

CHAPITRE 2

CAPTEUR RÉSISTIFS EN ALLIAGE TINI À MÉMOIRE DE FORME

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée et les résultats obtenus lors de la caractérisation du potentiel des fils d'alliage TiNi en tant que capteurs résistifs. Les recherches faites sur les jauges de déformation ont permis d'appliquer ce champ de connaissance aux AMF. Enfin, les tests et recherches effectués dans ce chapitre ont été influencés positivement par les travaux antérieurs des stagiaires du LAMSI, notamment par Marc-Antoine Delarche (hiver 2003) ainsi que Guilhem Avenas (été 2004).

2.1 Principe d'une jauge de déformation

Les jauges de déformation sont les capteurs les plus utilisés dans l'industrie pour mesurer les déformations. Lord Kelvin [40] fut le premier en 1856 à publier que les conducteurs métalliques sujets à une déformation mécanique démontraient un changement de leur résistance électrique. Par la suite, ce phénomène fut mis en pratique seulement dans les années 1930. Fondamentalement, toutes les jauges de déformation sont conçues pour transformer le mouvement mécanique en un signal électrique. L'installation typique consiste à coller la jauge sur la surface d'une pièce pour jumeler la déformation des deux matériaux lorsqu'il y a une sollicitation mécanique ou thermique. La sensibilité ou le facteur de jauge (G) est une valeur donnée par le fabricant permettant de relier la variation de résistance mesurée $\Delta R = (R - R_0)$ à la déformation (ε_l) par la formule suivante :

$$G = \frac{(\Delta R)}{R_0} \times \frac{1}{\varepsilon_l} \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_l = \frac{(R - R_0)}{G \times R_0} \quad (2.2)$$

Une jauge de déformation uniaxiale mesure la déformation (ε_l) dans le sens axial à ses fils qui la constituent (figure 21).

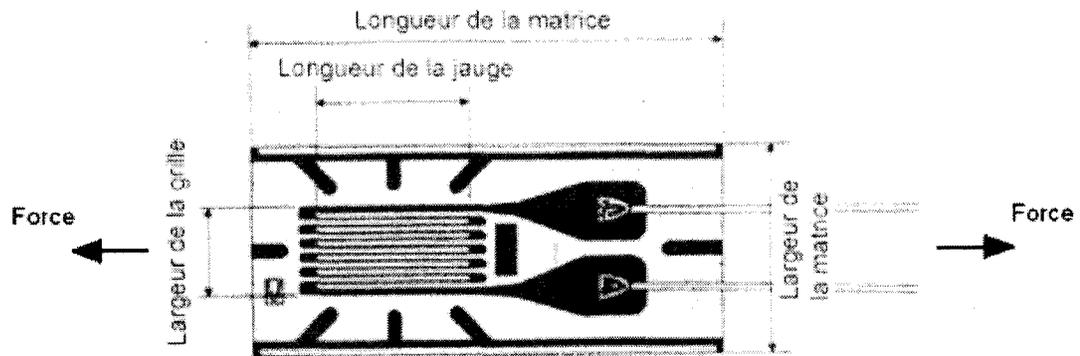


Figure 21 Jauge de déformation typique

À l'aide d'un ohmmètre, lorsqu'il n'y a pas de charge sur la pièce, la résistance initiale (R_0) est mesurée. En service ou lors d'un test, une lecture de la résistance (R) permet de calculer, à l'aide de la formule 2.2, la déformation locale de la pièce. En pratique, les variations de résistance sont très faibles et il faut utiliser un ohmmètre très sensible pour s'assurer d'une bonne interprétation de la déformation. Pour contrer ce problème, l'utilisation des circuits de conditionnement permet d'amplifier le signal de la jauge dans le but d'augmenter la précision de lecture. Des explications à ce sujet seront apportées dans la section 2.1.1. L'avantage d'avoir un facteur de jauge élevé est qu'il permet d'augmenter les variations de résistance (sensibilité du capteur) et ainsi la précision de mesure pour de petites déformations. Le tableau III présente le facteur de jauge pour des alliages couramment utilisés.

Tableau III
Facteur de jauge pour différents alliages [41]

Matériel	Facteur de jauge (G)
Platine-Iridium (Pt 95%, Ir 5%)	5,1
Platine-Tungsten (Pt 92%, W 8%)	4,0
Isoelastic (Fe 55.5%, Ni 36% Cr 8%, Mn 0.5%) *	3,6
Constantan / Advance / Copel (Ni 45%, Cu 55%) *	2,1
Nichrome V (Ni 80%, Cr 20%) *	2,1
Karma (Ni 74%, Cr 20%, Al 3%, Fe 3%) *	2,0
Armour D (Fe 70%, Cr 20%, Al 10%) *	2,0
Monel (Ni 67%, Cu 33%) *	1,9
Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%) *	0,5
* marque de commerce	

