérison ».



Figure 1.34 – Appareil dentaire en Alliage à Mémoire de Forme permettant l'application d'un effort constant.

Déformables :

Ce sont des mécanismes qui utilisent la super-élasticité. Malgré une rigidité initiale assez forte, ils autorisent une grande déformation lorsqu'un certain effort est atteint. Ce comportement est utilisé par exemple pour réaliser des outils de traitement endodontique qui doivent être suffisamment rigides pour creuser la dent, mais aussi s'adapter à la forme complexe des canaux dentaires (figure 1.35).



Figure 1.35 – Instrument endodontique en Alliage à Mémoire de Forme s'adaptant à la forme des canaux dentaires.

Il permet aussi de réaliser un autre type de stents (figure 1.36) qui sont comprimés et insérés dans une artère puis relâchés à l'endroit voulu. Leur rigidité permet d'écarter correctement l'artère, mais leur souplesse permet aussi l'importante déformation appliquée lors de l'insertion du stent.

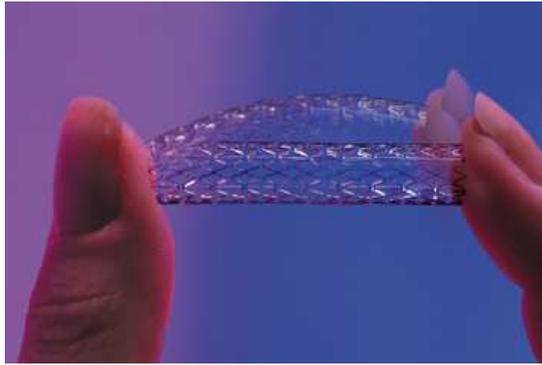


Figure 1.36 – Stent vasculaire en Alliage à Mémoire de Forme super-élastique servant à dilater des artères.

La figure 1.37 montre des montures de lunettes en Alliage à Mémoire de Forme. Ces montures autorisent une forte déformation afin qu'elles ne se cassent pas lors d'utilisation « extrêmes », mais gardent quand même une rigidité forte pour de faible contrainte.



Figure 1.37 – Montures de lunettes utilisant la super-élasticité des Alliages à Mémoire de Forme, par Eyeglasses-online.

Le principe est aussi utilisé pour réaliser des structures de tentes ou de pares soleil qui peuvent se replier pour se ranger facilement (figure 1.38). La rigidité sous faible contrainte permet le maintien de la structure, mais la déformation autorisée sous contrainte plus élevée permet de la plier pour la ranger facilement.



Figure 1.38 – Pare-soleil avec une armature en Alliage à Mémoire de Forme permettant de le plier et de le déplier facilement.

Amortisseurs :

Ils utilisent la super-élasticité ou l'effet amortissant qui autorisent une déformation, mais dissipent de l'énergie grâce à une hystérésis dans le comportement et permettent ainsi d'atténuer des vibrations. Ce principe est utilisé par exemple dans des constructions anti-sismiques. La structure contenant des Alliages à Mémoire de Forme permet d'amortir les vibrations dues à un tremblement de terre et évite ainsi la détérioration du bâtiment.

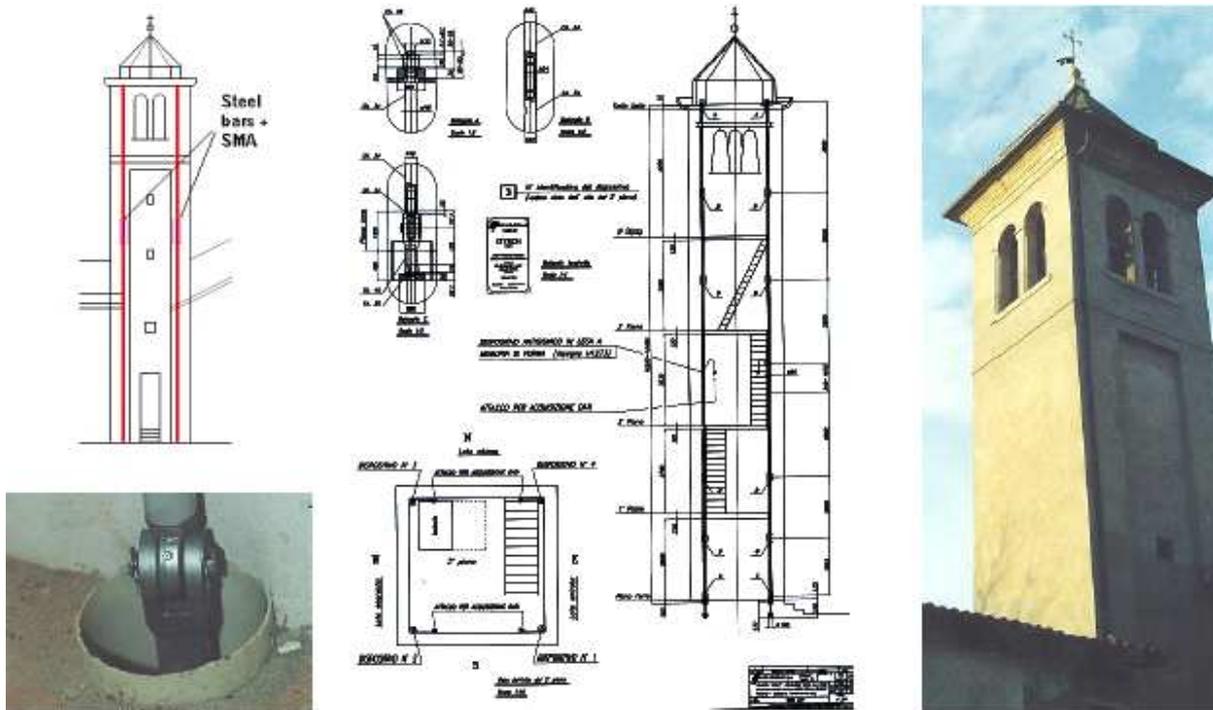


Figure 1.39 – Système d'amortissement anti-sismique utilisant des Alliages à Mémoire de Forme par DesRoches et Smith (2004).

Le fonctionnement de pratiquement toutes les applications que l'on vient de présenter implique un chargement thermique ou mécanique cyclique sur la pièce en Alliage à Mémoire de Forme utilisée. Or ce type de chargement peut entraîner une modification des propriétés de l'alliage et donc au final un dysfonctionnement voir une rupture du mécanisme.

1.1.3 Propriétés cycliques des Alliages à Mémoire de Forme

Les Alliages à Mémoire de Forme sont donc soumis généralement à des chargements cycliques, or, comme le montre la figure 1.40, encore peu d'études concernent le comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme comparativement à celles traitant de ce type de comportement pour les aciers par exemple. Il est donc nécessaire d'approfondir les recherches dans ce domaine afin de mieux comprendre les phénomènes qui apparaissent et de pouvoir ainsi les modéliser correctement.

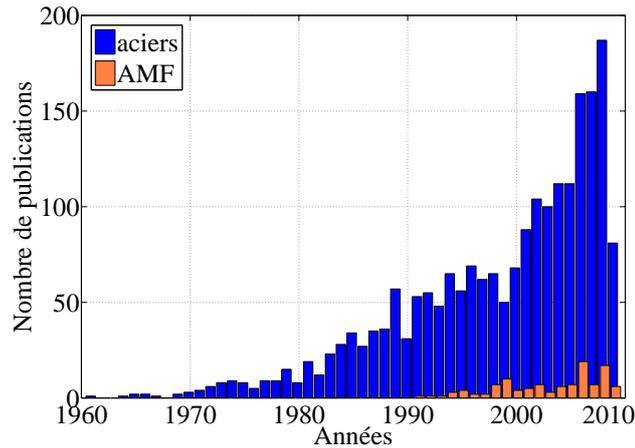


Figure 1.40 – Nombre de publications par an traitant du comportement cyclique pour les aciers et pour les Alliages à Mémoire de Forme depuis 1960 sur science-direct.

Dans cette partie, nous allons donc commencer par montrer ce que l'on connaît du comportement des Alliages à Mémoire de Forme soumis à différents chargements cycliques. Dans la suite de notre étude, nous tenterons de répondre aux questions soulevées par l'observation des caractéristiques du comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme. Les applications présentant du cyclage sont majoritairement basées sur les propriétés de super-élasticité et d'effet mémoire assisté. Nous nous limiterons donc à ces deux types de chargement.

1.1.3.1 Comportement en super-élasticité cyclique

Les figures 1.41, 1.42 et 1.43 montrent des courbes contrainte-déformation d'un Ni-Ti lors d'essais de traction cyclique en super-élasticité réalisés respectivement par Gall et Maier (2002); Olbricht *et al.* (2008) et Kang *et al.* (2009).

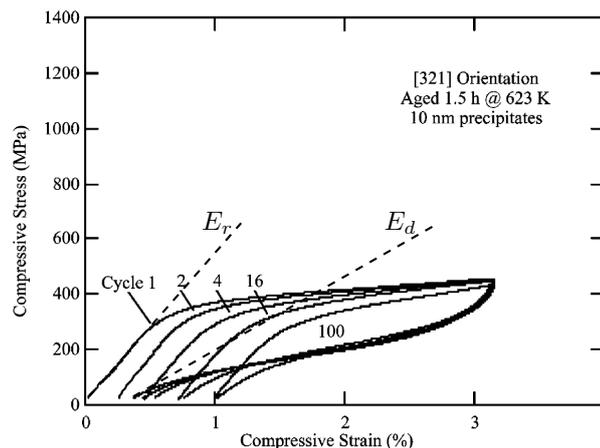


Figure 1.41 – Courbe de contrainte-déformation en traction cyclique sur un mono-cristal de Ni-Ti par Gall et Maier (2002).

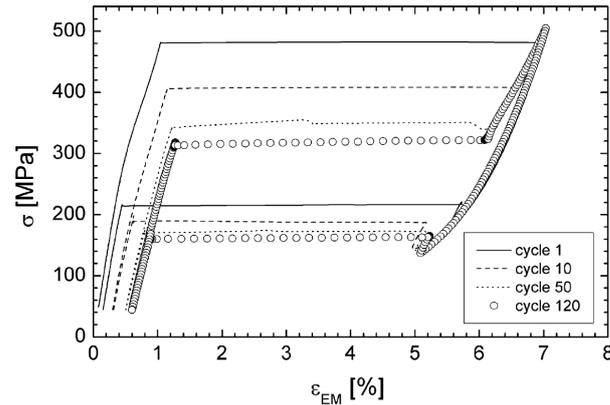


Figure 1.42 – Courbe de contrainte-déformation en traction cyclique sur un Ni-Ti par Olbricht *et al.* (2008).

