

## IV-6. CARACTERISATION MECANIQUE EN PSEUDOELASTICITE

### IV-6.1 Procédure de manipulation

#### IV-6.1.1 Les échantillons

Pour étudier l'effet pseudoélastique, nous avons utilisé les échantillons du groupe T (tôle), car leurs températures de début de transformation  $M_s$  sont relativement élevées. Il sera plus commode de faire les essais à la température ambiante en particulier pour les cycles isothermes. Le tableau IV-2 résume les caractéristiques des différents échantillons utilisés dans cette partie.

Echantillons	W (mm)	d (mm)	$M_s$ (°C)	$A_f$ (°C)	$M_f$ (°C)	$A_s$ (°C)	$H_T$ (°C)
T0	2	3,8	65	75	53	68	13
T3	1,2	3,8	66	81	53	76	18
T4	1,2	4,6	66	81	53	76	13
T7	1,2	3,95	64	77	52	72	15

**Tableau IV-2:** Caractéristiques des échantillons testés par effet pseudoélastique

### IV-6.2 Description d'un cycle mécanique par effet pseudoélastique

Dans ces essais, la mise en place des échantillons sur le dispositif de flexion est analogue à celle de l'étude précédente. Le cycle charge-décharge est effectué à une température inférieure à la température de fin de transformation martensitique  $M_f$ . Il est donc nécessaire de porter les échantillons à une température inférieure à  $M_f$  ( $T_i = 20^\circ\text{C}$ ), avant de le soumettre à un cycle mécanique charge-décharge (0- $\sigma$ -0). La température ambiante est justement adéquate pour cette étude, c'est d'ailleurs la raison pour laquelle a été choisi ce type d'échantillons.

L'application de la contrainte à l'état martensitique conduit à une réorientation des variantes de martensite dans le sens de la contrainte appliquée. Lors de la décharge, on observe un retour partiel des variantes de martensite, néanmoins une déformation permanente notée déformation résiduelle  $\varepsilon_r$  persiste pour  $\sigma = 0$ . Celle-ci est due à une déformation plastique engendrée par l'accommodation des variantes de martensite (figure IV-29). L'allure

de la courbe  $\sigma$ – $\varepsilon$  obtenue est semblable à celle présentée dans la littérature pour des modes de sollicitation différents [4, 8, 11, 12, 13, 26, 27, 28].

Il est très important de comprendre le rôle de cette déformation résiduelle. Cette déformation existe malgré que la contrainte appliquée (externe) soit nulle. Ainsi, si l'on soumet de nouveau l'échantillon à un cycle mécanique on observera une déformation résiduelle qui sera une déformation cumulée en d'autres termes il faut sommer les déformations résiduelles engendrées à chaque nouveau cycle. On montrera par la suite la justification de l'existence de cette déformation et son effet cumulatif.

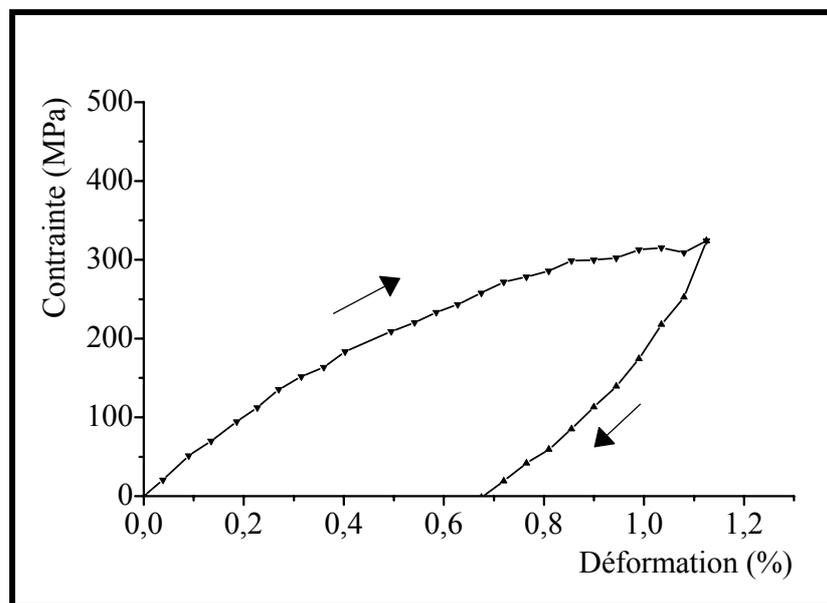
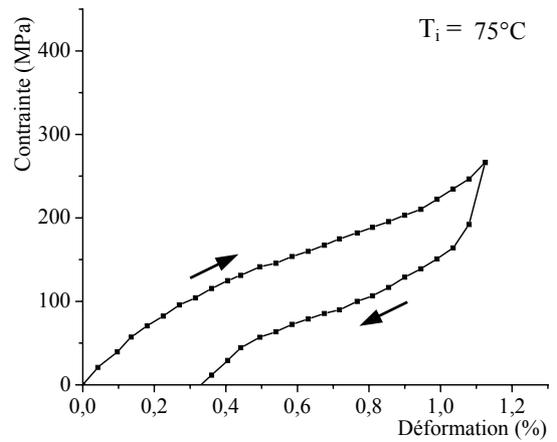
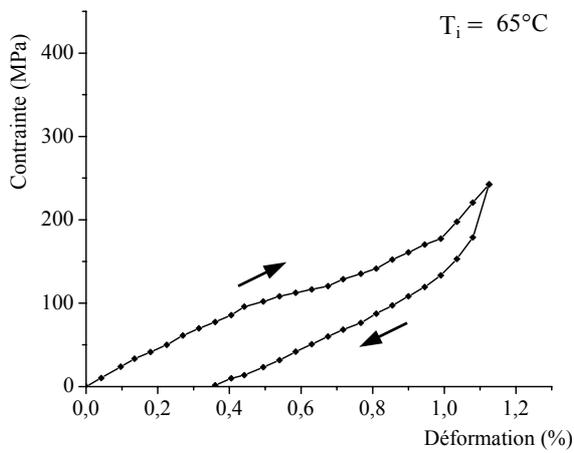
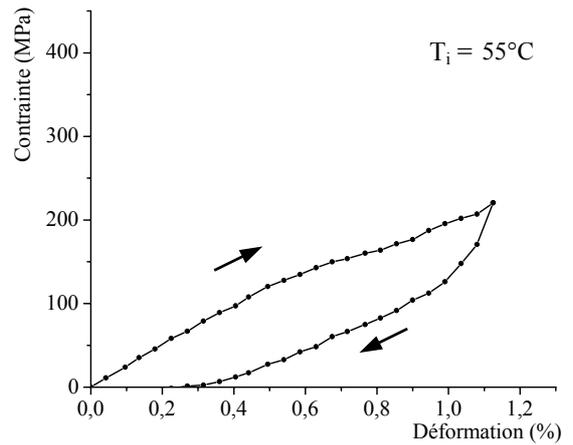
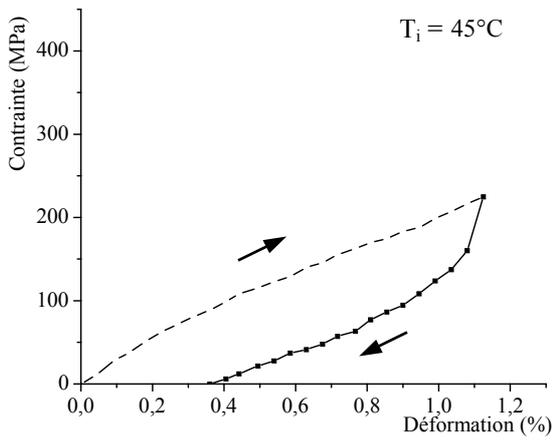
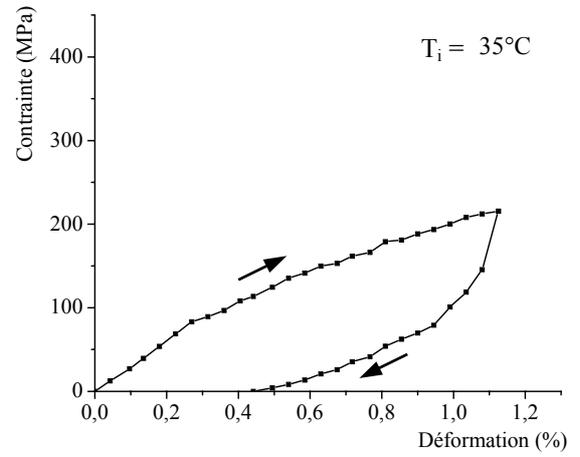
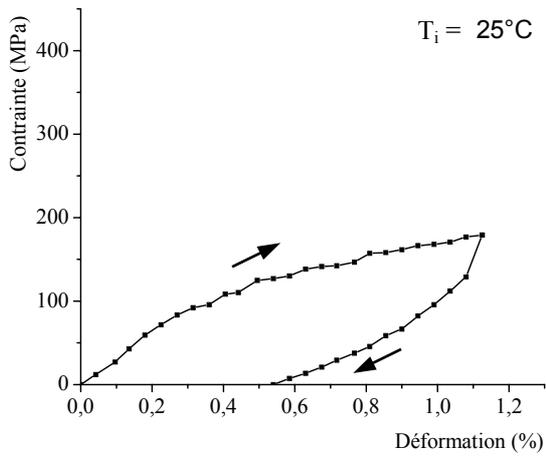
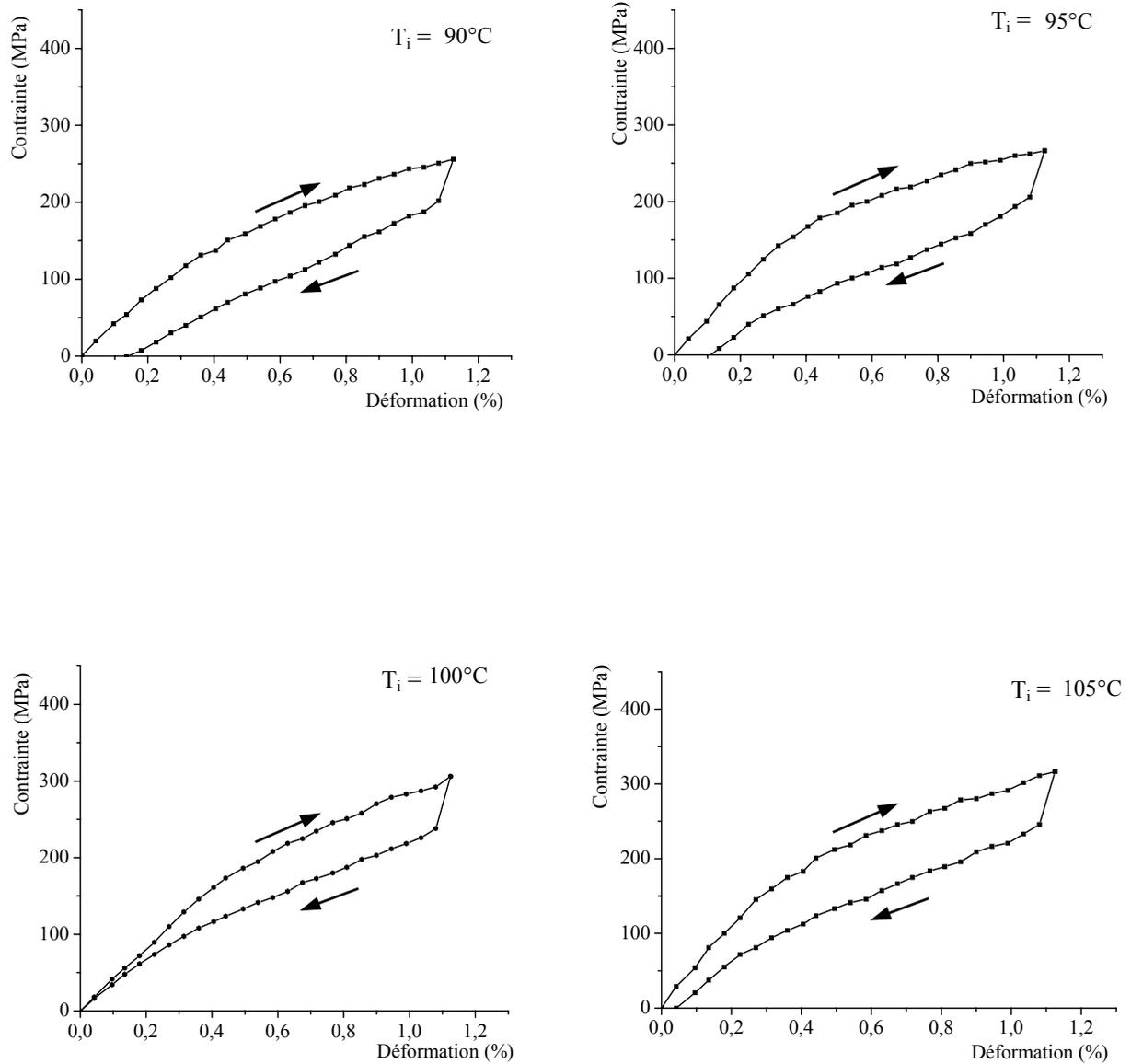