Plusieurs autres facteurs affectent le choix d'une jauge de contrainte. La plage d'utilisation en déformation peut restreindre l'utilisation puisque les jauges ne permettent pas de déformation plastique. Elles doivent rester dans le domaine élastique pour garantir une bonne linéarité et une répétition de mesure. La température affecte les résultats de deux façons différentes. Premièrement, le facteur de jauge change en fonction de la température d'utilisation. Pour minimiser ce problème, le fabricant fournit donc un graphique permettant d'ajuster le facteur de jauge à la température d'utilisation. Évidemment, certains matériaux sont beaucoup plus sensibles à la variation de température que d'autres. Deuxièmement, le gradient de température engendre une déformation apparente causée par le coefficient de dilatation thermique différent entre la pièce, le fil résistif et la colle de jonction (époxy). Heureusement, certains montages électriques permettent une compensation de ces effets thermiques. La rigidité du matériau étudié influence aussi le choix d'une jauge. La force nécessaire pour déformer la jauge ne doit pas être trop élevée de sorte à créer une rigidification sous le capteur et ainsi fausser les résultats. La valeur de la résistance doit être assez élevée pour permettre une bonne détection de la variation de résistance. La majorité des jauges de déformations utilisées ont une résistance de 120 ou 350 ohms. La valeur de la résistance (R), exprimée en ohm (Ω), est gouvernée par l'équation suivante :

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2.3)$$

où (ρ) est la résistivité électrique du matériau ($\Omega \cdot m$), (l) la longueur (m) et (s) la section du conducteur (m^2). Ainsi, selon la formule 2.3, une diminution de la section et une augmentation de la longueur du fil (souvent avec des allers-retours) permettent d'augmenter la résistance. Finalement, plus le multimètre est précis, plus la précision du système de mesures en sera augmentée. Ce gain de précision peut être obtenu en utilisant un circuit de conditionnement tel que mentionné à la section suivante.

2.1.1 Circuits de conditionnement

La déformation d'un alliage métallique entraîne, certes, une variation de sa résistance électrique. Par contre, ce changement est difficilement détectable et peut engendrer de grosses erreurs si la prise de mesure ne s'effectue pas de façon adéquate ou avec un équipement de basse qualité. Un circuit de conditionnement est utilisé de manière à transformer la variation de résistance en variation de voltage où la lecture se fera à l'aide d'un multimètre ou d'une carte d'acquisition. L'utilisation du pont de *Wheatstone* donne un signal proportionnel à la charge permettant d'amplifier correctement le signal avant la lecture. Le circuit de base du pont de *Wheatstone* contient quatre résistances (dont au moins une est un capteur), un voltage d'entrée constant (V_{in}) et un voltmètre (V_g) tel qu'illustré à la figure 22.

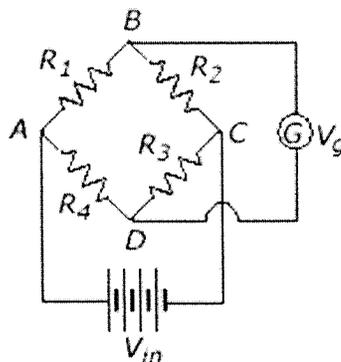


Figure 22 Circuit schématique du pont de Wheatstone

En supposant qu'il n'y a pas de courant circulant entre les bornes BD, il est possible de trouver la tension V_g comme suit :

$$V_g = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_4 + R_3)} V_{in} \quad (2.4)$$

En principe, il est nécessaire de toujours avoir un pont équilibré ($V_g = 0$) au début. Pour équilibrer le pont, il faut respecter l'équation suivante :

$$R_1 R_3 = R_2 R_4 \quad (2.5)$$

Une fois que les (ou le) capteurs sont chargés, la variation de résistance des capteurs est mesurée par le déséquilibre du pont, c'est-à-dire par la tension V_g . Supposons maintenant que les quatre résistances ont la même valeur et que la résistance R_2 soit une jauge de déformation variant sous l'effet d'une charge (calcul d'un quart de pont). Donc, $R_2 = R + \Delta R$ et (2.4) devient :

$$V_g = V_{in} \left(\frac{R^2 - R\Delta R - R^2}{(2R)(2R + \Delta R)} \right) \quad (2.6)$$

En simplifiant, on obtient :

$$V_g = V_{in} \left(\frac{\Delta R / R}{4 + 2\Delta R / R} \right) \quad (2.7)$$

En général, $\Delta R / R \ll 1$, on approxime (2.7) par :

$$V_g \approx V_{in} \frac{\Delta R}{4R} \quad (2.8)$$

Enfin, pour connaître la déformation de la pièce, il suffit de combiner l'équation (2.2) à (2.8) pour obtenir :