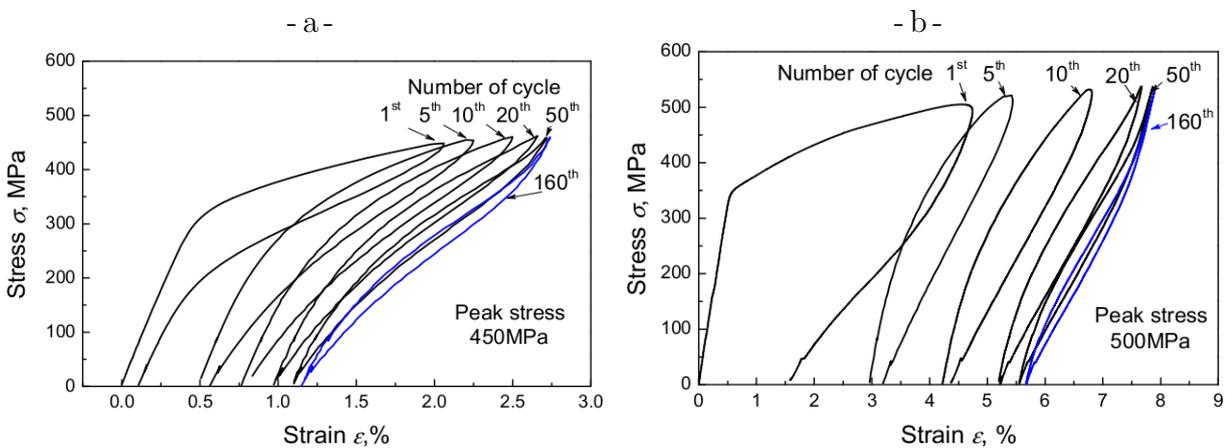


Figure 1.43 – Courbes de contrainte-déformation en traction cyclique sur un Ni-Ti par Kang *et al.* (2009) avec une contrainte maximale de : a) 450 MPa, et b) 500 MPa.

On peut faire plusieurs observations sur le comportement cyclique en super-élasticité :

- La pente au début de la recharge et la pente à la fin de la décharge, respectivement notées E_r et E_d sur la figure 1.41, peuvent être différentes (figures 1.41 et 1.43b) ou identiques (figures 1.42 et 1.43a). Cette différence peut provenir de la transformation inverse qui n'est pas forcément terminée lorsque la contrainte nulle est atteinte. Si elle n'est pas terminée, alors la cinétique de transformation implique que la pente en fin de décharge, E_d , soit plus faible que la pente en début de recharge, E_r , qui correspond à l'élasticité du matériau. Par contre, si la martensite ne se transforme plus en austénite (parce qu'elle s'est complètement transformée ou qu'elle reste bloquée), alors la pente en fin de décharge, E_d , correspond à l'élasticité du matériau et est donc identique à celle en début de recharge, E_r .
- On observe pour la quasi-totalité des chargements cycliques une déformation résiduelle à la fin d'un cycle de charge-décharge. Cette déformation résiduelle augmente à chaque cycle et tend vers une valeur de saturation. L'origine de cette déformation peut-être la transformation inverse qui n'est pas encore terminée lorsque la

contrainte nulle est atteinte (dans le cas où la pente à la fin de la décharge est plus faible que la pente au début de la recharge par exemple). Mais il est aussi possible que ce soit dû à de la plasticité ou bien à de la martensite bloquée qui ne se re-transforme pas en austénite malgré la baisse de la contrainte (cas qui correspondraient à des pentes à la fin de la décharge et au début de la recharge identiques) (Kockar *et al.* (2008)). Lors des essais réalisés, nous chercherons donc à déterminer l'origine de cette déformation résiduelle afin de mieux modéliser son apparition.

- Pour certains alliages, on peut remarquer que la contrainte seuil de transformation diminue avec le nombre de cycles (figures 1.42 et 1.43). Ce comportement peut s'expliquer par une transformation privilégiée de la martensite grâce à de la martensite résiduelle ou des contraintes internes (Wei et Yang (1988)).
- Un comportement qui peut être relié au précédent est l'augmentation de la déformation maximale lors d'un cyclage à amplitude en contrainte constante, similaire à de l'effet Rochet en plasticité (figure 1.43). En effet, la baisse de la contrainte seuil de transformation entraîne plus de transformation avant d'atteindre la contrainte maximale et donc une déformation de transformation plus grande est créée.

1.1.3.2 Comportement en effet mémoire assisté cyclique

Les figures 1.44, 1.45 et 1.46 montrent l'évolution du comportement d'Alliages à Mémoire de Forme en Cu-Zn-Al et en Ni-Ti lors d'essais d'effet mémoire assisté cyclique réalisés respectivement par LExcellent *et al.* (2000), Kockar *et al.* (2008) et Miller et Lagoudas (2001).

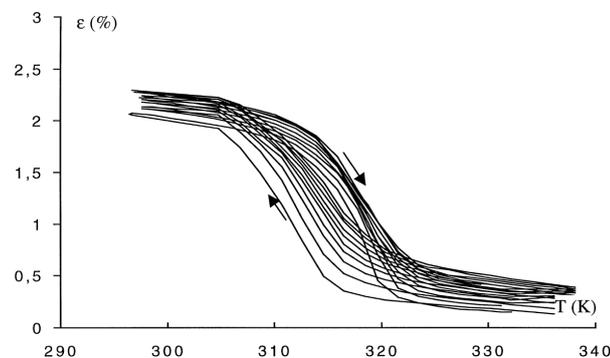


Figure 1.44 – Courbe de déformation-temps lors d'un cyclage thermique sous une contrainte de 49 MPa sur un Cu-Zn-Al par LExcellent *et al.* (2000).

On peut aussi faire plusieurs observations sur le comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme en effet mémoire assisté :

- L'amplitude en déformation de l'hystérésis augmente avec la contrainte appliquée (figure 1.47). On peut expliquer ce phénomène par une orientation plus importante de la martensite lorsque la contrainte appliquée est plus grande. Il y aurait donc aussi de la martensite auto-accommodée qui se forme lors de chargements d'effet mémoire assisté et la proportion serait d'autant plus importante que la contrainte appliquée est faible.

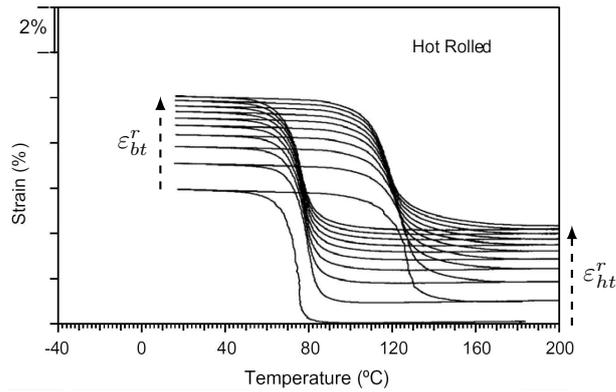


Figure 1.45 – Courbe de déformation-température lors d'un cyclage thermique sous une contrainte de 150 MPa sur un Ni-Ti par Kockar *et al.* (2008).

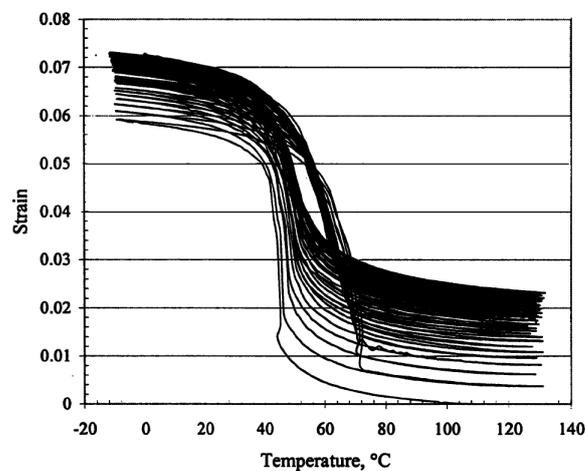


Figure 1.46 – Courbe de déformation-température lors d'un cyclage thermique sous une contrainte de 300 MPa sur un Ni-Ti par Miller et Lagoudas (2001).

- Pour chacun des essais, la déformation résiduelle à haute température, ε_{ht}^r , et celle à basse température, ε_{bt}^r , (figure 1.45) augmentent à chaque cycle et tendent vers une valeur de saturation. La déformation résiduelle à haute température, ε_{ht}^r , peut s'expliquer, comme pour la déformation résiduelle lors d'un chargement de super-élasticité, par de la martensite bloquée par des contraintes résiduelles provenant de défauts. Celle-ci ne se re-transforme pas en austénite lors de la transformation inverse et entraîne donc une déformation résiduelle. La déformation résiduelle à basse température, ε_{bt}^r , peut venir d'une accommodation de la martensite qui entraîne la transformation d'une plus grande fraction volumique de martensite orientée. Apparemment, ces déformations résiduelles dépendent aussi de la contrainte appliquée : plus celle-ci est importante, plus les déformations résiduelles à basse et haute températures sont importantes (figure 1.47).
- On observe aussi sur certaines courbes un décalage progressif des températures de transformation et en particulier celle de début de transformation directe, M_s (figure 1.47d). L'origine de ce décalage peut être la même que pour la baisse de la