Figure IV-29: Cycle pseudoélastique à température ambiante (20°C).

### IV-6.3 Cycles $\sigma$ – $\varepsilon$ pour différentes températures d'essai

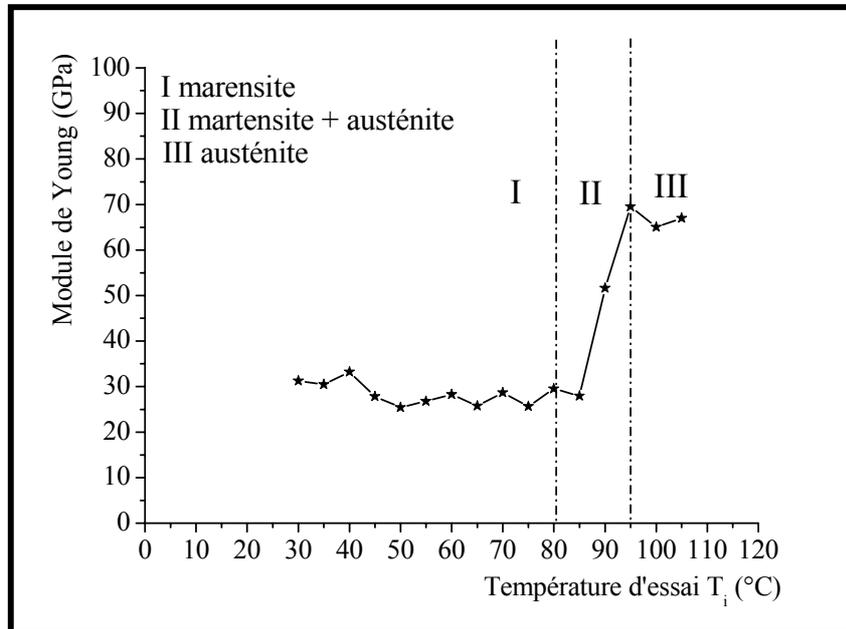
La figure IV-30 représente les cycles de contrainte–déformation obtenus à différentes températures d'essai pour une déformation maximale imposée égale à 1,1%. On peut ainsi remarquer que ces courbes  $\sigma$ – $\varepsilon$  varient avec la température d'essai. Ces variations sont liées à l'état structural de l'échantillon qui peut être soit martensite, soit austénite, soit mixte (austénite + martensite).





**Figure IV-30:** Courbes contrainte–déformation à différentes températures pour un échantillon de la série T ( $\epsilon_{\max} = 1,1\%$ ).

On peut en outre déduire pour chaque essai le module de Young (en traçant la tangente à la courbe  $\sigma$ - $\varepsilon$  dans sa partie linéaire) et dont l'évolution donnée sur la figure IV-31

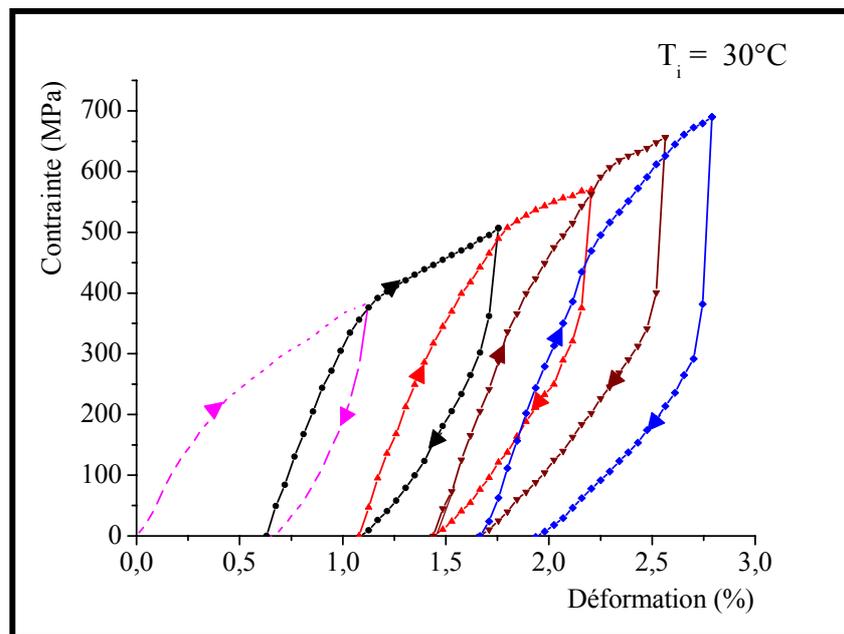


**Figure IV-31:** Evolution du module de Young  $E$  en fonction de la température d'essai

Il apparaît sur cette figure trois domaines distincts. Un premier domaine à basse température où le module, relatif au domaine martensitique, est pratiquement constant et est de l'ordre de 30 GPa. Un domaine intermédiaire, qui correspond à l'état mixte où les deux phases martensite et austénite coexistent et où l'on observe une augmentation rapide du module de Young pour atteindre 70 GPa environ. Puis le troisième domaine (austénitique) où le module de Young ne varie pratiquement plus mais qui reste largement supérieur à celui du premier domaine (martensitique). On retrouve ainsi les mêmes résultats que dans la littérature: le module de la phase martensitique est inférieur à celui de la phase austénitique [21, 29, 30].