$$\varepsilon_l = \frac{4V_g}{G \times V_{in}} \quad (2.9)$$

La déformation de la pièce se trouve en mesurant V_g , puisque G est connu et V_{in} est la tension injectée dans le circuit. Cette tension ne doit pas être trop élevée pour ne pas faire chauffer les résistances par effet Joule. En réalité, toute variation de température affecte les mesures faites par les jauges. Pour éviter ce problème, il faut utiliser au moins deux jauges qui seront soumises à la même condition thermique. Il faut également mettre la deuxième jauge sur une branche adjacente du pont de manière à compenser l'effet thermique. Ainsi, dans l'exemple précédent, la jauge de déformation est placée en R_2 . Afin d'obtenir une compensation thermique, il faudra en mettre une seconde en R_1 ou en R_3 . Cette dernière pourra être soumise à une charge mécanique (demi-pont) pour augmenter la sensibilité, ou non (quart de pont). Une compensation thermique sera également obtenue si un pont complet est utilisé (utilisation de quatre capteurs). Il existe plusieurs configurations de branchements conçues pour maximiser la sensibilité de détection, et ce, en fonction du type de chargement et du nombre de capteurs disponibles. Il est important de toujours revenir à la formule générale du pont de *Wheatstone* (2.4) pour déterminer l'équation représentant la variation de résistance en fonction du voltage mesuré, similaire à (2.8). Les jauges peuvent être placées en tension, en compression ou de façon transversale par rapport à la charge faisant intervenir le coefficient de Poisson du matériau. En plus du branchement électrique, la sensibilité du système reste liée au facteur de jauge du capteur et plus celui-ci est élevé, plus le système est précis. Enfin, les paramètres influençant ce facteur seront mis en évidence dans les prochaines sections.

2.1.2 Éléments théoriques du facteur de jauge

Cette section présente les différents aspects influençant le facteur de jauge d'un alliage. Il sera démontré que la sensibilité résistive d'un matériau dépend de ses propriétés physiques (coefficient de Poisson et l'effet piézorésistif). Prenons maintenant l'exemple d'un fil conducteur avec une résistivité électrique (ρ), une longueur (l) et l'aire de sa section (s). L'expression générale de sa résistance (R) en fonction de sa géométrie est donnée par :

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (2.10)$$

La différentielle de la résistance combine les effets des variations de longueur, de l'aire de la section ainsi que de la résistivité électrique:

$$dR = \frac{\rho}{s} dl - \frac{\rho l}{s^2} ds + \frac{l}{s} d\rho \quad (2.11)$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{dl}{l} - \frac{ds}{s} + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.12)$$

La déformation longitudinale (ε_l) du fil est définie par son changement de longueur :

$$\varepsilon_l = \frac{dl}{l} \quad (2.13)$$

L'aire de la section varie en fonction du coefficient de Poisson (ν), puisque :

$$\varepsilon_r = \frac{dr}{r} = -\nu \varepsilon_l \quad (2.14)$$

En supposant que le fil est cylindrique avec un rayon initial (r), sa section (s) étant donnée par :

$$s = \pi r^2 \quad (2.15)$$

La différentielle de cette section est :

$$ds = 2\pi r dr \quad (2.16)$$

$$\frac{ds}{s} = 2 \frac{dr}{r} = -2\nu \varepsilon_l \quad (2.17)$$

En remplaçant (2.17) et (2.13) dans (2.12), on trouve que :

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon_l + 2\nu \varepsilon_l + \frac{d\rho}{\rho} \quad (2.18)$$

En rappelant que la définition du facteur de jauge (G) est :

$$G = \frac{dR/R}{\varepsilon_l} \approx \frac{\Delta R/R}{\varepsilon_l} \quad (2.19)$$

La combinaison des équations (2.18) à (2.19) montre que le facteur de jauge pour un fil dépend du coefficient de Poisson et de l'effet piézorésistif :

$$G = 1 + 2\nu + \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} \quad (2.20)$$

La majorité des métaux ont un coefficient de Poisson variant entre 0.25 et 0.35. Le terme $1 + 2\nu$ de l'équation (2.20) se situe donc entre 1.5 et 1.7. Par contre, le Tableau III indique que le facteur de jauge des matériaux fréquemment utilisés varie entre 0.5 et

5.1. Donc, l'effet piézorésistif $\left(\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} \right)$ peut être assez grand pour certains matériaux.

Enfin, il est nécessaire d'effectuer des essais expérimentaux pour considérer tous les

paramètres agissants sur le facteur de jauge. Les sections suivantes exposent les tests permettant de caractériser la sensibilité des AMF lorsqu'ils sont utilisés comme capteurs résistifs.

2.2 Essais expérimentaux sur les performances des AMF pour les capteurs résistifs

Nous avons vu précédemment que le facteur de jauge d'un alliage peut être déterminé en ayant les valeurs de ν et de $\frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l}$. Par contre, le coefficient de Poisson des AMF varie selon la phase en présence et le type d'alliage. De plus, il s'avère impossible de trouver dans la littérature des données associées à la variation relative de la résistivité électrique en fonction de la déformation de notre AMF. Les tests expérimentaux deviennent nécessaires pour déterminer le facteur de jauge d'un AMF. Cette section présente les étapes nécessaires pour caractériser l'AMF dans le but de trouver sa sensibilité résistive et ainsi exposer les faits entourant ses aptitudes d'intégration dans des composites.