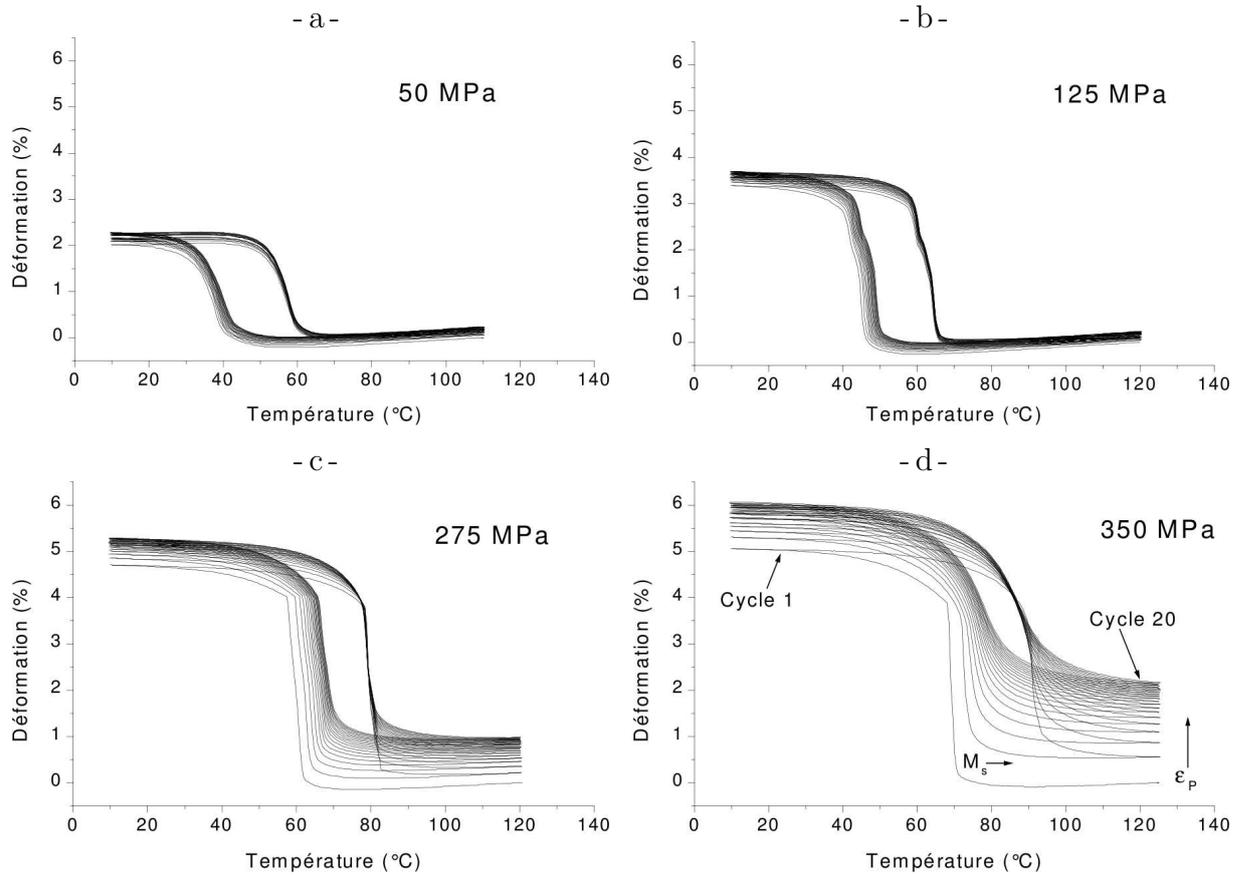


Figure 1.47 – Courbes de déformation-température lors de cyclages thermiques sous une contrainte de : a) 50 MPa, b) 125 MPa, c) 275 MPa, et d) 350 MPa sur un Ni-Ti par Lopez-Cuellar (2002).

contrainte seuil de transformation lors des essais de traction cyclique : la transformation peut être facilitée par de la martensite résiduelle ou des contraintes internes, entraînant un début de transformation plus rapide.

Les Alliages à Mémoire de Forme sont donc généralement sollicités de façon cyclique lors de leur utilisation. Cependant leur comportement pour ce type de chargement présente des particularités qui peuvent perturber le bon fonctionnement des applications, telles que la déformation résiduelle, la baisse de la contrainte seuil et le décalage des températures de transformation au cours du cyclage. Afin de valider ou de concevoir des structures en Alliage à Mémoire de Forme, il est donc nécessaire de pouvoir modéliser leur comportement à l'aide d'un modèle adapté.

1.2 Modélisation macroscopique du comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme

Les Alliages à Mémoire de Forme sont étudiés depuis plusieurs années, leur comportement est donc relativement bien connu et un bon nombre de modèles permet de le simuler. Par contre, comme nous l'avons fait remarqué précédemment, leur comportement sous chargement cyclique a été relativement peu regardé et donc seul un petit nombre de modèles prend en compte cet aspect du comportement.

Dans cette partie, différents modèles permettant la simulation du comportement des Alliages à Mémoire de Forme sous chargement cyclique sont donc présentés afin de faire une synthèse des caractéristiques prise en compte.

1.2.1 Modèle de Lagoudas *et al.*

Le modèle développé par Bo et Lagoudas (1999a); Lagoudas et Bo (1999); Lagoudas et Entchev (2004); Entchev et Lagoudas (2004) et Popov et Lagoudas (2007) est un modèle de comportement thermo-mécanique cyclique. Il permet de simuler des chargements de pseudo-plasticité ainsi que des chargements cycliques d'effet mémoire assisté et de super-élasticité sur des Alliages à Mémoire de Forme. L'identification des paramètres et la validation du modèle ont été réalisées sur un alliage de Ni-Ti.

La température, T , et la contrainte, σ , sont utilisées comme variables observables. Les variables internes du modèle sont la déformation associée à la transformation de l'austénite en martensite orientée, ε^{tr} , la déformation associée à la transformation de la martensite auto-accommodée en martensite orientée, ε^d , et la déformation plastique, ε^p . Le comportement cyclique est pris en compte grâce à une fraction volumique de martensite orientée cumulée, z_c , qui entraîne l'apparition de la déformation plastique, ε^p .

Le modèle se base sur la partition de la déformation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^\theta + \varepsilon^{tr} + \varepsilon^d + \varepsilon^p \quad (1.1)$$

Avec ε^e la déformation élastique, ε^θ la déformation thermique, ε^{tr} la déformation due à la transformation d'austénite en martensite orientée, ε^d la déformation due à la transformation de martensite auto-accommodée en martensite orientée (pseudo-plasticité) et ε^p la déformation plastique.

Les surfaces seuil pilotant la transformation sont décrites par les critères de transformation suivants :

$$\Phi_1 = \begin{cases} \pi_1 - Y_1 & \text{en transformation auto-accommodée directe } (\dot{\xi}_1 > 0) \\ -\pi_1 - Y_1 & \text{en transformation auto-accommodée inverse } (\dot{\xi}_1 < 0) \end{cases} \\ \Phi_2 = \begin{cases} \pi_2 - Y_2 & \text{en transformation orientée directe } (\dot{\xi}_2 > 0) \\ -\pi_2 - Y_2 & \text{en transformation orientée inverse } (\dot{\xi}_2 < 0) \end{cases} \\ \Phi_3 = \pi_3 - Y_3 \quad \text{en pseudo-plasticité } (\dot{\xi}_3 > 0) \quad (1.2)$$

Où Y_1 , Y_2 et Y_3 sont des paramètres dépendant du matériau, π_1 , π_2 et π_3 sont les forces thermodynamiques associées respectivement aux fractions volumiques transformées, ξ_1 , ξ_2 et ξ_3 . Ces fractions volumiques correspondent respectivement à :

1. la fraction volumique d'austénite transformée en martensite auto-accommodée,
2. la fraction volumique d'austénite transformée en martensite orientée,
3. la fraction volumique de martensite auto-accommodée transformée en martensite orientée ($\dot{\xi}_3 \geq 0$).

D'où les relations suivantes :

$$\begin{aligned} z_{th} &= \dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_3 \\ z_{\sigma} &= \dot{\xi}_2 + \dot{\xi}_3 \\ z_a &= -\dot{\xi}_1 - \dot{\xi}_2 \end{aligned} \quad (1.3)$$

Les forces thermodynamiques sont définies par :

$$\begin{aligned} \pi_1 &= \tilde{\pi}(\varpi, T) - g_1(\xi_1, \xi_3) \\ \pi_2 &= \varpi : \lambda^{tr} + \tilde{\pi}(\varpi, T) - g_2(\xi_2, \xi_3) \\ \pi_3 &= \varpi : \lambda^d - g_3(\xi_2, \xi_3) \end{aligned} \quad (1.4)$$

Où g_1 , g_2 et g_3 sont des fonctions de forme dépendant du matériau, λ^{tr} le tenseur de transformation de l'austénite en martensite, λ^d le tenseur de transformation de la martensite auto-accommodée en martensite orientée et :

$$\tilde{\pi} = \frac{1}{2} \varpi : \Delta E : \varpi + \Delta \alpha : \varpi (T - T_0) - \rho \Delta c \left((T - T_0) - T \ln \left(\frac{T}{T_0} \right) \right) + \rho \Delta s_0 T - \rho \Delta u_0 \quad (1.5)$$

Avec ΔE , $\Delta \alpha$, T_0 , ρ , Δc , Δs_0 et Δu_0 des paramètres dépendant du matériau.

L'évolution de chacune des fractions volumiques transformées est donnée par la loi de normalité par rapport au critère seuil correspondant à la fraction volumique transformée :

$$\dot{\xi}_i = \gamma \frac{\partial \Phi_i}{\partial \pi_i} \quad \forall i \in \{1; 2; 3\} \quad (1.6)$$

Avec γ un paramètre dépendant du matériau.

L'évolution de la déformation de transformation de l'austénite en martensite orientée, $\dot{\varepsilon}^{tr}$, et celle de transformation de la martensite auto-accommodée en martensite orientée, $\dot{\varepsilon}^d$, sont définies proportionnellement à celles des fractions volumiques transformées, $\dot{\xi}_2$ et $\dot{\xi}_3$, respectivement :

$$\dot{\varepsilon}^{tr} = \lambda^{tr} \dot{\xi}_2 \quad (1.7)$$

$$\dot{\varepsilon}^d = \lambda^d \dot{\xi}_3 \quad (1.8)$$

Où λ^{tr} et λ^d sont respectivement le tenseur de transformation de l'austénite en martensite et le tenseur de transformation de la martensite auto-accommodée en martensite orientée. Ils sont définis colinéaires au déviateur des contraintes efficaces, \mathbb{s}^{eff} , en transformation directe de l'austénite en martensite orientée et colinéaires à la déformation de transformation maximale, ε_{max}^{tr} , en transformation inverse de la martensite orientée en austénite :

$$\lambda^{tr} = \begin{cases} \frac{3}{2} \gamma \frac{\mathbb{s}^{eff}}{\sigma^{eff}} & (\dot{\xi}_2 > 0) \\ \frac{\varepsilon_{max}^{tr}}{z_{max}} & (\dot{\xi}_2 < 0) \end{cases} \quad (1.9)$$

$$\lambda^d = \frac{3}{2} \gamma \frac{\mathbb{s}^{eff}}{\sigma^{eff}} \quad (1.10)$$

Avec $\varpi^{eff} = \varpi + \alpha$ où α est le tenseur du coefficient de dilatation thermique et \mathbb{s}^{eff} la partie déviatorique de ϖ^{eff} .