#### IV-6.4 Cyclage mécanique isotherme à déformation maximale constante

Nous avons suivi le comportement mécanique de l'alliage CuZnAl à basse température lors d'un cyclage mécanique isotherme ( $T_i = 30\text{ °C}$ ) pour une déformation maximale  $\varepsilon_{\max}$  de l'ordre de 1,1%. Les courbes obtenues sont donnés sur la figure IV-32. Chaque cycle cumule la déformation résiduelle des cycles antérieurs.



**Figure IV-32:** Cyclage isotherme par effet pseudoélastique à  $\varepsilon_{\max} = 1,1\%$

L'allure des courbes représentées sur la figure ci dessus est similaire à celles obtenues en traction et en compression [24, 25, 27]. Néanmoins, on observe lors des essais en flexion à quatre points que l'ordre de grandeur des contraintes maximales atteintes est supérieur à celles obtenues en traction et en compression. La réponse de l'échantillon diffère d'un mode de sollicitation à un autre.

#### IV-6.4.1 Analyse des courbes obtenues lors cyclage isotherme

##### a) Evolution de la déformation résiduelle avec le nombre du cycles

La figure IV-33 donne l'évolution de la déformation résiduelle (en tenant compte de l'effet d'accumulation) en fonction du nombre de cycles  $N$ . L'augmentation de la déformation résiduelle après chaque cycle  $\sigma$ - $\varepsilon$  est probablement accentuée par le phénomène d'accumulation de défauts créés lors des cycles précédents [17, 27].

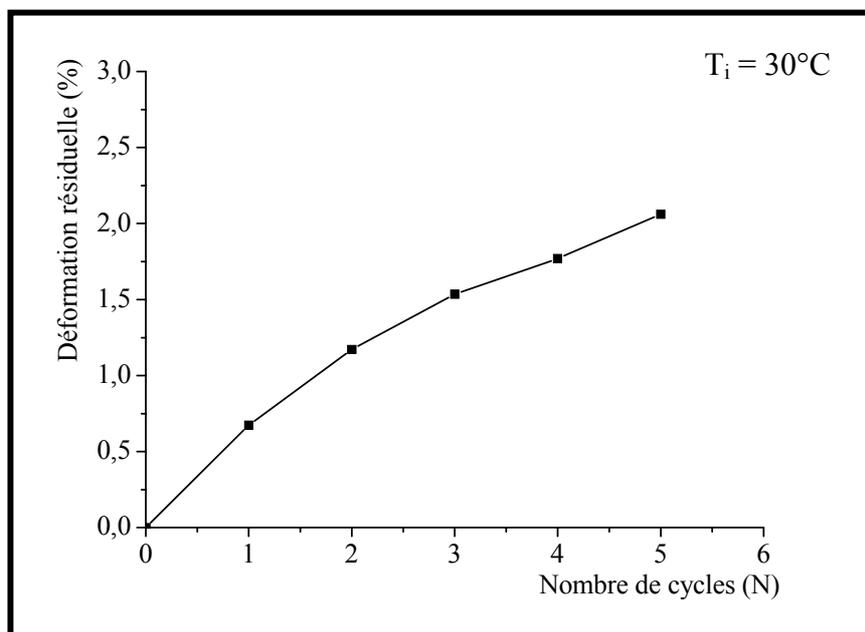
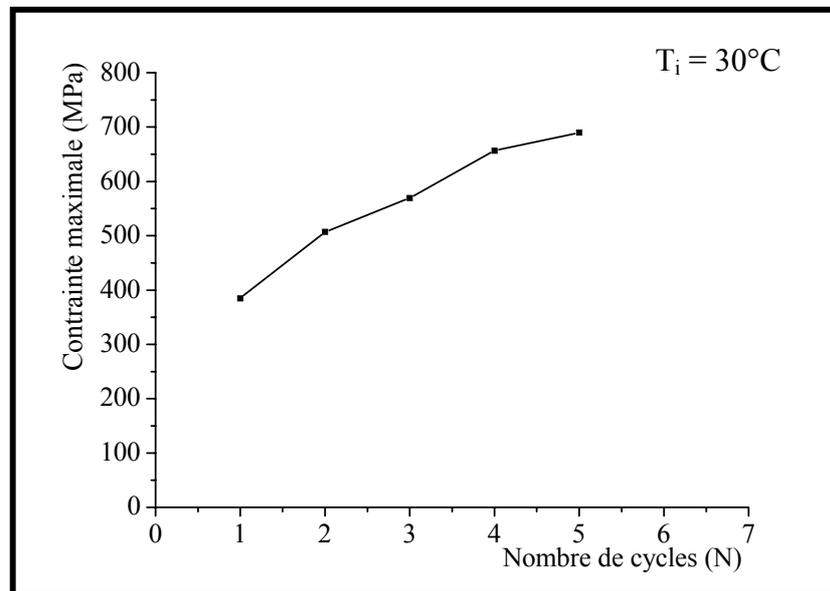


Figure IV-33: Evolution de la déformation résiduelle avec le nombre de cycles  $N$

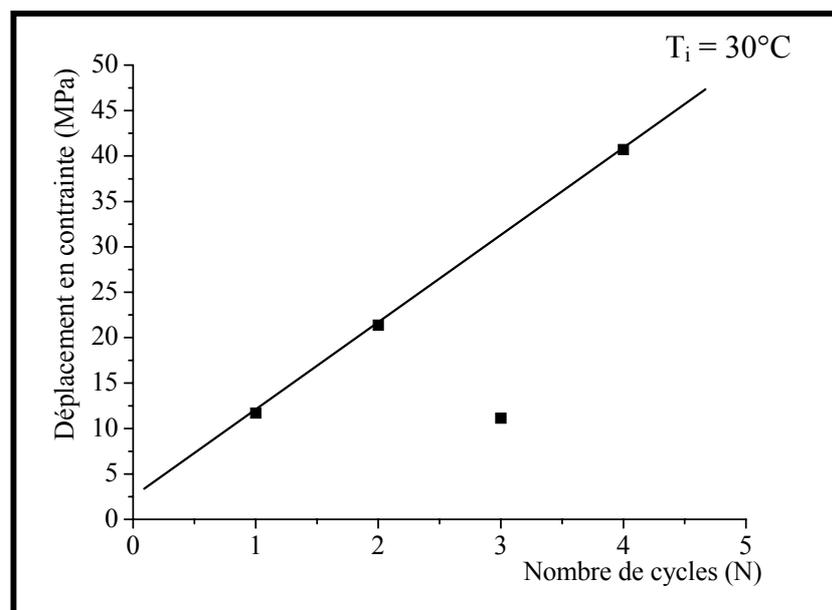
##### b) Effet du cyclage mécanique isotherme sur la contrainte maximale

Lors du cyclage mécanique isotherme  $0$ - $\sigma$ - $0$ , la contrainte maximale augmente avec le nombre de cycles  $N$  (figure IV-34). D'un autre côté, la contrainte atteinte lors d'un cycle à la charge, est inférieure à celle du cycle précédent. Il existe un déplacement en contrainte noté  $\Delta\sigma$  qu'il faudra fournir pour fermer le faisceau  $\sigma$ - $\varepsilon$  lors de ce cycle (figure IV-32) [27]. Ce déplacement en contrainte évolue avec le nombre de cycles  $N$  (figure IV-35). Il est du principalement aux défauts introduits de plus en plus lors des cycles successifs ce qui

nécessite des contraintes plus importantes pour vaincre ces obstacles et atteindre la déformation désirée. Il faudra donc un apport supplémentaire d'effort par rapport au cycle précédent pour pouvoir réorienter les variantes lors du cycle considéré.