Les fils utilisés (Ti-50.31at.%Ni) sont fournis par la compagnie *Spécial Metals* (NY, USA). Le tréfilage forme les fils à un diamètre 0.5 mm et confère un taux d'écrouissage de l'ordre de 20 à 30% dans l'état livré par le fabricant. Un traitement thermique est nécessaire pour abaisser ce taux d'écrouissage et donner la forme haute température au matériau. Ce traitement consiste en un recuit à 550°C pendant une heure, suivi d'une trempe à l'eau froide. Les échantillons sont ensuite sablés pour enlever la couche d'oxyde, ce qui permet d'obtenir une bonne mesure de la résistance électrique. Cette étape est suivie par un chauffage en haut de la température A_f permettant de restituer les déformations engendrées au cours des manipulations. Finalement, les fils sont refroidis sous le point de congélation ($< M_f$), pour s'assurer d'avoir une structure 100% martensitique auto-accommodante une fois le retour à la température ambiante. Cette procédure a été établie après avoir mesuré les températures de transformation tel que discuté dans la prochaine section.

2.2.1 Mesure des températures de transformation

La transformation de phase à l'état solide étant une transformation de phase du premier ordre produit des échanges de chaleur dans le matériau. La calorimétrie différentielle à balayage (communément appelée DSC pour Differential Scanning Calorimetry) est une mesure thermique qui permet d'évaluer le flux de chaleur associé aux transformations de phase. Pendant un chauffage (ou un refroidissement), l'instrument impose une différence de température (ΔT) nulle entre la fournaise de l'échantillon et la fournaise de référence, figure 23 (a).

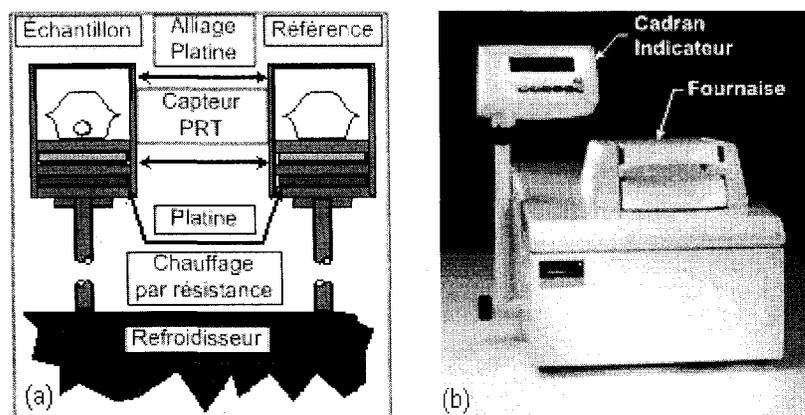


Figure 23 Appareil de calorimétrie différentielle à balayage

La différence de température entre l'échantillon et la référence reste stable tant qu'aucune transformation ne survient. Cependant, lors d'une réaction endo ou exothermique, une différence de température entre les deux fournaises survient. Donc l'appareil doit augmenter (ou diminuer) son flux de chaleur afin de tendre la variation de température vers zéro. L'enregistrement de ces flux permet à l'appareil *Pyris 1 DSC* fabriqué par la compagnie *Perkin-Elmer* (figure 23 (b)) de déterminer avec précision les températures de transformation des AMF. Dans ce projet, le capteur résistif en TiNi est en phase martensitique. Donc, la connaissance des températures de transformations nous donne la plage de température d'utilisation de ce matériau.

Suite à la préparation générale des fils, telle que discutée à la section 2.2, quelques échantillons pour les essais DSC sont ensuite coupés. Cette étape est réalisée à l'aide

d'une scie à diamant tournant à basse vitesse. Cette dernière minimise les zones d'écaillage et d'échauffement localisés. Le poids de l'échantillon est mesuré à l'aide d'une balance *L-series (Acculab)* précise à ± 0.1 mg. Enfin, un échantillon d'une dizaine de milligrammes de fil est placé dans l'appareil et le balayage de température suivant (norme ASTM F2004-00 [42]) est appliqué :

1. maintien à -40 °C pendant 1 minute
2. chauffage jusqu'à 200 °C à 10 °C/minute
3. maintien à 200 °C pendant 1 minute
4. refroidissement jusqu'à -40 °C à 10 °C/minute

Voici le graphique du flux de chaleur (en milliwatts) obtenu en fonction de la température (en degrés Celsius).