Afin de prendre en compte l'effet point mémoire (Orgéas *et al.* (1997)) lors de chargements cycliques avec de la transformation incomplète, l'expression du critère de transformation de l'austénite en martensite orientée donné dans l'équation 1.2 est modifiée :

$$\Phi_1 = \begin{cases} \pi_1 + \Delta\psi^n(\xi_1) - Y_1^n(\xi_1) & (\dot{\xi}_1 > 0) \\ -\pi_1 - \Delta\psi^n(\xi_1) - Y_1^n(\xi_1) & (\dot{\xi}_1 < 0) \end{cases} \quad (1.11)$$

Avec n le nombre de boucles internes « ouvertes » et les valeurs de $Y_1^n(\xi_1)$ et $\Delta\psi^n(\xi_1)$ qui sont données par :

$$Y_1^n = Y_1^{n-1}(\xi^n) \frac{1 - e^{-\frac{\gamma}{c_n}|\xi - \xi^n|}}{1 - e^{-\frac{\gamma}{c_n}|\xi^{n-1} - \xi^n|}} \quad (1.12)$$

$$\Delta\psi^n(\xi) = \begin{cases} \Delta\psi^n(\xi^n) - Y_1^n(\xi) & (\dot{\xi}_1 > 0) \\ \Delta\psi^n(\xi^n) + Y_1^n(\xi) & (\dot{\xi}_1 < 0) \end{cases} \quad (1.13)$$

Où Y_1^{n-1} et ξ^n sont respectivement les n èmes valeurs mémorisées de Y_1 et ξ à chaque inversion du sens de transformation entre l'austénite et la martensite orientée et $\Delta\psi^n(\xi^n)$ qui est donné par :

$$\Delta\psi^n(\xi^n) = \begin{cases} \Delta\psi^{n-1}(\xi^n) + Y_1^{n-1}(\xi^n) & (\dot{\xi}_1 > 0) \\ \Delta\psi^{n-1}(\xi^n) - Y_1^{n-1}(\xi^n) & (\dot{\xi}_1 < 0) \end{cases} \quad (1.14)$$

La figure 1.48 montre le résultat d'une simulation d'un essai d'effet mémoire assisté avec des boucles internes permettant de vérifier la prise en compte de l'effet mémoire. On peut y observer la boucle externe présente lorsque les transformations directe et inverse sont complètes, ainsi qu'une première boucle interne reliant les deux cotés de la boucle externe et enfin plusieurs petites boucles internes situées à l'intérieur de la première boucle interne.

Le résultat d'un chargement similaire à du retour contraint mais en refroidissement sur un alliage de Ni-Ti réalisé par Popov et Lagoudas (2007) est donné sur la figure 1.49. On observe l'évolution de la contrainte en fonction de la température, qui évolue différemment selon les transformations qui se produisent au cours du chargement. La première étape consiste à charger élastiquement l'Alliage à Mémoire de Forme dans l'état austénitique. Ensuite, un refroidissement entraîne à partir d'une certaine température, la transformation de l'austénite en martensite orientée, ce qui se traduit par la baisse de la contrainte. Lorsque la température continue de décroître, elle atteint un autre seuil à partir duquel l'austénite commence à se transformer en martensite auto-accommodée. En dessous d'une certaine température la transformation en martensite orientée s'arrête, puis c'est au tour de la transformation en martensite auto-accommodée lorsque toute l'austénite a disparue.

L'effet du cyclage est pris en compte pour les chargements super-élastiques grâce à la fraction volumique de martensite orientée cumulée :

$$z_c = \int_0^t |\dot{\xi}_3| d\tau \quad (1.15)$$

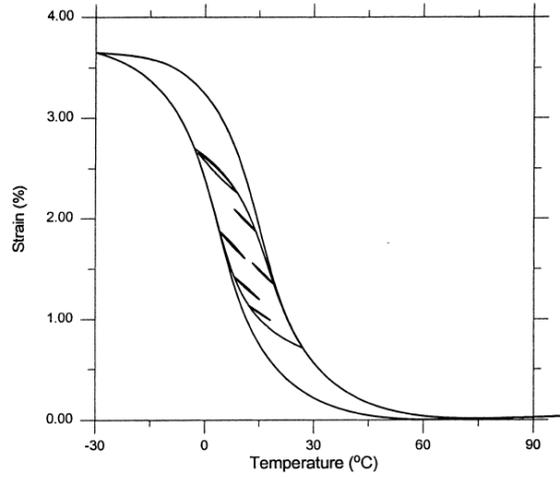


Figure 1.48 – Simulation d'un chargement d'effet mémoire assisté avec boucles internes sous une contrainte de 100 MPa par Bo et Lagoudas (1999b).

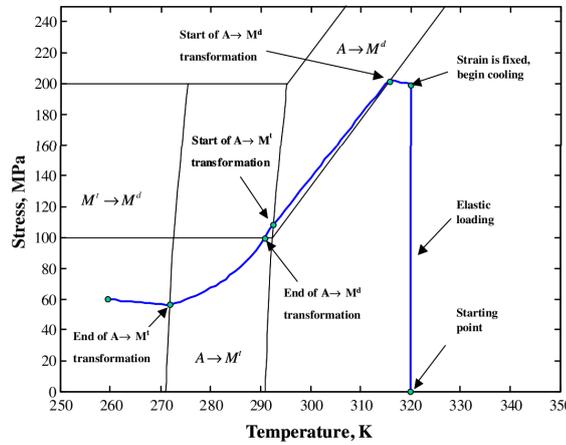


Figure 1.49 – Simulation d'un chargement de retour contraint en refroidissement par Popov et Lagoudas (2007).

Celle-ci va faire évoluer la déformation plastique de manière similaire à celle utilisée pour la plasticité induite par de la transformation (Taleb (2006) et Coret (2001)) :

$$\dot{\varepsilon}^p = \begin{cases} \frac{3}{2} C_1^p \frac{\sigma^{eff}}{\sigma^{eff}} e^{-\frac{z_c}{C_2^p}} \dot{z}_c & (\dot{\xi}_3 > 0) \\ C_1^p \frac{\varepsilon^{tr}}{z_{max}} e^{-\frac{z_c}{C_2^p}} \dot{z}_c & (\dot{\xi}_3 < 0) \end{cases} \quad (1.16)$$

Avec C_1^p et C_2^p des paramètres dépendant du matériau.

Les seize paramètres et trois fonctions de forme dépendant du matériau dans le modèle sont identifiés à partir d'un chargement de traction cyclique à contrainte maximale imposée sur un alliage de Ni-Ti réalisé par Lagoudas et Entchev (2004). Le résultat est donnée sur la figure 1.50a. Une identification à l'aide d'un essai d'effet mémoire assisté présentant une boucle interne est aussi nécessaire pour identifier les paramètres permettant la prise en compte de l'effet point mémoire (figure 1.50b).

Le modèle est ensuite validé sur un autre essai de traction cyclique, avec cette fois une déformation maximale imposée (figure 1.51a). On observe une bonne correspondance

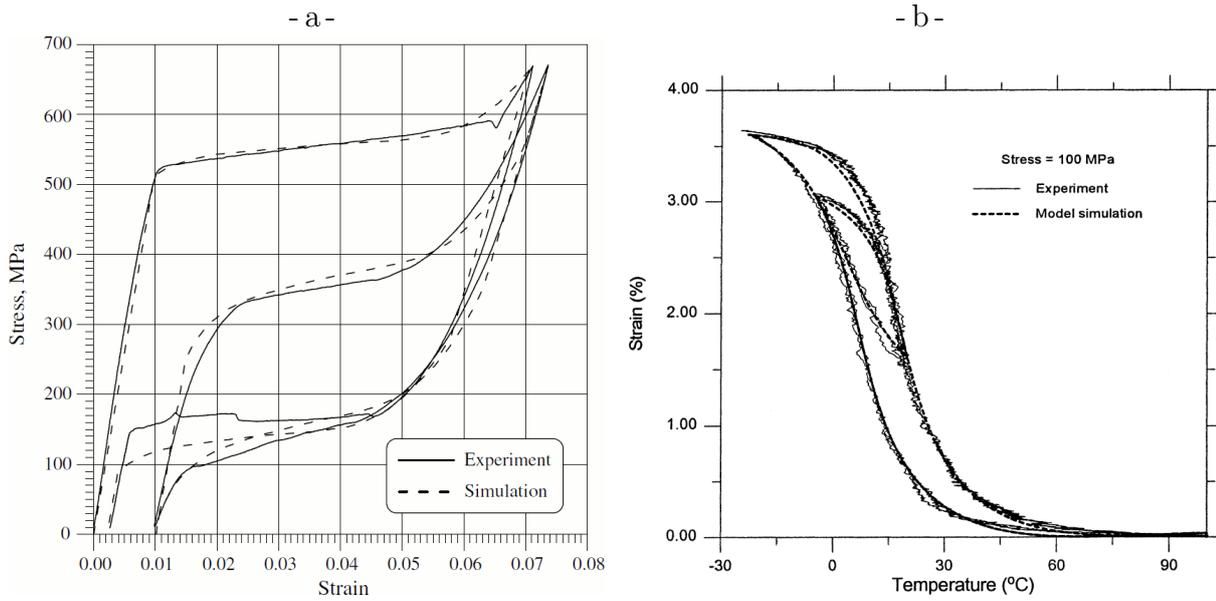


Figure 1.50 – Comparaison des résultats des simulations et des essais permettant l’identification des paramètres du modèle pour des chargements : a) de traction cyclique à contrainte maximale imposée pour le premier et le 20^e cycle par Lagoudas et Entchev (2004), et b) d’effet mémoire assisté avec points mémoire sous une contrainte de 100 MPa par Bo et Lagoudas (1999b).