**Figure IV-34:** Evolution de la contrainte maximale en fonction de nombre de cycles  $N$ .



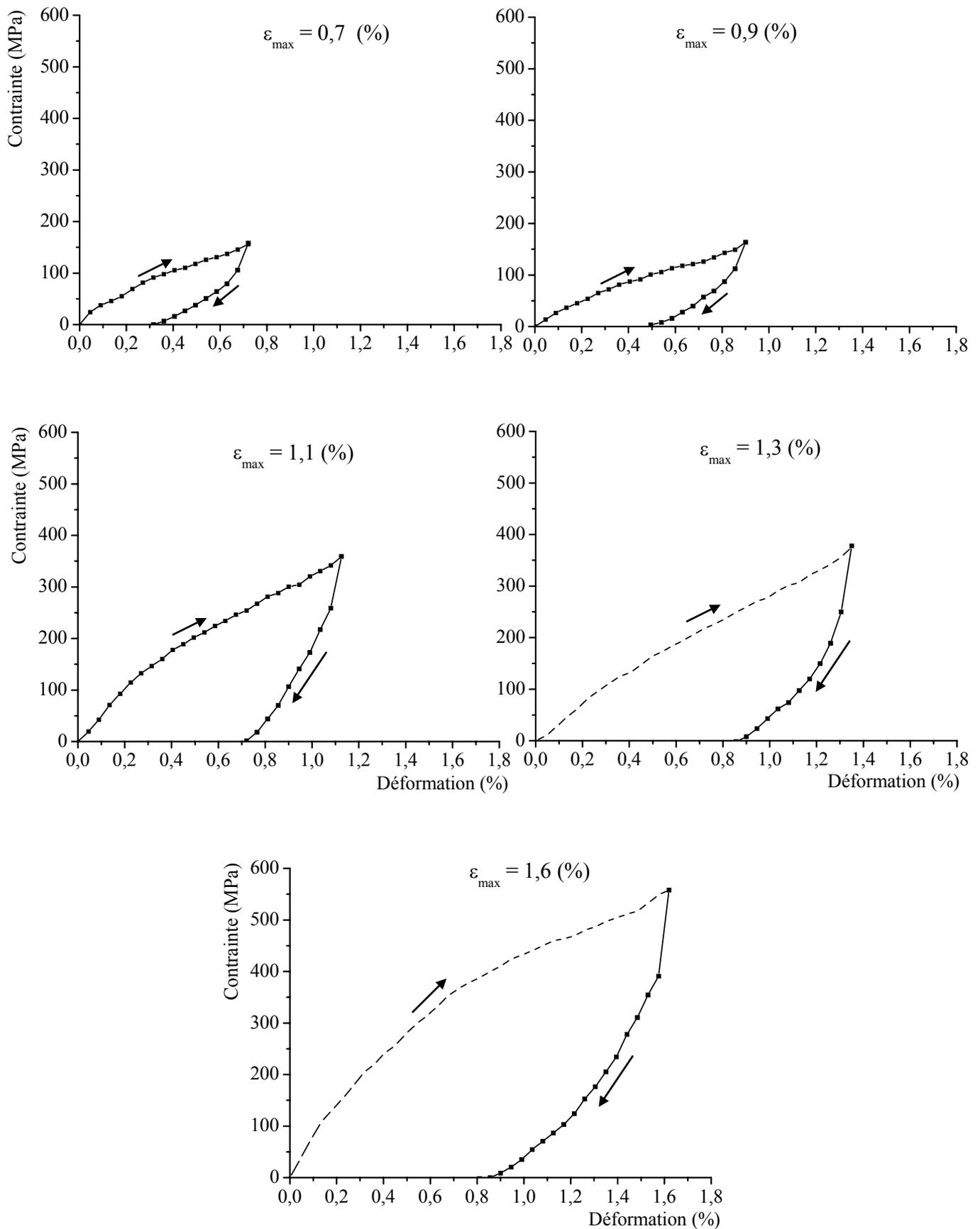
**Figure IV-35:** Evolution du déplacement en contrainte en fonction du nombre de cycles  $N$ .

### **IV-6.5 Effet de la déformation maximale sur le comportement pseudoélastique**

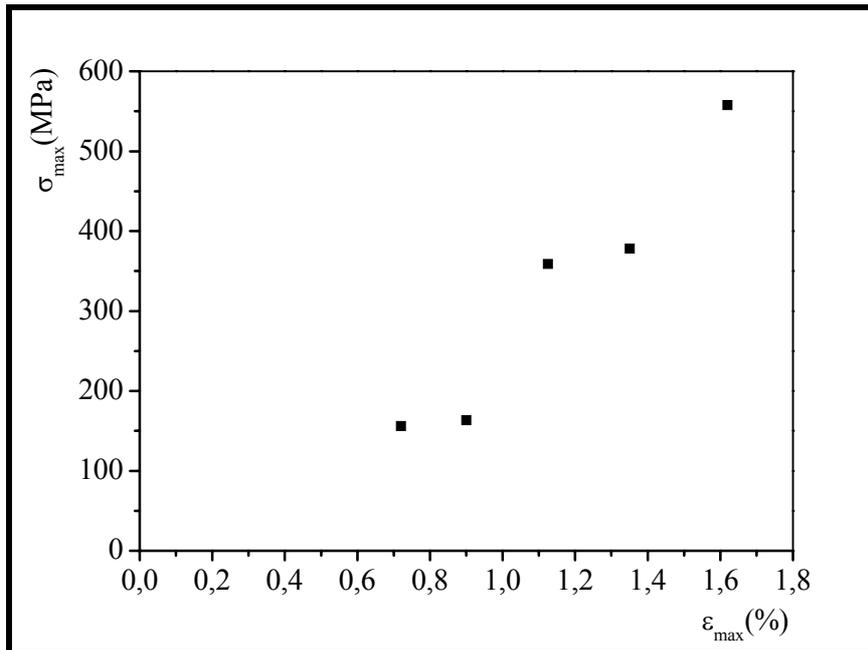
La figure IV-36 montre l'effet d'une déformation maximale croissante à chaque nouveau cycle, sur l'allure des courbes pseudoélastiques. La température d'essai choisie est égale à 20 °C.

Nous observons sur cette figure une augmentation de la contrainte maximale ainsi que celle de la déformation résiduelle ( $\sigma_{\max}$  et  $\varepsilon_r$ ) à chaque fois que la déformation imposée a augmenté. Les figures IV-37 et IV-38 montrent l'influence du taux de déformation maximale imposée sur ces deux paramètres.

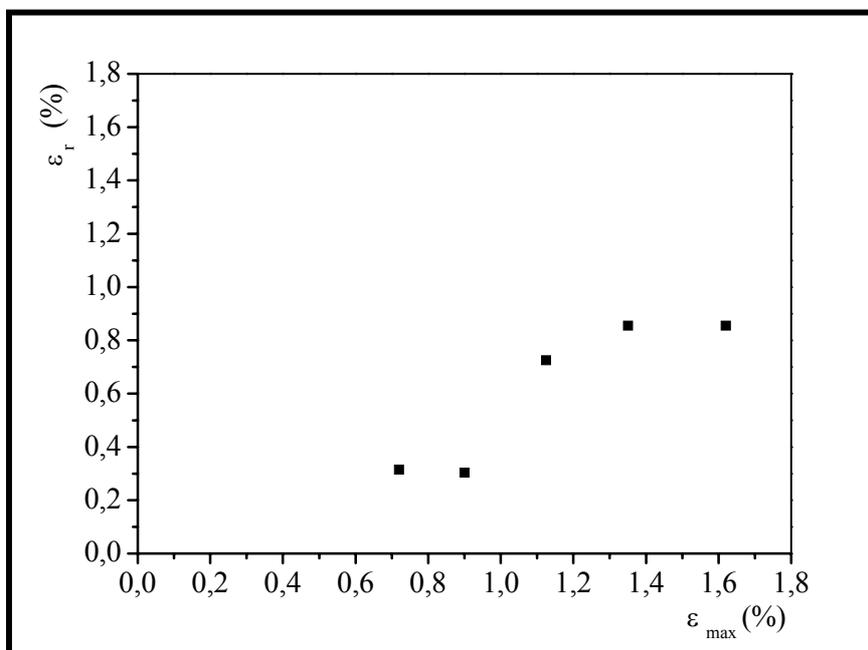
Plus on augmente la déformation maximale, plus on oriente de variantes de martensite. Il en résulte une augmentation de la contrainte maximale. De même, plus il y a de martensite orientée sous l'effet de la contrainte, plus il y aura des variantes stabilisées quand la contrainte est relâchée, il en découle donc une augmentation de la déformation résiduelle qui représente la quantité de martensite non révertie.



**Figure IV-36:** Courbes pseudoélastiques à différentes déformations maximales ( $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).