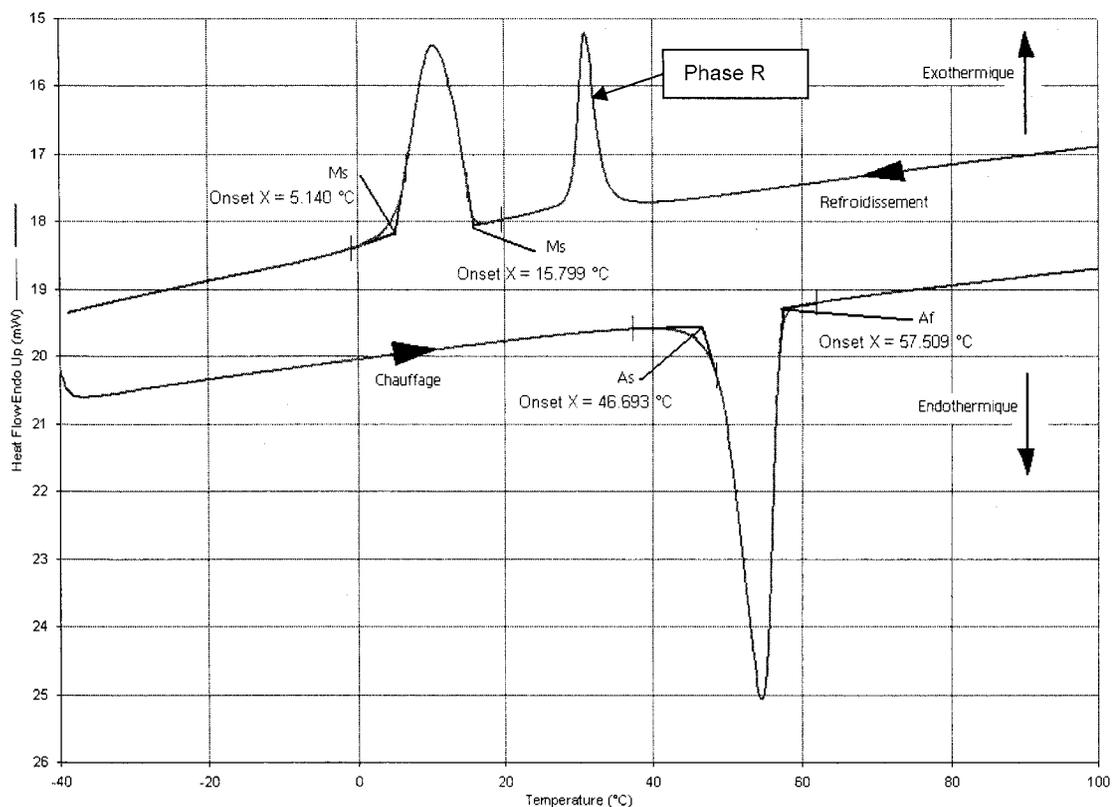


Figure 24 Essai DSC d'un AMF Ti- 50.31at.%Ni

La courbe du bas de la figure 24 caractérise la transformation martensitique inverse, présentant une réaction endothermique. L'augmentation de la température transforme la martensite en austénite. La courbe du haut de la figure 24 représente le refroidissement qui enclenche la transformation directe. Cette réaction exotherme transforme l'austénite en martensite. On peut aussi noter un pic de transformation intermédiaire appelé phase "R". À l'aide du module *Pyris 1 DSC* de la compagnie *Perkin-Elmer*, les températures de transformation sont obtenues selon la méthode des tangentes (norme ASTM F2004-00 [42]). Le tableau IV résume les températures de transformation obtenues.

Tableau IV

Températures de transformation de l'alliage Ti-50.31at.%Ni

Phase ($\sigma = 0$)	A_s	A_f	M_s	M_f
Température °C	46,5	57,5	16,0	5,0

Il est maintenant clair que nous ne pouvons pas prédire l'état de la structure à la température ambiante. Nous devons inévitablement connaître l'historique thermomécanique du matériau puisque la phase en présence est différente suite à un refroidissement ou à un chauffage. Les tests résistifs doivent caractériser les fils à partir de l'état martensitique auto-accommodant jusqu'à l'obtention et la déformation plastique de la martensite orientée. Suite à l'essai DSC, nous voyons qu'il faut tout d'abord réchauffer l'échantillon pour le transformer en phase austénitique (> 57.5 °C) et ensuite abaisser la température, jusqu'au point de congélation, afin d'obtenir de la martensite auto-accommodante à température ambiante.

2.2.2 Comportement mécanique des AMF

Puisque les tests de résistivité électrique sont effectués en déformant les échantillons, il est nécessaire, dans un premier temps, de bien comprendre les phénomènes liés au test de traction à l'état martensitique. Le fil utilisé a un diamètre de 0,5 mm et se trouve dans l'état de martensite auto-accommodante à température ambiante. La machine de

traction utilisée provient de la compagnie *EnduraTec* et permet d'enregistrer le déplacement et la force de réaction de l'échantillon. La figure 25 présente le montage expérimental pour le test de traction avec la mesure de la résistance électrique.