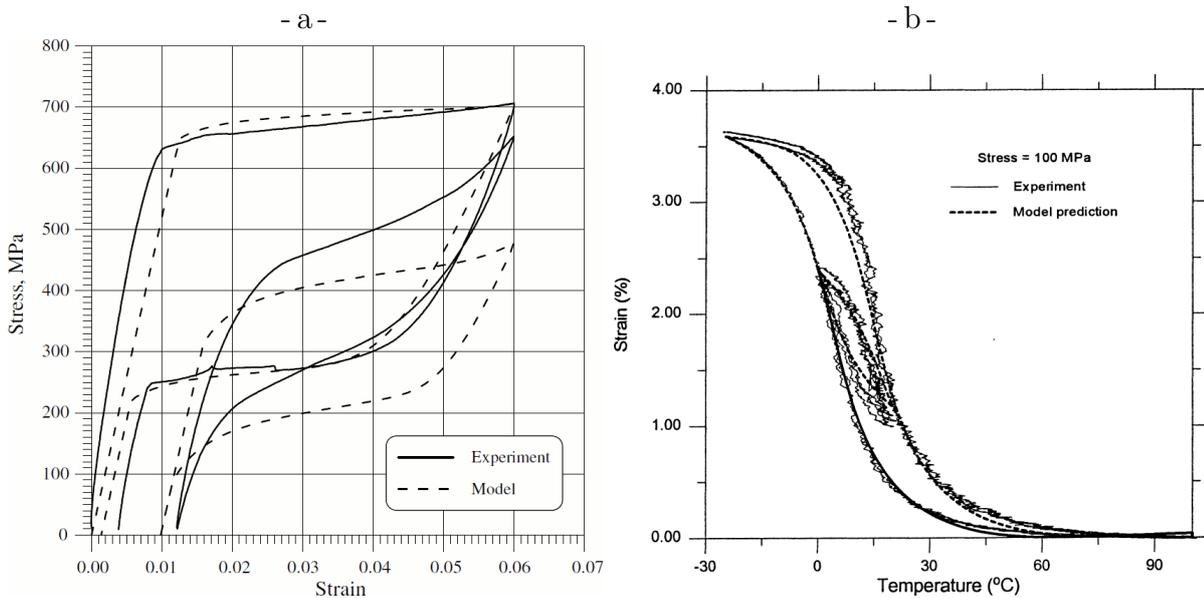


Figure 1.51 – Comparaison des résultats des simulations et des essais permettant la validation du comportement du modèle pour des chargements : a) de traction cyclique à déformation maximale imposée pour le premier et le 20^e cycle par Lagoudas et Entchev (2004), et b) d’effet mémoire assisté avec points mémoire sous une contrainte de 100 MPa par Bo et Lagoudas (1999b).

entre les courbes, notamment l’augmentation de la déformation résiduelle et la diminution de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage, lors de l’essai et lors de la simulation. Le comportement sous chargement thermo-mécanique avec effet point mémoire

est aussi validé avec un essai similaire à l'essai d'identification (figure 1.51b). On observe une bonne correspondance entre les courbes, notamment la taille et la forme de la boucle interne qui sont relativement bien respectées. Mais ces résultats sont à nuancer à cause de la faible différence entre les essais servant à l'identification des paramètres et les essais de validation du modèle. Le tableau 1.1 résume les principales caractéristiques du modèle.

Matériau	Ni-Ti
Chargement de super-élasticité	oui
Chargement thermo-mécanique	oui
Chargement de pseudo-plasticité	oui
Dissymétrie traction-compression	non
Chargement multiaxial non-proportionnel	non
Effet point mémoire	oui
Baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage	oui
Variables d'état permettant la description du comportement cyclique	- déformation plastique - fraction volumique cumulée

Tableau 1.1 – Caractéristiques principales du modèle de comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme développé par Lagoudas et Entchev (2004).

1.2.2 Modèle d'Auricchio *et al.*

Le modèle développé par Auricchio et Sacco (2001); Auricchio et Petrini (2004) et Auricchio *et al.* (2007) est un modèle de comportement thermo-mécanique multiaxial cyclique. Il permet de simuler aussi bien le comportement super-élastique que pseudo-plastique mais pas l'effet mémoire assisté. L'alliage utilisé pour l'identification des paramètres et la validation du modèle est en Ni-Ti.

Il utilise la déformation totale, ε , et la température, T , comme variables observables et la déformation de transformation, ε^{tr} , et plastique, ε^p , comme variables internes.

Le modèle se base sur la partition de la déformation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^{tr} + \varepsilon^p \quad (1.17)$$

La transformation et la plasticité sont pilotées à l'aide d'un unique critère :

$$f = \bar{X} + \kappa \bar{Q} - R \quad (1.18)$$

Avec κ un paramètre dépendant du matériau et les forces thermodynamiques, \mathbb{X} et \mathbb{Q} , sont données par :

$$\begin{aligned} \mathbb{X} &= -\frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon^{tr}} = \mathbb{S} - \beta \langle T - M_f \rangle \frac{\varepsilon^{tr} - \varepsilon^p}{\varepsilon^{tr} - \varepsilon^p} - h \varepsilon^{tr} + A \varepsilon^p - \gamma \frac{\varepsilon^{tr}}{\varepsilon^{tr}} \\ \mathbb{Q} &= -\frac{\partial \Psi}{\partial \varepsilon^p} = \beta \langle T - M_f \rangle \frac{\varepsilon^{tr} - \varepsilon^p}{\varepsilon^{tr} - \varepsilon^p} - H \varepsilon^p + A \varepsilon^{tr} \end{aligned} \quad (1.19)$$

Avec β , M_f , h , A , H et γ des paramètres dépendant du matériau.

L'évolution de la déformation de transformation suit la loi de normalité :

$$\dot{\varepsilon}^{tr} = \dot{z} \frac{\partial f}{\partial \mathbb{X}} = \dot{z} \frac{\mathbb{X}}{\bar{X}} \quad (1.20)$$

Le comportement cyclique est pris en compte grâce à la déformation plastique qui évolue en suivant elle aussi la loi de normalité :

$$\dot{\epsilon}^p = \dot{z} \frac{\partial f}{\partial Q} = \dot{z} \kappa \frac{Q}{Q} \quad (1.21)$$

L'identification des sept paramètres matériau n'est pas montrée, mais une validation qualitative est réalisée en observant le comportement du modèle pour différents trajets de chargements. Tout d'abord un chargement de traction uniaxiale cyclique est simulé (figure 1.52). On observe la déformation résiduelle qui croît et sature avec le nombre de cycles. La baisse de la contrainte seuil de transformation est aussi prise en compte.

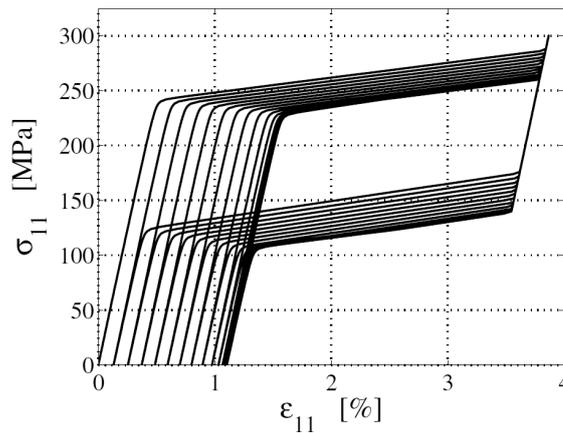


Figure 1.52 – Simulation d'un chargement super-élastique cyclique par Auricchio *et al.* (2007).

Le deuxième chargement utilisé est un chargement de traction-compression (figure 1.53). On observe que les contraintes seuil de transformation en traction et en compression sont identiques. La dissymétrie traction-compression n'est donc pas prise en compte dans le modèle.

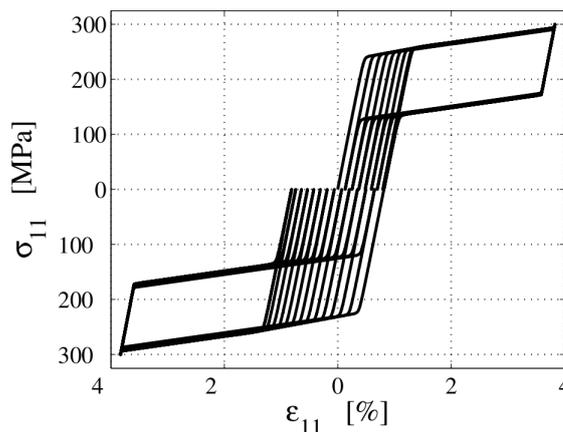


Figure 1.53 – Simulation d'un chargement super-élastique de traction cyclique suivie de compression cyclique par Auricchio *et al.* (2007).

Le troisième chargement consiste en un essai de traction dans le domaine martensitique (pseudo-plasticité) suivi d'un chauffage permettant la disparition de la déformation de transformation apparue. Ce chargement est répété un certain nombre de fois afin de voir l'influence du cyclage. On observe sur la figure 1.54 l'apparition d'une déformation résiduelle qui croît et sature avec l'augmentation du nombre de cycles, ainsi que la baisse de la contrainte seuil de pseudo-plasticité.

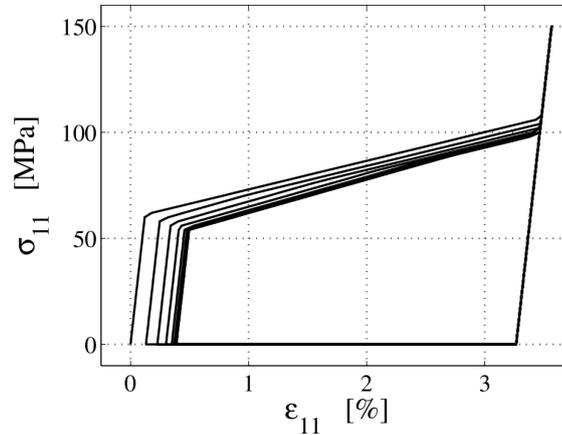


Figure 1.54 – Simulation d'un chargement cyclique de pseudo-plasticité suivi d'un chauffage par Auricchio *et al.* (2007).

Enfin les derniers chargements utilisés sont des chargements multiaxiaux non-proportionnels (figures 1.55 et 1.56). Ils permettent de vérifier le bon fonctionnement du modèle en multiaxial non-proportionnel et en particulier l'apparition de la déformation permanente après un cycle de chargement.

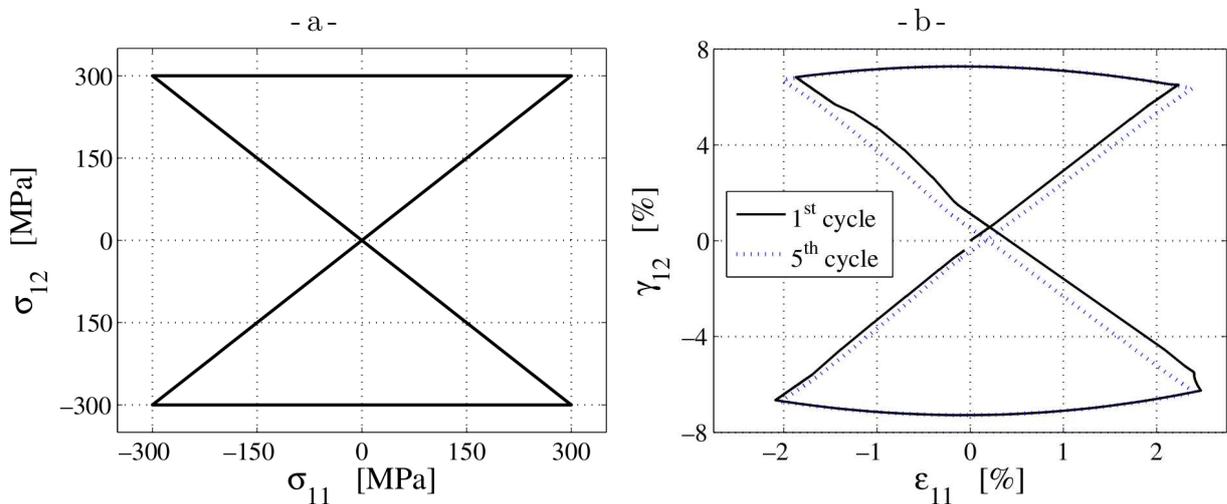


Figure 1.55 – Simulation d'un chargement multiaxial non-proportionnel cyclique en forme de sablier par Auricchio *et al.* (2007) : a) trajet de chargement, et b) réponse en déformation.