**Figure IV-37:** Effet de la déformation maximale sur la contrainte maximale  $\sigma_{\max}$  lors des cycles mécanique à différentes déformation maximale.



**Figure IV-38:** Effet de la déformation maximale sur la déformation résiduelle  $\epsilon_r$  lors des cycles mécanique à différentes déformation maximale.

## Conclusion

L'étude du comportement pseudoélastique de l'alliage à mémoire de forme ternaire de type CuZnAl en flexion a permis de tirer les résultats suivantes:

- La contrainte maximale atteinte lors d'un cycle complet charge–décharge augmente avec la croissance de la de nombre de cycle
- La déformation résiduelle persistante après un cycle pseudoélastique augmente avec l'augmentation de la déformation maximale imposée ainsi qu'avec l'augmentation du nombre de cycles par le phénomène d'accumulation.

## IV-7 CYCLAGE THERMOMECHANIQUE APRES UN ETAT PREDEFORME A L'ETAT MARTENSITIQUE

### IV-7.1 Procédure de manipulation lors d'un cycle thermomécanique

Les caractéristiques des différents échantillons utilisés dans cette étude sont regroupées dans le tableau suivant:

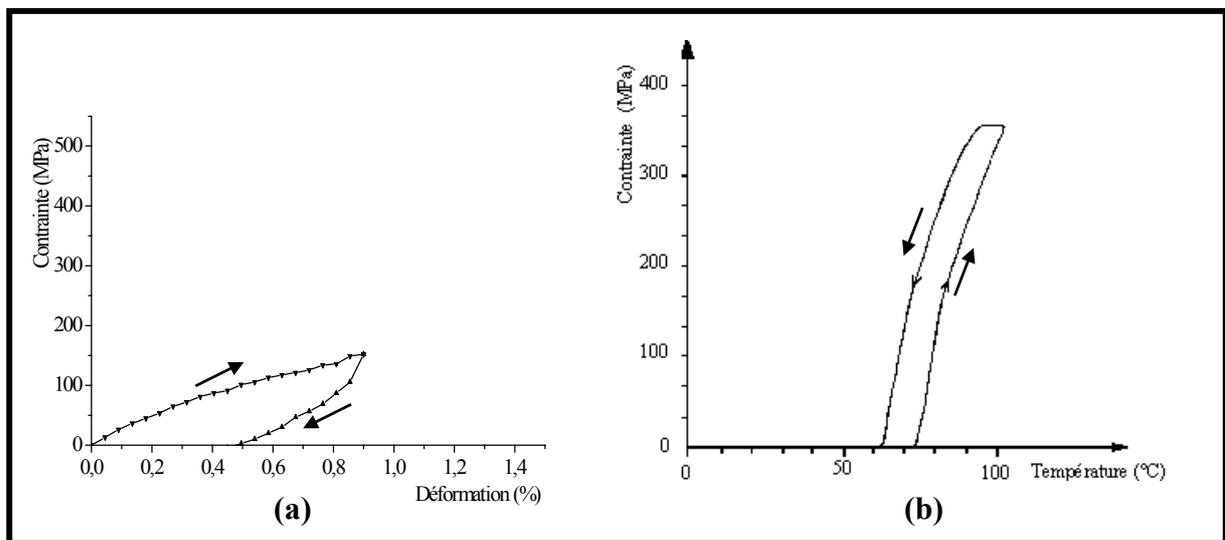
Echantillons	W (mm)	d (mm)	M <sub>s</sub> (°C)	A <sub>f</sub> (°C)	M <sub>f</sub> (°C)	A <sub>s</sub> (°C)	H <sub>T</sub> (°C)
T1	1,2	5	66	77	56	70	15
T5	1,2	3,85	66	78	53	71	13
T6	1,2	4,95	65	76	52	71	18
T8	1,2	4,1	64	80	50	69	15

**Tableau IV-3:** *Caractéristiques des différents échantillons testés en cycle contrainte–température après une déformation résiduelle*

Par état prédéformé, nous entendons par là l'état hérité à la fin d'un cycle mécanique charge–décharge à une température donnée. En effet, comme il a été vu aux paragraphes précédents, un échantillon ayant subi un cycle mécanique possède à la fin du cycle une déformation résiduelle. Cette déformation résiduelle est due à de la martensite bloquée qui ne se résorbe pas quand on relâche la contrainte. Cette martensite «bloquée» se réverterait en austénite si l'on procède à un simple chauffage. Ce phénomène bien connu, est appelé effet mémoire de forme (voir définition au chapitre II). La réversion de la martensite au chauffage en austénite doit donc s'accompagner (puisque l'échantillon est bloqué entre les mors de

flexion après un cycle mécanique) d'un travail effectué par l'échantillon sur les mors. On s'attend donc à une augmentation de la contrainte enregistrée due à ce travail effectué.

Pour montrer ce phénomène et l'étudier avec plus de détails, nous avons donc effectué un cycle mécanique de charge–décharge par effet pseudoélastique (à  $T_i = 20\text{ °C} < M_f$ ). Au retrait de la contrainte l'échantillon est dans un état prédéformé. A partir de cet état, nous faisons subir à l'échantillon un cycle de chauffage–refroidissement. Nous enregistrons alors, sur une table traçante, la variation de la contrainte en fonction de la température. Un schéma représentatif de cette procédure est représenté sur la figure IV-40.



**Figure IV-40:** Schéma représentatif d'un cycle thermomécanique.

(a) cycle pseudoélastique.

(b) cycle contrainte température.

## IV-7.2 Cyclage thermomécanique après un cycle pseudoélastique

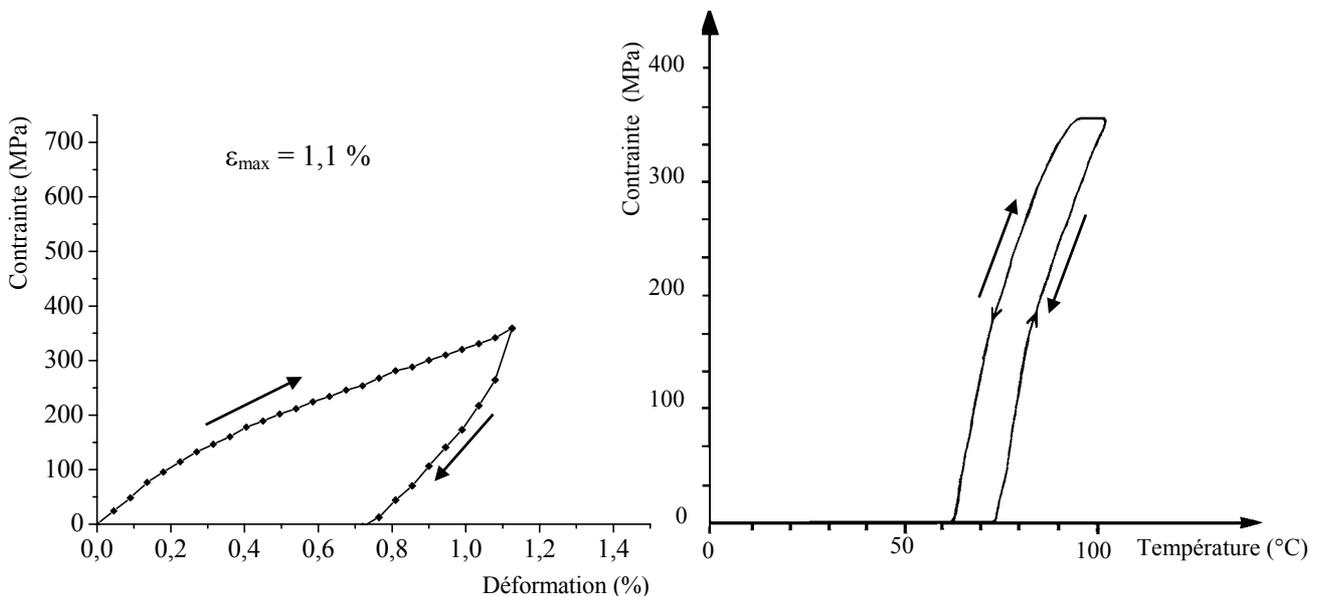
### IV-7.2.1 Description d'un cycle thermique à une déformation imposée

Nous avons reporté sur la figure IV-40 la variation de la contrainte induite par l'échantillon lors d'un cycle thermique chauffage–refroidissement à une déformation imposée donnée (déformation résiduelle en martensite). La déformation imposée est de l'ordre de 0,7% et le cycle thermique s'effectue entre 20°C et 100°C.