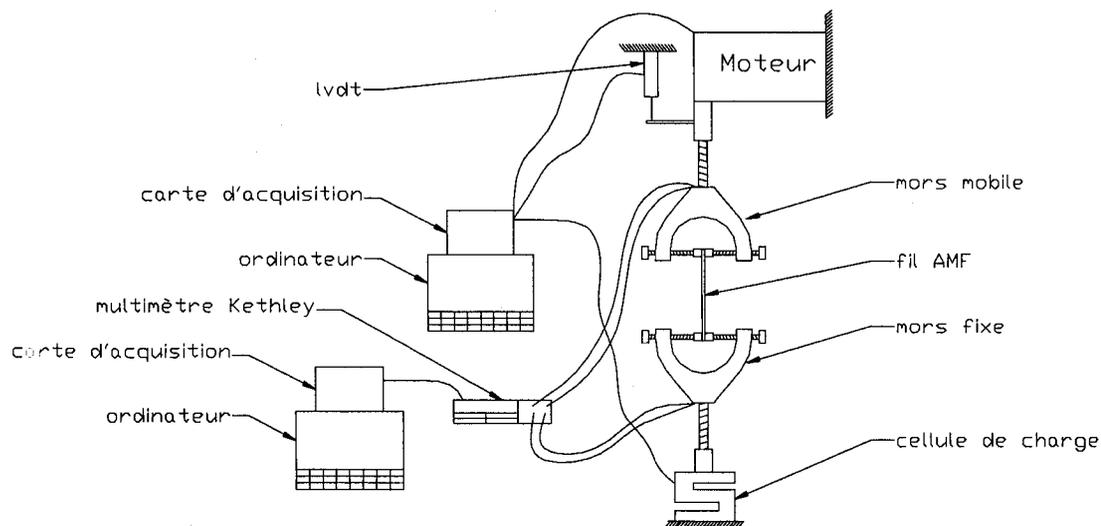


Figure 25 Montage expérimental pour l'essai de traction et résistance électrique

En fixant la vitesse de déplacement à 0,02 mm/s, la force et le déplacement sont mesurés. En transformant la force en contrainte ($\sigma = F/A$) et le déplacement en déformation ($\varepsilon = \Delta l/l$), on obtient le graphique de la figure 26.

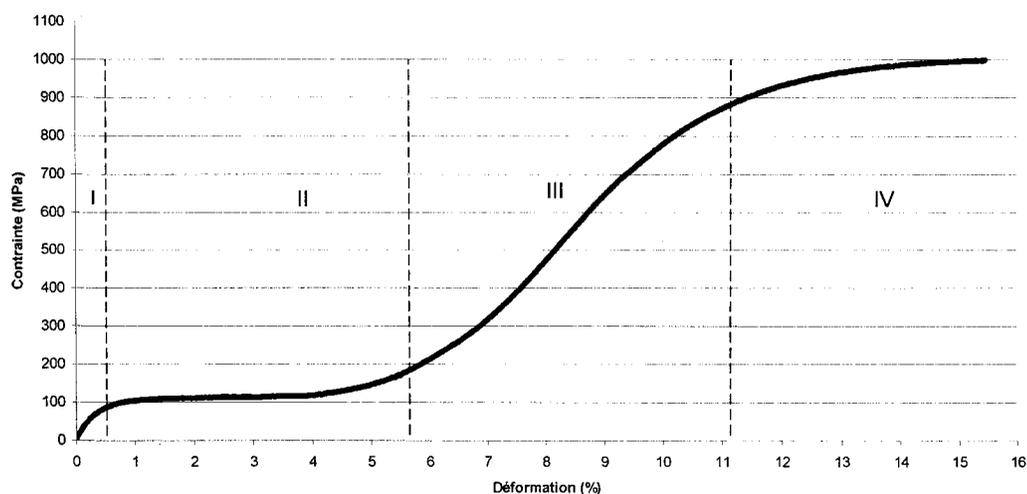


Figure 26 Essai de traction à température ambiante sur un fil d'AMF de 0,5 mm de diamètre

Quatre zones, voir figure 26, sont déterminées par l'intersection des différentes pentes correspondantes à l'état de la structure du fil :

1. La zone I entre 0 et 0,5 % de déformation caractérise la rigidité de la martensite maclée (déformation élastique).
2. La zone II formant le plateau entre 0,5 et 5,75 % de déformation correspond à la réorientation des variantes de martensite.
3. La zone III entre 5,75 et 11,2 % de déformation représente le comportement de la martensite complètement orientée qui se déforme élastiquement.
4. Enfin, la zone IV, à partir de 11,2 % de déformation, correspond au début de la déformation plastique du fil.

2.2.3 Comportement électrique résistif des AMF

Les mesures de la résistance électrique sont effectuées lorsque l'échantillon est monté sur la machine EnduraTec (figure 25). Pendant l'élongation du fil, la résistance électrique est enregistrée à l'aide d'un multimètre de marque Keithley modèle 2010. D'une grande précision, cet appareil donne une erreur de 0.045% de la lecture dans la gamme de résistance du test. Un branchement à quatre fils est nécessaire pour soustraire la résistance des fils de raccordement lorsque nous mesurons de faibles résistances. La figure 27 montre le branchement sur le multimètre.

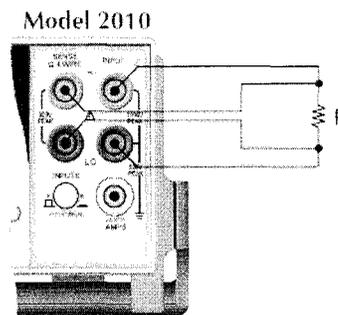


Figure 27 Branchement quatre fils du multimètre Keithley pour mesurer la résistance électrique

L'enregistrement de la résistance en fonction du temps se fait à l'aide d'une carte d'acquisition et le programme *Labview*. La chaîne de mesure du système est présentée à la figure 25.