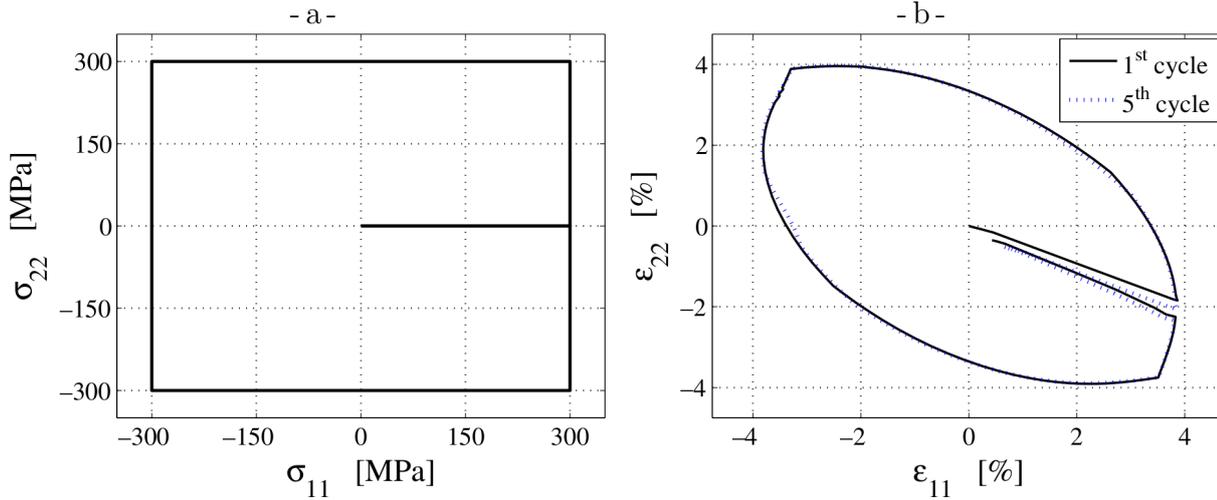


Figure 1.56 – Simulation d’un chargement multiaxial non-proportionnel cyclique carré par Auricchio *et al.* (2007) : a) trajet de chargement, et b) réponse en déformation.

Le tableau 1.2 résume les principales caractéristiques du modèle.

Matériau	Ni-Ti
Chargement de super-élasticité	oui
Chargement thermo-mécanique	non
Chargement de pseudo-plasticité	oui
Dissymétrie traction-compression	non
Chargement multiaxial non-proportionnel	oui
Effet point mémoire	non
Baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage	oui
Variables d’état permettant la description du comportement cyclique	- déformation plastique

Tableau 1.2 – Caractéristiques principales du modèle de comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme développé par Auricchio *et al.* (2007).

1.2.3 Modèle de Mounni *et al.*

Le modèle développé par Zaki et Mounni (2007a,b) et Mounni *et al.* (2008) est un modèle de comportement multiaxial cyclique des Alliages à Mémoire de Forme. Il permet de simuler aussi bien le comportement super-élastique que l’effet mémoire assisté et la pseudo-plasticité. L’identification des paramètres et la validation du modèle ont été réalisées sur un alliage de Ni-Ti.

Il utilise la déformation, ϵ , et la température, T , comme variables observables et la fraction volumique de martensite, z , la déformation de transformation, ϵ^{tr} , et la déformation résiduelle, ϵ^r , comme variables internes.

Il se base sur la partition de la déformation suivante :

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^e + z\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} + \boldsymbol{\varepsilon}^r \quad (1.22)$$

La transformation est pilotée à l'aide de trois critères de transformation qui vont piloter respectivement la transformation directe, la transformation inverse et la réorientation :

$$\begin{aligned} f_z^1 &= \left(\frac{1}{3}El_{MA}\bar{\sigma}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3}El_{MA} + P_{MA} \right) \text{tr}^2(\mathbb{W}) - C(T) \right) \dots \\ &\quad + \left(\mathbb{W} + \frac{2}{3}\mathbb{B} \right) : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} - (G+b)z - a(1-z) - \left((\alpha-\beta)z + \frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{2}{3}\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} \right) \\ f_z^2 &= - \left(\frac{1}{3}El_{MA}\bar{\sigma}^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3}El_{MA} + P_{MA} \right) \text{tr}^2(\mathbb{W}) - C(T) \right) \dots \\ &\quad - \left(\mathbb{W} + \frac{2}{3}\mathbb{B} \right) : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} + (G-b)z - a(1-z) + \left((\alpha-\beta)z + \frac{\beta}{2} \right) \left(\frac{2}{3}\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} \right) \\ f_{ori} &= \bar{X} - zY \end{aligned} \quad (1.23)$$

Avec El_{MA} , P_{MA} et Y des paramètres dépendant du matériau et a , b , G , α , β et $C(T)$ des paramètres évoluant au cours du cyclage en fonction de la fraction volumique cumulée de martensite, z_c , avec une relation du type :

$$P = P_0 + (P_{sat} - P_0) \left(1 - e^{-\frac{z_c}{\tau}} \right) \quad (1.24)$$

Où P_0 , P_{sat} et τ sont des paramètres dépendant du matériau, sauf pour $C(T)$ pour lequel :

$$\begin{aligned} C_0(T) &= \xi_0 \left(T - A_{f_0}^0 \right) + \kappa_0 \\ C_{sat}(T) &= \xi_{sat} \left(T - A_{f_{sat}}^0 \right) + \kappa_{sat} \end{aligned} \quad (1.25)$$

Avec ξ_0 , ξ_{sat} , $A_{f_0}^0$, $A_{f_{sat}}^0$, κ_0 et κ_{sat} des paramètres dépendant du matériau.

La force thermodynamique, \mathbb{X} , est donnée par :

$$\mathbb{X} = \left(\mathbb{s} + \frac{2}{3}\mathbb{B} \right) - \frac{2}{3\gamma^2} \left(\left(\mathbb{s} + \frac{2}{3}\mathbb{B} \right) : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} \right) \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} \quad (1.26)$$

Avec γ qui évolue suivant une relation du même type que l'équation 1.24 et \mathbb{s} le déviateur des contraintes.

La déformation de transformation, $\boldsymbol{\varepsilon}^{tr}$, n'évolue pas lors des transformations directe et inverse, car la partition de la déformation prend directement en compte la fraction volumique de martensite (équation 1.22). Par contre, elle évolue en transformation de réorientation en suivant la loi de normalité :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} = \eta \frac{\partial f_{ori}}{\partial \mathbb{X}} = \frac{3}{2} \eta \frac{\mathbb{X}}{\bar{X}} \quad (1.27)$$

Avec le multiplicateur de transformation, η , qui est défini par :

$$\eta = \begin{cases} \frac{3}{2(\alpha z + \beta(1-z) + 3\mu_{eq}z)} \dot{\mathbb{s}} : \frac{\mathbb{X}}{\bar{X}} & \left(\sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr}} < \gamma \right) \\ \frac{3}{2\left(\frac{1}{\gamma^2}\left(\mathbb{s} + \frac{2}{3}\mathbb{B}\right) : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr} + 3\mu_{eq}z\right)} \dot{\mathbb{s}} : \frac{\mathbb{X}}{\bar{X}} & \left(\sqrt{\frac{2}{3}\boldsymbol{\varepsilon}^{tr} : \boldsymbol{\varepsilon}^{tr}} = \gamma \right) \end{cases} \quad (1.28)$$

Avec μ_{eq} un paramètre dépendant du matériau.

Le comportement cyclique est pris en compte grâce à trois variables d'état : le tenseur de déformation résiduelle, ε^r , le tenseur de contrainte interne, \mathbb{B} , et la fraction volumique de martensite cumulée, z_c . Celle-ci va croître au cours du cyclage :

$$z_c = \int_0^t |\dot{z}| d\tau \quad (1.29)$$

Et faire évoluer les deux autres :

$$\dot{\varepsilon}^r = \frac{3}{2} \frac{\varepsilon_{sat}^r}{\tau} \frac{\mathbb{S}}{\bar{\sigma}} e^{-\frac{z_c}{\tau}} \dot{z}_c \quad (1.30)$$

$$\dot{\mathbb{B}} = \frac{2}{3} \frac{B_{sat}}{\tau} \frac{\varepsilon^{tr}}{\sqrt{\frac{2}{3} \varepsilon^{tr} : \varepsilon^{tr}}} e^{-\frac{z_c}{\tau}} \dot{z}_c \quad (1.31)$$

Où ε_{sat}^r et B_{sat} sont des paramètres dépendant du matériau.

Les vingt-cinq paramètres du modèle qui dépendent du matériau sont identifiés à partir de quatre essais :

- un essai de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) sur un échantillon d'Alliage à Mémoire de Forme non éduqué, pour déterminer les températures caractéristiques de transformation, M_{s0}^0 , M_{f0}^0 , A_{s0}^0 et A_{f0}^0 ,
- un autre essai de calorimétrie différentielle à balayage sur un échantillon éduqué, pour déterminer les températures caractéristiques de transformation à saturation, $M_{s sat}^0$, $M_{f sat}^0$, $A_{s sat}^0$ et $A_{f sat}^0$,
- un essai de traction en pseudo-plasticité sur un échantillon non-éduqué (figure 1.57),

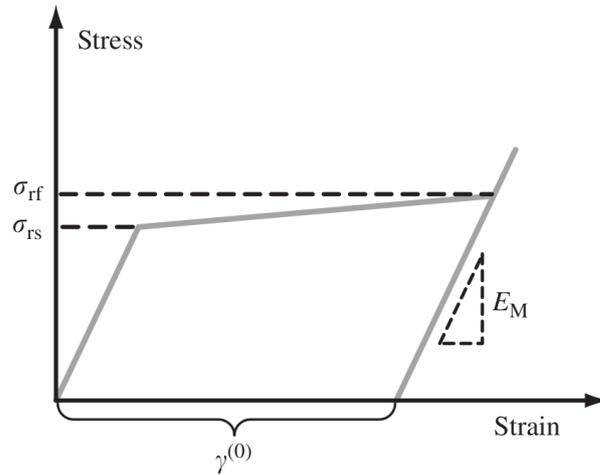


Figure 1.57 – Identification de paramètres dépendant du matériau sur un chargement pseudo-plastique pour le modèle de Zaki et Moumni (2007b).