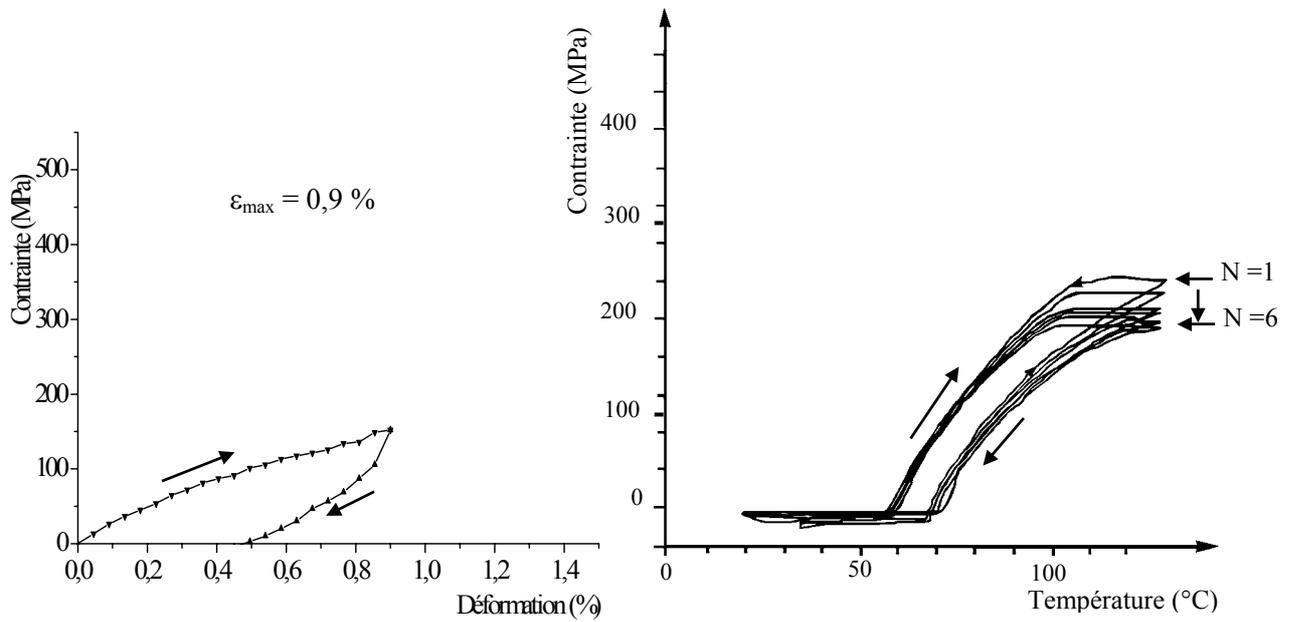
Nous observons au chauffage une augmentation de la contrainte à partir d'une température caractéristique  $A_s$ , elle atteint un palier à partir d'une valeur  $\sigma_p$ . Cette augmentation s'explique par le phénomène de mémoire de forme. En effet, dans l'état où est imposée la déformation au début du cycle nous sommes à l'état martensitique et l'augmentation de la température entraîne la transformation inverse martensite–austénite. Le déplacement des variantes entraîne une action mécanique sur les mors et provoque une augmentation de la contrainte. Lors du refroidissement ces mêmes variantes reviennent à l'état martensitique avec un hystérésis en température généralement de l'ordre de  $12^\circ\text{C}$ .

#### IV-7.2.2 Effet de la déformation imposée sur la contrainte de palier

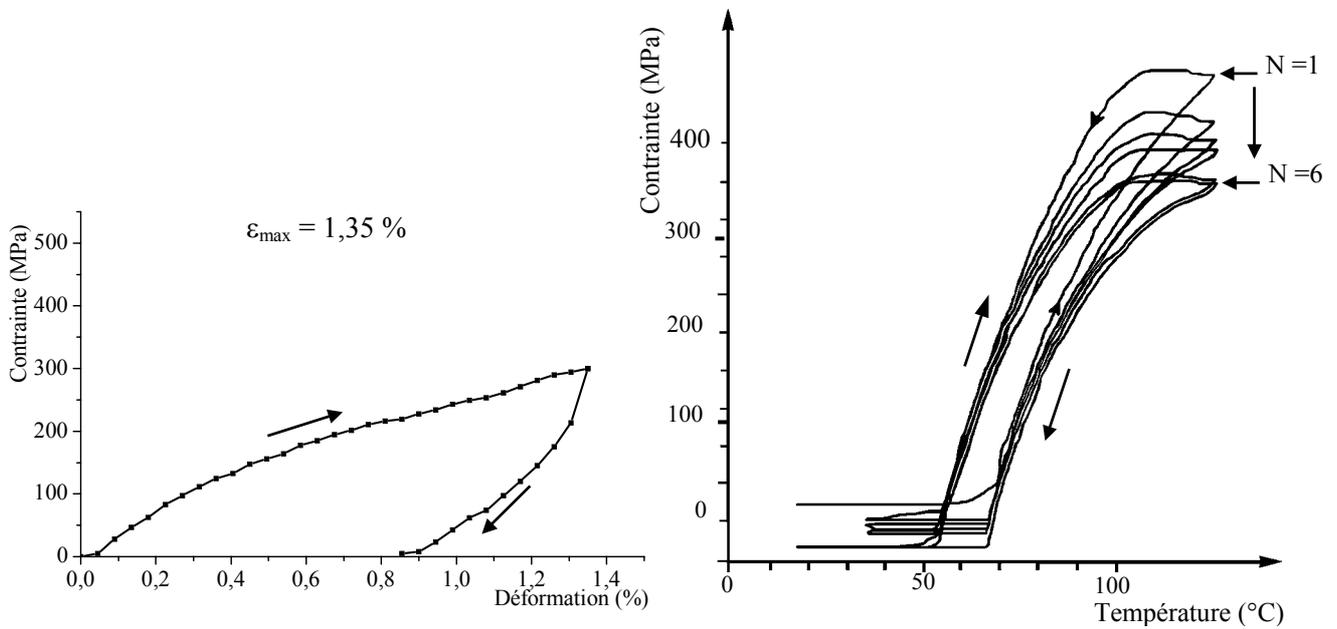
Quand la déformation imposée augmente on s'attend à une augmentation de la contrainte du palier  $\sigma_p$ . pour cela nous avons représenté l'évolution des contraintes pseudoélastiques pour les trois niveaux de déformation imposée distincts. Nous représentons également l'évolution de la contrainte maximale atteinte suite à des cycles thermiques successifs. Ces évolutions sont représentées sur la figures IV-41, IV-42, IV-43.



**Figure IV 41:** Un cycle themomécanique après un cycle pseudoélastique ( $\epsilon_r = 0,7\%$ ).

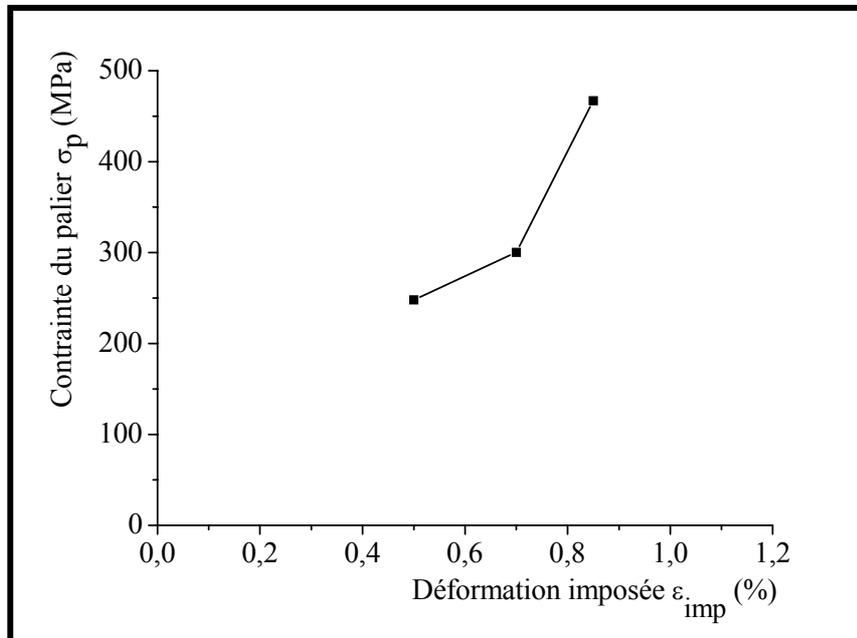


**Figure IV-42:** Cyclage thermomécanique après un cycle pseudoélastique ( $\epsilon_r = 0,5\%$ ).



**Figure IV-43:** Cyclage thermomécanique  $\sigma$ - $T$  après un cycle pseudoélastique ( $\epsilon_r = 0,85\%$ ).

On peut déduire à partir de ces courbes l'évolution de la contrainte du palier en fonction du taux de la déformation résiduelle imposée (figure IV 44). On observe sur cette figure que plus la déformation résiduelle (à la décharge) est importante, plus la contrainte du palier est importante.