Puisque le branchement électrique du multimètre est fait au bout des mors, il faut soustraire leur résistance électrique, soit $3\text{ m}\Omega$ par mors. Donc, la valeur de la résistance du fil est obtenue en retranchant $6\text{ m}\Omega$ de la lecture. Idem au test de traction présenté précédemment, le graphique de la figure 28 présente en plus, sur l'ordonnée de droite, la variation de la résistance relative du fil en fonction de la déformation.

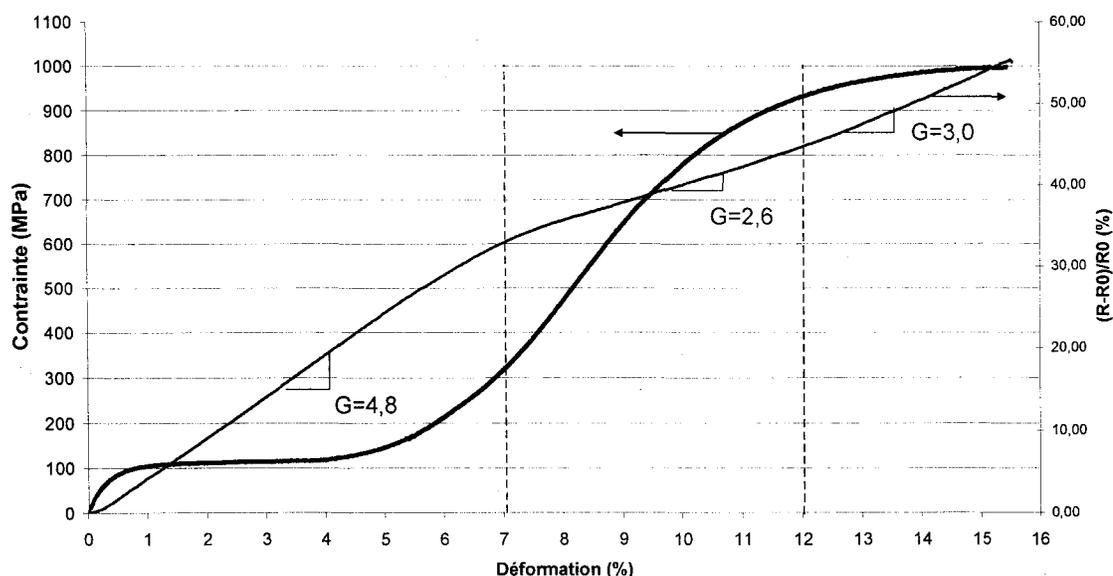


Figure 28 Graphique de la contrainte et la variation de la résistance électrique en fonction de la déformation

Selon la formule (2.1), l'évaluation de la pente de la courbe de variation relative de la résistance donne le facteur de jauge. Puisque la courbe présente des sections linéaires, la pente a été calculée avec deux points, un au début et l'autre à la fin de la zone étudiée. Les zones étudiées correspondent au changement de pente brusque de la courbe représentant le facteur de jauge. Les transformations engendrées par la déformation causent des changements importants sur la résistivité électrique du fil. Les résultats des tests montrent que l'élasticité de la martensite auto-accommodante

jusqu'à la transformation en martensite orientée (jusqu'à environ 7 % de déformation) donne un facteur de jauge constant de 4,8. Cette valeur est comparable aux jauges résistives les plus sensibles sur le marché, (tableau III). De plus, ces dernières ne permettent pas une aussi grande déformation que l'alliage TiNi et sont plus abordables que les alliages de platine. Par la suite, la partie élastique de la martensite orientée (7-12 % de déformation) donne un facteur de jauge de 2,6. Finalement, la déformation plastique de la martensite orientée (> 12% de déformation) fait remonter le facteur de jauge à 3,0. Le tableau V donne le résultat du facteur de jauge pour quelques tests. La répétitivité et la précision des résultats démontrent déjà un grand potentiel d'utilisation de ces métaux comme capteurs résistifs.

Tableau V

Facteur de jauge de six échantillons en déformations

échantillon	Plage de déformation		
	0-7%	7-12%	12-15%
no7	4,84	2,85	3,07
no9	5,08	2,65	3,01
no10	4,69	2,37	2,93
no11	4,64	2,69	3,03
no12	4,84		
no13	4,90		
moyenne	4,83	2,64	3,01
ecart type	0,16	0,20	0,06

Comparativement aux matériaux couramment utilisés, présentés au tableau III, l'utilisation de cet alliage est très avantageuse jusqu'à 7 % de déformation grâce à son facteur de jauge très élevé. En se rappelant de la double utilisation désirée de l'AMF, la génération de contrainte est possible si l'échantillon est en martensite orientée, c'est-à-dire pour des déformations supérieures à 1 %.

Une étude plus précise dans une plage de déformation restreinte a permis d'obtenir des résultats encore plus précis. Puisque la course maximale de la machine de traction utilisée est d'environ douze millimètres, la longueur du fil peut être augmentée afin de permettre une plus grande variation de la résistance électrique. En plus de limiter la

déformation, la figure 29 présente une boucle en fin de course pour vérifier la stabilité du capteur lorsqu'il y a des petits déchargements.