- et un essai de traction cyclique en super-élasticité (figure 1.58).

Les échantillons éduqués correspondent à des échantillons qui ont été soumis à un chargement cyclique jusqu'à stabilisation du comportement.

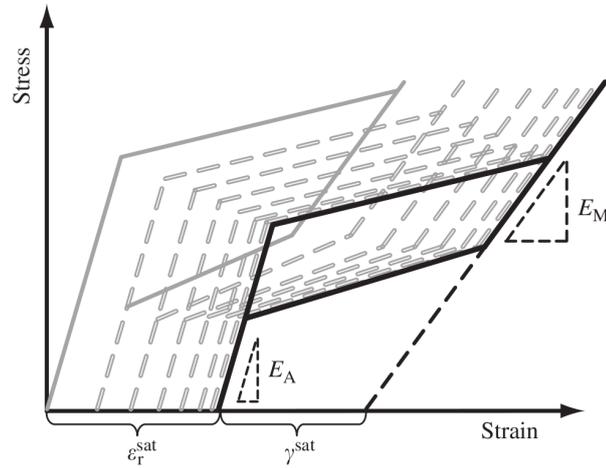


Figure 1.58 – Identification de paramètres dépendant du matériau sur un chargement super-élastique cyclique pour le modèle de Zaki et Moumni (2007a).

Le résultat de la simulation d'un chargement de super-élasticité cyclique sur un alliage en Ni-Ti réalisé par Zaki et Moumni (2007b) est donné sur la figure 1.59. On observe l'évolution de la déformation qui croît jusqu'à saturation au cours des cycles, mais aussi la contrainte seuil de transformation qui diminue à chaque recharge.

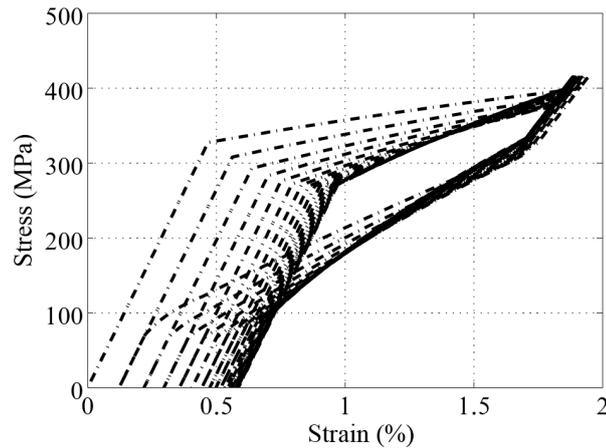


Figure 1.59 – Simulation d'un chargement super-élastique cyclique par Zaki et Moumni (2007a).

La figure 1.60 montre la simulation d'un essai de cyclage thermique sous contrainte (100 MPa). On observe une faible évolution de la déformation lors du premier cycle, puis une croissance avec saturation des déformations à basse et haute températures lors des cycles suivants.

La figure 1.61 montre la comparaison entre un essai de traction multiaxial réalisé par Tokuda *et al.* (1999) et le résultat de la simulation de cet essai par le modèle de Moumni *et al.* (2008). Ce résultat permet de valider qualitativement le comportement du modèle pour des chargements multiaxiaux.

Le tableau 1.3 résume les principales caractéristiques du modèle.

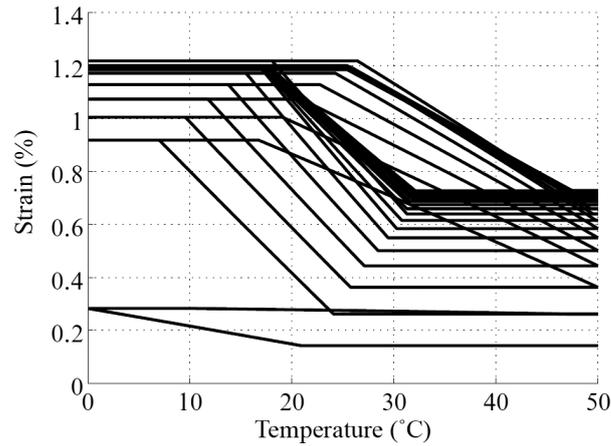


Figure 1.60 – Simulation d'un chargement thermo-mécanique cyclique par Zaki et Moumni (2007a) avec une contrainte appliquée de 100 MPa.

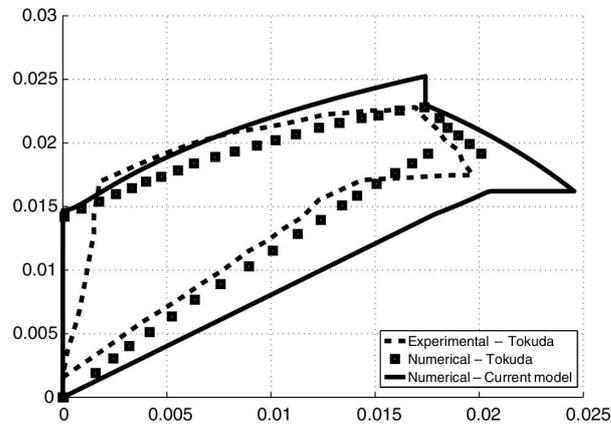


Figure 1.61 – Comparaison de la simulation d'un chargement multiaxial par Moumni *et al.* (2008) avec les résultats d'essais obtenus par Tokuda *et al.* (1999).

Matériau	Ni-Ti
Chargement de super-élasticité	oui
Chargement thermo-mécanique	oui
Chargement de pseudo-plasticité	oui
Dissymétrie traction-compression	non
Chargement multiaxial non-proportionnel	oui
Effet point mémoire	non
Baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage	oui
Variables d'état permettant la description du comportement cyclique	- fraction volumique cumulée - contraintes internes - déformation résiduelle

Tableau 1.3 – Caractéristiques principales du modèle de comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme développé par Zaki et Moumni (2007a).

1.2.4 Modèle de L'excellent *et al.*

Le modèle développé par Tanaka *et al.* (1995); L'excellent et Bourbon (1996) et Malécot (2005) permet de simuler des chargements de super-élasticité, de pseudo-plasticité et d'effet mémoire assisté cycliques sur des Alliages à Mémoire de Forme. Par contre, il n'est développé qu'en uniaxial. Les alliages utilisés pour l'identification des paramètres et la validation du modèle sont en Ni-Ti, Cu-Al-Be et Cu-Zn-Al.

Il utilise la déformation, ε , et la température, T , comme variables observables et la déformation de transformation, ε^{tr} et la déformation thermique, ε^θ comme variables internes.

Le modèle se base sur la partition de la déformation suivante :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^\theta + \varepsilon^{tr} \quad (1.32)$$

La transformation est pilotée à l'aide de deux critères qui vont piloter respectivement la transformation directe et la transformation inverse :

$$\begin{aligned} f^1 &= \pi_f + (A_1 + B_1 z) \ln(1 - z) + C_1 z \\ f^2 &= -\pi_f + (A_2 + B_2(1 - z)) \ln z + C_2 z \end{aligned} \quad (1.33)$$

Avec A_1 , A_2 , B_1 , B_2 , C_1 et C_2 des paramètres dépendant du matériau et π_f la force thermodynamique donnée par :

$$\pi_f = \Delta u^* - T \Delta s^* + \frac{\gamma \sigma}{\rho} - (1 - 2z) \phi \quad (1.34)$$

Avec Δu^* , Δs^* , γ et ρ des paramètres dépendant du matériau et ϕ l'énergie libre spécifique :

$$\phi = \bar{u}_0 - T \bar{s}_0 \quad (1.35)$$

Où \bar{u}_0 et \bar{s}_0 sont des paramètres dépendant du matériau.

Puisque le modèle n'est défini qu'en uniaxial, la déformation de transformation, ε^{tr} , est directement proportionnelle à la fraction volumique de martensite orientée, z_σ :

$$\varepsilon^{tr} = \gamma z_\sigma \quad (1.36)$$

Le comportement cyclique est pris en compte en introduisant une fraction de martensite orientée bloquée, z_c , qui évolue avec saturation selon la loi suivante :

$$\dot{z}_c = m_0 (z_c^{max} - z_c)^p \langle \dot{z}_\sigma \rangle \quad (1.37)$$

Où m_0 , z_c^{max} et p sont des paramètres dépendant du matériau. Cette martensite bloquée va alors introduire une déformation résiduelle, ε^r :

$$\varepsilon^r = \gamma z_c \quad (1.38)$$

L'identification des quinze paramètres dépendant du matériau n'est pas expliquée, mais la validation du comportement du modèle a été réalisée sur plusieurs types d'essais et de matériaux. Le comportement pseudo-plastique est validé sur un alliage en Cu-Al-Be

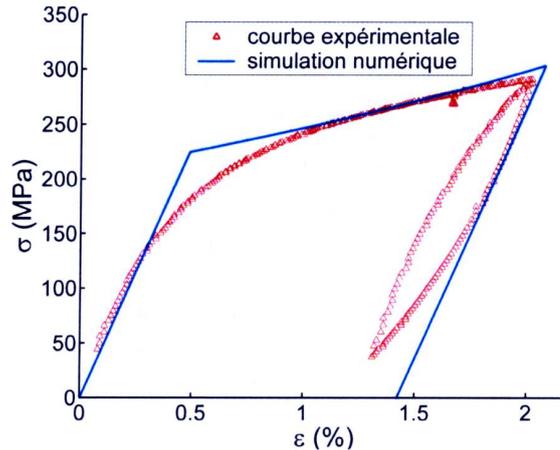


Figure 1.62 – Comparaison de la simulation d’un chargement de pseudo-plasticité et de l’essai correspondant sur un alliage de Cu-Al-Be par Malécot (2005).

(figure 1.62). On observe une bonne correspondance malgré l’orientation de la martensite auto-accommodée décrite de manière linéaire, cependant l’effet caoutchoutique lors de la décharge n’est pas pris en compte.

L’effet mémoire assisté est quant à lui validé sur un alliage de Cu-Zn-Al avec une contrainte imposée de 50 MPa. La figure 1.63 montre que l’amplitude de déformation de l’hystérésis ainsi que les températures de transformations sont bien respectées, par contre, les cinétiques de transformation en début de transformations directe et inverse sont trop « brutales » comparées aux résultats d’essai.