**Figure IV-44:** Evolution de la contrainte du palier  $\sigma_P$  avec la déformation imposée  $\epsilon_{imp}$ .

### ***IV-7.2.3 Effet du cyclage thermique sur la contrainte de palier***

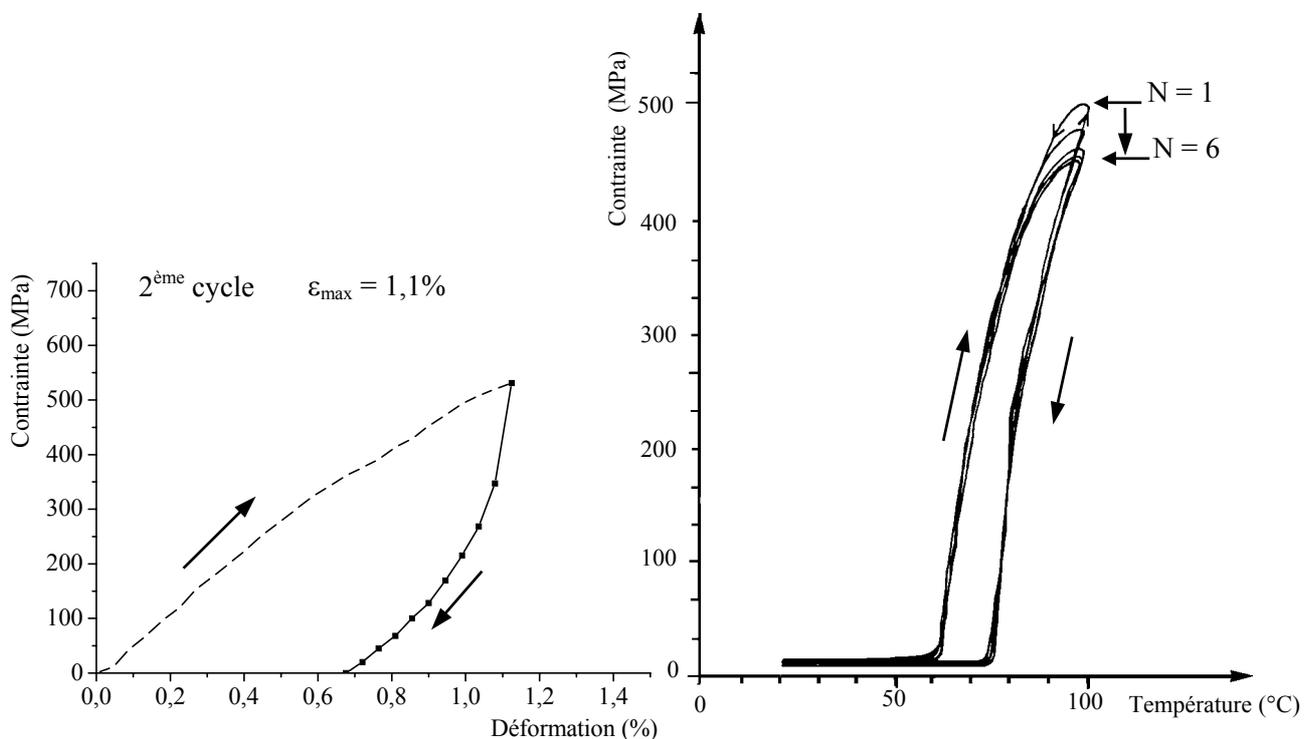
Si à la suite d'un cycle mécanique  $\sigma$ - $\epsilon$  à l'état martensitique, on soumet l'échantillon à un cyclage thermique, on observe alors une diminution de la contrainte du palier  $\sigma_p$ . (figure IV-41).

Pour une déformation résiduelle plus importante, le même cyclage engendre une plus grande valeur des contraintes du palier  $\sigma_p$  (figure IV-43). La diminution de la contrainte du palier, à une déformation imposée donnée, lors d'un cyclage thermique s'explique par l'introduction de défauts lors du cyclage.

#### IV-7.2.4 Effet du cyclage mécanique sur la contrainte de palier

Pour cet essai, nous avons réalisé un premier cycle  $\sigma$ - $\varepsilon$  suivi d'un cyclage thermique  $\sigma$ -T, puis un deuxième cycle  $\sigma$ - $\varepsilon$  suivi d'un cyclage thermique. La réponse est enregistrée sur les figures IV-41 et IV-45.

Le premier cycle thermique s'effectue à 1,1% de déformation imposée qui permet à la décharge de la contrainte d'apparaître une déformation résiduelle est égale 0,5%. Le deuxième cyclage thermique s'effectue à une déformation imposée ensuite de 1,1%. On observe pour chaque première cycle thermique  $\sigma$ -T une différence au niveau de la contrainte du palier enregistrée (respectivement 350 et 500 MPa). Cela est dû à la valeur de la déformation imposée initiale et spécialement à la déformation résiduelle persiste après la décharge de la contrainte. La diminution de la contrainte du palier en fonction du cyclage est d'autant plus marquée que la déformation imposée est importante.



**Figure IV-45:** Cyclage thermomécanique  $\sigma$ -T après un deuxième cycle pseudoélastique.

---

---

## Conclusion

Un cycle complet  $\sigma$ - $T$  illustre le comportement thermomécanique de nos échantillons testé. L'évolution de la contrainte en fonction de la température  $\sigma$ - $T$  à une déformation imposée à l'état martensitique permet de présenter le comportement thermomécanique de ce alliage et de montrer la relation entre les trois paramètres: déformation, contrainte et température. Dont, l'évolution de la contrainte lors d'un cycle thermique après différentes déformations imposées montre qu'il y a une dépendance entre ces paramètres. Cette dernière nous permettons de conclure que

- La contrainte du palier augmente avec l'augmentation du nombre de cycles thermique.
- Plus de déformation résiduelle persiste à la décharge est très un importante, plus la contrainte du palier lors d'un cycle thermique est très importante.

---

---

**REFERENCE****[1] L. Contardo.**

“Etude des traitements d’éducation de la stabilité et de l’origine de l’effet mémoire de forme double sens dans un alliage Cu-Zn-Al”

Thèse de Doctorat, INSA (Lyon), 118 p. (1988).

**[2] M. Benchiheb.**

“Contribution à l’étude du vieillissement sous contrainte d’un alliage ternaire à mémoire de forme Cu-Zn-Al”

Thèse de Magister, Université d’Annaba (Algérie), 107 p, (1993).

**[3] M. Benchiheb. S. Belkahla. G. Guénin.**

“Etude de la stabilisation sous contrainte d’un alliage ternaire à mémoire de forme type Cu-Zn-Al”

Revue de Métallurgie–CIT/ Science et Génie de Matériaux, pp. 1471–1479, (2000).

**[4] C. H. Gonzalez, M. Morin, G. Guénin**

“Behaviour of electrical resistivity in single crystals of CuZnAl and CuAlBe under stress”

J. Phys. IV France, vol. 11, pp. 167-172, (2001).

**[5] H. Kribs**

“Etude du vieillissement et de la stabilisation d’alliage à mémoire de forme: cas du CuAlMn”

Thèse de Doctorat, INSA (Lyon), 167 p., (1989).

**[6] C. H. Gonzalez**

“Etude des comportements électro–thermomécaniques et de la stabilisation martensitique d’alliages monocristallins à mémoire de forme base cuivre”

Thèse de Doctorat, INSA (Lyon), 178 p., (2002).

**[7] P. Šittner, K. Hashimoto, M. Kato, M. Tokuda**

“Stress induced martensitic transformation in tension/torsion of CuAlNi single crystal tube”

Scripta Materialia, Vol. 48, pp. 1153–1159, (2003).

**[8] M. Stipcich, R. Romero**

“The effect of post-quench aging on stabilization of martensite in CuZnAl and CuZnAlTiB shape memory alloys”

Materials Science and Engineering A, Vol. A 273–275, pp. 581–585, (1999).

**[9] P. A. Larochette, E. Cingolani, M. Ahlers**

“Stabilization and the two way shape memory effect (TWME) in CuZnAl polycrystals”

Materials Science and Engineering A, Vol. A 273–275, pp. 600–604, (1999).

**[10] P. Rodriguez**

“Etude de la fatigue thermique et thermomécanique sur les caractéristiques de l’alliage à mémoire de forme haute température type CuAlNi”

Thèse de Doctorat, INSA (Lyon), 204 p., (1989).