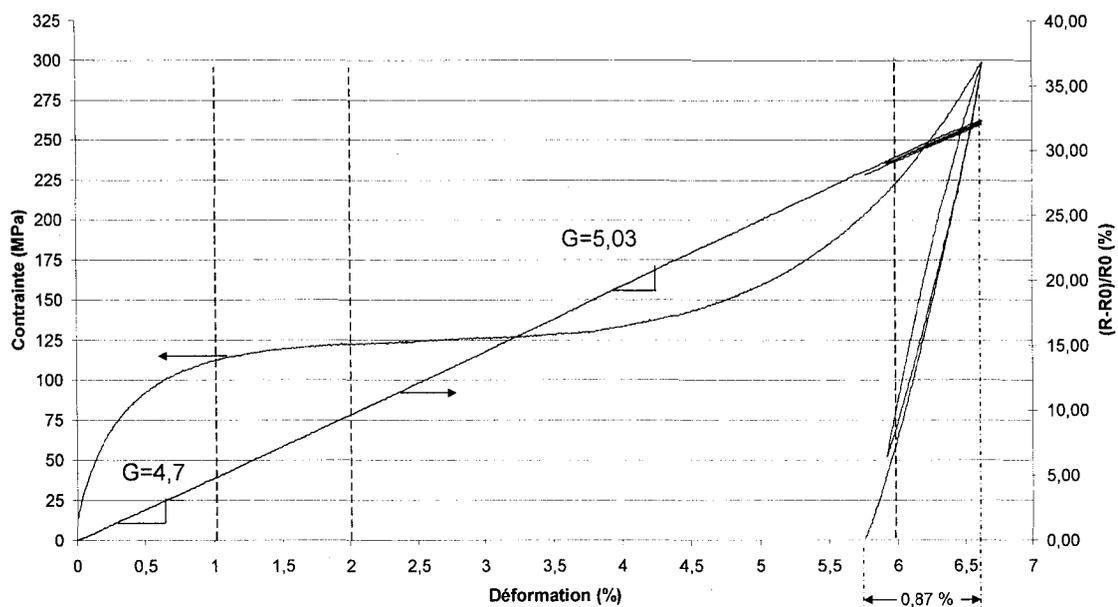


Figure 29 Graphique de la contrainte et la variation de la résistance électrique en fonction de la déformation de 0 à 7 %

En précisant l'analyse, on trouve que le facteur de jauge entre 0 et 1 % de déformation est légèrement plus faible (valeur de $G=4,7$). Cette valeur reste très intéressante, mais la zone d'utilisation est très restreinte. La plage la plus avantageuse et utile correspond à la zone de 2 à 6 % de déformation. En plus de générer une contrainte allant jusqu'à environ 600 MPa une fois chauffé, la déformation de cet échantillon dans cette région offre le facteur de jauge le plus élevé, soit 5,03.

En plus de sa grande linéarité et de sa répétitivité, le cyclage de la charge est très bien capté par la variation de la résistance. Le cyclage est observé à la fin de la courbe contrainte - déformation de la figure 29. Cette petite boucle d'environ 0,9 % de déformation représente la partie élastique du matériau. Ce jeu permet le retour de forme de l'alliage et il est très bien capté par la variation de résistance électrique. Sur la

fin de la courbe de variation de résistance relative en fonction de la déformation de la Figure 29, on peut voir trois lignes superposées. Elles sont toujours linéaires et présentent encore un facteur de jauge de 5. Cette observation confirme que non seulement il est possible de capter la déformation de 2 à 6 % avec un facteur de jauge de 5, mais aussi un déchargement d'environ 0,9 % n'importe où dans cette plage de déformation avec un facteur de jauge de 5.

Prenons par exemple une intégration de fils déformés à 4 % à l'intérieur d'un composite. La résistance électrique (ou la différence de potentiel, dans le cas d'utilisation d'un circuit de conditionnement) est constamment vérifiée, représentant l'allongement ou la déflexion de cette pièce. Plus la surface couverte par les fils est grande, plus la précision de lecture sera augmentée. Une limite de déformation est préalablement fixée, indiquant une surcharge ou un défaut de la structure. Une fois cette limite atteinte (qui peut se produire en plein vol), l'activation par effet Joule des fils peut être faite pour venir combattre la force extérieure ou supporter la structure pour prévenir un bris catastrophique. Puisque la déformation des composites avant la rupture est très faible, l'utilisation des AMF comme capteur résistif est tout indiquée. De plus, avec un facteur de jauge aussi élevé que 5, la précision du système est assurée. Enfin, le facteur de jauge devra être réévalué, mais cette fois-ci sur une plage de température d'utilisation typique que le composite hybride subira en service.

Mais encore, l'aspect important du potentiel d'activation et de suppression de défauts en utilisant les AMF n'a jusqu'à maintenant pas été vérifié. Voilà pourquoi cet aspect complexe est abordé dans le chapitre suivant.