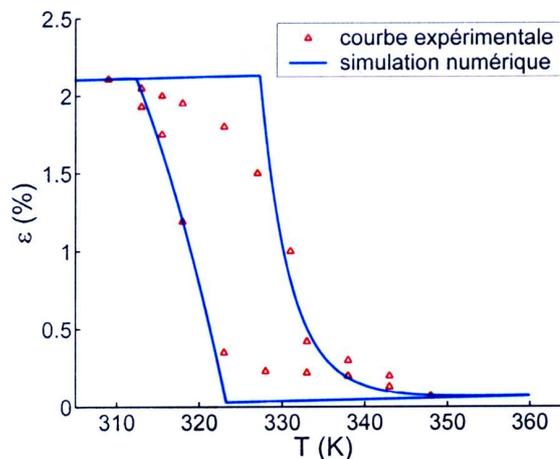


Figure 1.63 – Comparaison de la simulation d’un chargement d’effet mémoire assisté sous une contrainte de 50 MPa et de l’essai correspondant sur un alliage de Cu-Zn-Al par Malécot (2005).

Le comportement cyclique du modèle a été validé en simulant des chargements de traction super-élastique sur deux Alliages à Mémoire de Forme différents : un Ni-Ti et un Cu-Al-Be. La figure 1.64 montre les résultats de la simulation comparés à ceux de l’essai correspondant. On observe l’évolution de la déformation résiduelle qui correspond bien

avec les essais (figure 1.64b) ainsi que la diminution de la contrainte seuil de transformation qui décroît au cours des cycles. Le point négatif est l'évolution de la déformation au début de la décharge qui suit une pente élastique, alors que la transformation inverse se met rapidement en place lors de l'essai.

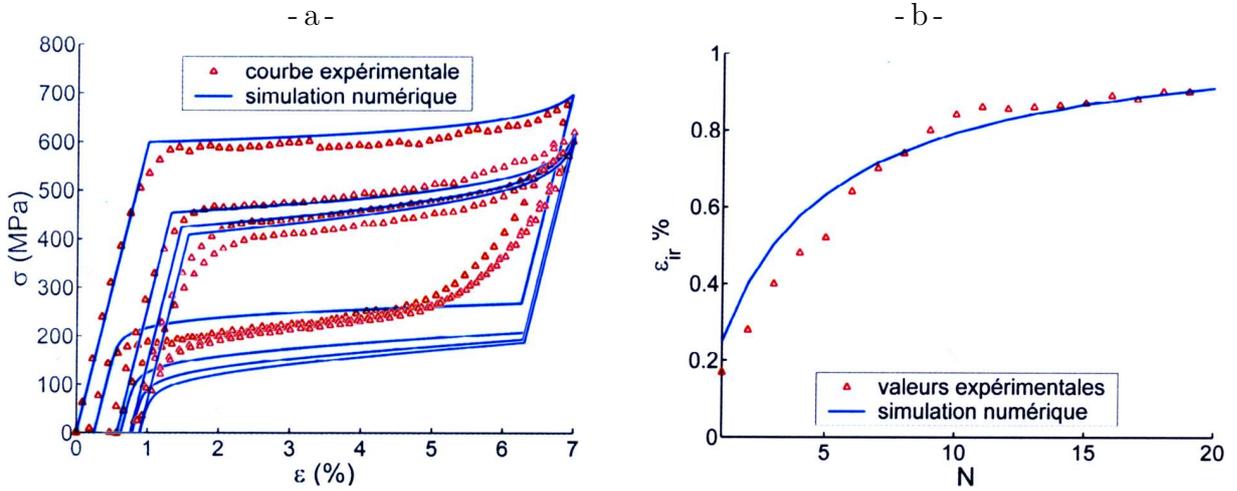


Figure 1.64 – Comparaison de la simulation d'un chargement super-élastique cyclique et de l'essai correspondant sur un alliage de Ni-Ti par Malécot (2005) : a) courbes contrainte-déformation pour les cycles 1, 5, 10 et 20, et b) évolution de la déformation résiduelle.

Le même type de chargement est simulé avec les paramètres d'un alliage en Cu-Al-Be (figure 1.65). On observe aussi une assez bonne correspondance de l'évolution de la déformation résiduelle (figure 1.65b) et la diminution de la contrainte seuil de transformation qui décroît au cours des cycles. Par contre, la forme de l'hystérésis est très éloignée de celle observée lors de l'essai.

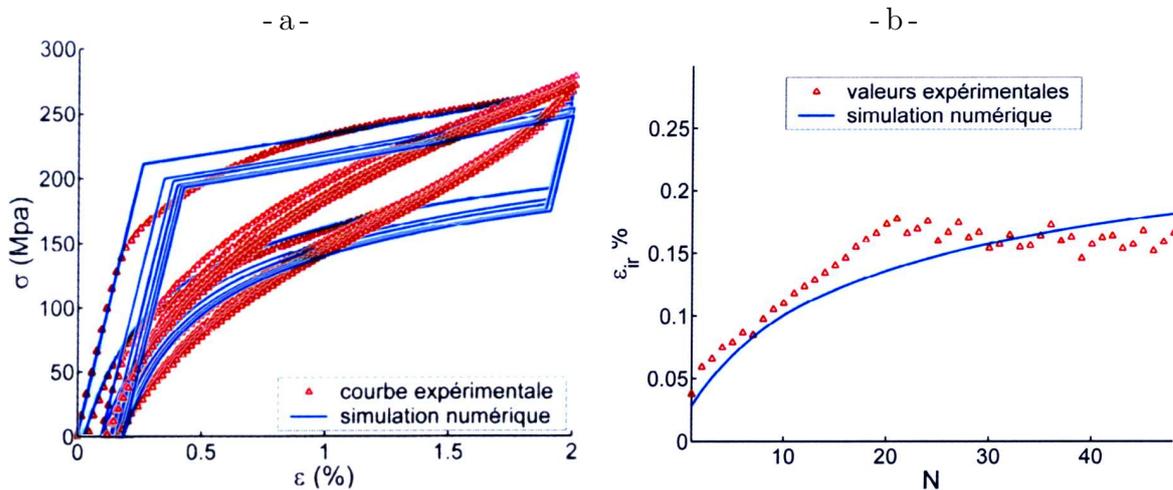


Figure 1.65 – Comparaison de la simulation d'un chargement super-élastique cyclique et de l'essai correspondant sur un alliage de Cu-Al-Be par Malécot (2005) : a) courbes contrainte-déformation pour les cycles 1, 10, 20, 30, 40 et 50, et b) évolution de la déformation résiduelle.

Le tableau 1.4 résume les caractéristiques principales du modèle.

Matériaux	Ni-Ti, Cu-Al-Be, Cu-Zn-Al
Chargement de super-élasticité	oui
Chargement thermo-mécanique	oui
Chargement de pseudo-plasticité	oui
Dissymétrie traction-compression	non
Chargement multiaxial non-proportionnel	non
Effet point mémoire	non
Baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage	oui
Variables d'état permettant la description du comportement cyclique	- fraction volumique de martensite bloquée - déformation résiduelle

Tableau 1.4 – Caractéristiques principales du modèle de comportement cyclique des Alliages à Mémoire de Forme développé par Malécot (2005).

1.2.5 Comparaison entre les modèles

Les propriétés de ces modèles de comportement cyclique pour les Alliages à Mémoire de Forme sont résumées dans le tableau 1.5. On peut remarquer que tous les modèles permettent de simuler des chargements de super-élasticité et de pseudo-plasticité et presque tous pour des chargements thermo-mécaniques. La moitié des modèles permet de simuler le comportement sous chargement multiaxial non-proportionnel alors qu'un seul prend en compte le mécanisme de réorientation et aucun ne prend en compte la dissymétrie traction-compression. Ce sont pourtant des caractéristiques qui jouent un rôle important pour ce type de chargement. Seul le modèle développé par Bo et Lagoudas (1999b) permet de prendre en compte l'effet point mémoire qui apparaît lors de charges et décharges partielles. Enfin tous les modèles prennent en compte la diminution de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage.

Le comportement cyclique est modélisé grâce à l'introduction d'une déformation plastique pour deux des modèles présentés (Lagoudas et Entchev (2004) et Auricchio *et al.* (2007)). Les deux autres modèles utilisent des contraintes internes associées à une déformation résiduelle (Zaki et Moumni (2007a)) ou à une déformation résiduelle induite par de la martensite bloquée (Malécot (2005)).

Modèle	Lagoudas	Auricchio	Zaki & Moumni	Excellent
Matériaux	Ni-Ti	Ni-Ti	Ni-Ti	Ni-Ti, Cu-Al-Be, Cu-Zn-Al
Chargement de super-élasticité	oui	oui	oui	oui
Chargement thermo-mécanique	oui	non	oui	oui
Chargement de pseudo-plasticité	oui	oui	oui	oui
Dissymétrie traction-compression	non	non	non	non
Chargement multiaxial non-proportionnel	non	oui	oui	non
Effet point mémoire	oui	non	non	non
Baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage	oui	oui	oui	oui
Variables d'état permettant la description du comportement cyclique	- déformation plastique - fraction volumique cumulée	- déformation plastique	- fraction volumique cumulée - contraintes internes - déformation résiduelle	- fraction volumique de martensite bloquée - déformation résiduelle

Tableau 1.5 – Comparaison entre les différents modèles de comportement cyclique pour les Alliages à Mémoire de Forme.

1.3 Conclusion

Les Alliages à Mémoire de Forme présentent donc des propriétés spécifiques qui sont utilisées dans un grand nombre d'applications. Mais ces applications soumettent généralement l'Alliage à Mémoire de Forme à un chargement cyclique. Or les propriétés des Alliages à Mémoire de Forme soumis à ce type de chargement évoluent et peuvent conduire à leur dégradation, voir à la rupture du mécanisme.

Il est donc nécessaire de pouvoir modéliser les propriétés cycliques des Alliages à Mémoire de Forme afin de pouvoir développer de nouvelles applications et d'avoir des outils prédictifs pour leur comportement de structures et leur tenue en service sous un chargement cyclique. Mais le comportement des Alliages à Mémoire de Forme sous chargement cyclique reste très peu étudié. Aucun modèle ne permet de le simuler en prenant en compte l'ensemble de ses particularités. On remarque aussi que différentes approches sont envisageables et utilisées dans les modèles proposés afin de décrire spécifiquement le comportement cyclique.

Dans la suite, nous commencerons donc par étudier expérimentalement le comportement des Alliages à Mémoire de Forme sous divers chargements cycliques et nous nous intéresserons en particulier à l'origine de la déformation résiduelle. Puis, à partir des résultats obtenus, nous proposerons un modèle permettant de décrire, dans un premier temps, le comportement des Alliages à Mémoire de Forme sous chargement super-élastique multiaxial non-proportionnel cyclique, tout en prenant en compte la dissymétrie traction-compression, l'effet point mémoire et la baisse de la contrainte seuil de transformation au cours du cyclage. Ensuite, nous présenterons une évolution du modèle permettant d'améliorer le modèle précédemment développé et de simuler des chargements d'effet mémoire assisté.