**[11] A. Hautcoeur, A. Eberhardt, E. Patoor, M. Berveiller**

“Thermomechanical behaviour of monocrystalline CuAlBe shape memory alloys and determination of the metastable phase diagram”

In ESOMAT’94, Journal de Physique IV, supplément au journal de Physique III, Colloque C2, Vol. 5, pp. 459–464, (1995).

**[12] T. Hesse, M. Ghorashi, D. J. Inman**

"Comparison of the experimental behavior of a shape memory alloy in compression and tension." In Proceeding of International Mechanical Engineering Congress, Washington, (2003).

**[13] J. M. McNaney, V. Imbeni, Y. Jung**

"An experimental study of the superelastic effect in a shape-memory Nitinol alloy under biaxial loading." Mechanics of Materials, Vol. 35, (2003), pp.969-986.

**[14] P. A. Bessenlink**

“The effect of temperature on pseudoelastic cycling of CuZnAl”

Scripta Met., Vol. 30, pp. 241–246, (1997).

[15] **J. Mallaria, M. Sade**

“The effect of temperature on pseudoelastic cycling of CuZnAl single crystals”

Scripta Met., Vol. 30, pp. 241–246, (1994).

[16] **M. J. Bigeon, M. Morin**

“Superelastic effect fatigue in CuZnAl wires”

4<sup>th</sup> International Conference on New Actuators: Bremen, pp. 357-360, (1994).

[17] **M. J. Bigeon.**

“Etude thermomécanique des fils fins d’alliages à mémoire de forme, fatigue de l’effet superélastique de l’effet mémoire de forme comparaison entre le Ti-Ni et le Cu-Zn-Al”

Thèse de Doctorat, INSA (Lyon), 281 p., (1996).

[18] **I. Kebbache, R. Amireche, S. Chouf, M. Benchiheb, S. Belkahla**

“Etude de l’effet du cyclage thermomécanique sur les caractéristiques d’un alliage à mémoire de forme CuZnAl”

In First International Conference on Materials Science & Engineering, (5-7 mai, M’sila, Algeria), 76 p., (2003).

[19] **K. Otsuka, K. Shimizu**

“Pseudoelasticity and shape memory effects in alloys”

International Metals Reviews, Vol. 31, n°3, pp. 93–113, (1986).

[20] **M. P. Baron, M. Morin**

“Stress induced transformation and temperature induced transformation in CuZnAl single crystals”

Journal de Physique IV, Supplément au Journal de Physique III, Vol. 7, Colloque C5, pp. 525–530, (1997).

[21] **P. Šittner, Y. Hara, M. Tokuda**

“Experimental study on the thermoelastic martensitic transformation in shape memory alloy polycrystalline induced by combined external forces”

Metallurgical and Materials Transactions A, Vol. A 26, pp. 2923–2935, (1995).

[22] **M. C. Piedbœuf, R. Gauvin, F. Trochu**

“Hysteresis behaviour of TiNi shape memory alloys as a function of deformation, temperature and rate of deformation”

In Third International Conference on Intelligent Materials, (3-5 juin, Lyon, France), pp. 458–462, (1996)

[23] **I. Kebbache, R. Amireche, S. Chouf, M. Benchiheub, S. Belkahla**

“Comportement thermomécanique d’un alliage à mémoire de forme polycristallin de type CuZnAl”

Journées d’Etudes sur les Matériaux JEM’2003, (19-20 Octobre, Sidi Bel Abbas, Algérie), (2003).

[24] **Y. Sutou, T. Omori, T. Okamoto, R. Kainuma, K. Ishida**

“Effect of grain refinement on the mechanical and shape memory properties of CuAlMn base alloys”

Journal de Physique IV, Vol. 11, pp. 185–190, (2001).

[25] **Y. Sutou, R. Kainuma, K. Ishida**

“The effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile CuAlMn alloys”

Materials Science and Engineering A, Vol. A 273–275, pp. 375–379, (1999).

[26] **G. Airoidi, M. Pozzi, G. Riva**

“The electrical resistance properties of shape memory alloys”

Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 459, pp. 459–464, (1997).

[27] **I. Kebbache, R. Amireche, S. Chouf, M. Benchiheub, S. Belkahla**

“Effet du cyclage mécanique sur le comportement pseudoélastique d’un alliage à mémoire de forme de type Cu-Zn-Al”

Troisième Congrès International sur les Sciences et Génies des Matériaux, (25-27 mai, Jijel Algérie), (2004).

[28] **A. Cuniber, R. Romero**

“Compression induced martensitic transformation in CuZnAl alloys with  $e/a > 1,5$ ”

Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 459, pp. 439–443, (1997).

[29] **J. Van Humbeeck, L. Delaey, A. Derruytte**

“The pseudoelastic in  $\beta$  CuZnAl alloys”

Bd. 69, H.9, pp. 575–580, (1978)

[30] **P. Šittner, P. Lukas, D. Neov, M. R. Daymond, V. Novak, G. M. Swallove**

“Stress induced martensitic transformation in CuAlZnMn polycrystal investigated by two in-situ neutron diffraction techniques”

Materials Science and Engineering A, Vol. A 324, pp. 225–234, (2002).

## **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Nous avons étudié le comportement mécanique, d'un alliage à mémoire de forme de type CuZnAl polycristallin, sous une déformation maximale imposée soit à l'état martensitique, soit à l'état austénitique soit à l'état mixte (austénite + martensite) à l'aide d'un dispositif de flexion à quatre points.

Dans un premier temps, nous avons étudié l'effet superélastique en flexion à quatre points, en utilisant des échantillons polycristallins sous forme de plaquettes. La transformation martensitique induite par la contrainte a été vérifiée mécaniquement à condition que la température d'essai soit comprise entre  $A_f$  et  $M_d$ . On a montré que, plus la température d'essai est élevée, plus la phase mère (austénite) est stable et alors il faut appliquer une contrainte plus élevée pour induire les premières variantes de martensite, c'est à dire que la contrainte critique augmente avec l'augmentation de la température d'essai. D'autre part, on a montré que cette contrainte vérifie la loi de Clausius–Clapeyron.

De plus, nous avons montré que la contrainte critique, lors du cyclage mécanique isotherme, décroît avec l'augmentation du nombre de cycles  $N$ . Cette diminution est probablement due à l'introduction des défauts lors des cycles thermomécaniques successifs. Ces défauts créent un champ de contrainte interne qui s'ajoute à la contrainte externe appliquée et contribuent ainsi à la transformation martensitique induite par la contrainte. Les résultats obtenus permettent de déduire les variations de plusieurs paramètres:

- ✓ La contrainte maximale augmente légèrement avec la croissance du nombre de cycles  $N$  pendant le cyclage mécanique isotherme que celle obtenue à différentes températures.
- ✓ Le module de Young de l'alliage étudié à l'état austénitique est de l'ordre de 70GPa et diffère de celui déterminé à l'état martensitique qui vaut 30GPa.
- ✓ Pendant les cycles superélastiques, la déformation résiduelle  $\varepsilon_r$  augmente avec l'augmentation de la température d'essai ainsi qu'avec l'augmentation de la déformation maximale imposée.
- ✓ Au cours d'un cycle superélastique, la déformation de transformation augmente avec l'augmentation du taux de la déformation maximale imposée.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié l'effet pseudoélastique toujours en flexion quatre points. Dans ce cas, la déformation de transformation est due à la réorientation des variantes de la martensite favorablement orientées vis à vis de la contrainte appliquée. Nous avons réalisé des cycles pseudoélastiques à la température ambiante ainsi que des cycles mécaniques isothermes pour une déformation maximale constante. D'après les résultats obtenus, on peut tirer les points suivants:

- ✓ La contrainte maximale augmente avec l'augmentation du nombre de cycles  $N$  ainsi qu'avec l'augmentation de la déformation maximale imposée lors d'un cycle pseudoélastique.
- ✓ La déformation résiduelle augmente par le phénomène d'accumulation lors des cycles successifs ainsi qu'avec l'augmentation de la déformation maximale.

Le dispositif mis au point permet également de suivre l'évolution de la contrainte en fonction de la température lors des cycles thermiques. Nous avons ainsi réalisé quelques essais à partir d'un état prédéformé soit à l'état martensitique soit à l'état austénitique. De ces essais on peut tirer:

- L'allure des courbes  $\sigma$ - $T$  obtenues à partir d'un état prédéformé à la charge est similaire à celle obtenue à partir d'un état prédéformé à la décharge.
- La température d'essai à laquelle est effectué un cycle superélastique  $\sigma$ - $\varepsilon$ , n'influe que sur l'amplitude de l'hystérésis thermique de transformation.
- La contrainte maximale (au chauffage) augmente sensiblement lorsque la déformation imposée est importante est par suite la valeur de la déformation résiduelle.
- La contrainte maximale (au chauffage) diminue avec l'augmentation du nombre de cycles  $\sigma$ - $T$ .