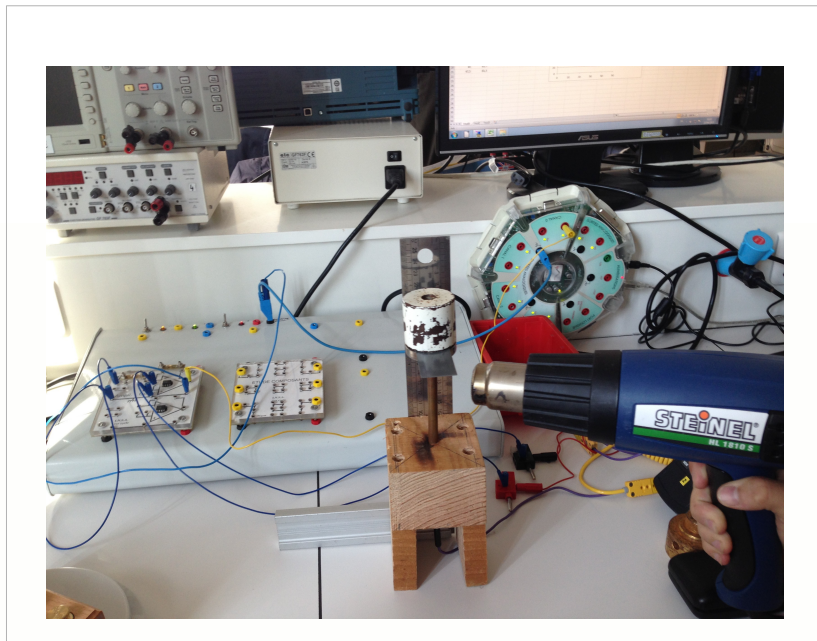


Projet de Physique P6
STPI/P6/2016 – 009

**ACTIONNEURS EN ALLIAGES A MEMOIRE
DE FORME : Caractéristiques et limites**



Etudiants :

Arnaud RICHARD

Sijia LI

Geoffrey BERNARDIE

HongLi LUO

Marion COCUBE

Gabriel DAMAY

Enseignant-responsable du projet :

Benoit VIEILLE

Cette page est laissée intentionnellement vierge.

Date de remise du rapport : **15/06/2015**

Référence du projet : **STPI/P6/2015 – 009**

Intitulé du projet : **Actionneur en Alliage à Mémoire de Forme : caractéristiques et limites**

Type de projet : **Expérimental, Recherche bibliographique**

Objectifs du projet :

- Approfondir nos connaissances sur la résistance des matériaux**
- Découvrir les AMF (Alliages à mémoire de forme)**
- Construire un dispositif expérimental nous permettant de mettre en évidence les propriétés des AMF**
- Déterminer les limites des ressorts en AMF**

Mots-clefs du projet (4 maxi) :

- AMF (Alliages à mémoire de forme)**
- contrainte**
- limite**

Table des matières

I - Introduction	6
II - Méthodologie / Organisation du travail	7
III - Connaissances théoriques	8
1 / Les matériaux mécaniques.....	8
2 / Les alliages à mémoire de forme.....	9
<i>a – Histoire</i>	9
<i>b– Propriétés</i>	9
IV - Partie expérimentale	11
1 / Montage réalisé.....	11
2 / Le thermocouple.....	12
3 / Synchronie.....	12
4 / VirtualBox.....	14
5 / Résultats des expériences.....	16
V - Difficultés rencontrées	18
VI - Conclusion / Perspectives	19
Bibliographie	20

NOTATIONS, ACRONYMES

AMF : Alliage(s) à Mémoire de Forme

Ms : Température de début de la transformation martensitique (sens direct)

Mf : Température de fin de la transformation martensitique (sens direct)

As : Température de début de la transformation austénitique (sens inverse)

Af : Température de fin de la transformation austénitique (sens inverse)

T : Température

σ : Contrainte

ε : Déformation

I - Introduction

Dans le cadre de nos études d'ingénieurs à l'INSA de Rouen nous avons choisi parmi de nombreux projets le sujet intitulé « Actionneur en Alliage à Mémoire de Forme : caractéristiques et limites ». Ce projet nous permet d'explorer à la fois une partie pratique (fabrication d'un dispositif expérimental, prises de mesures,...) et une partie théorie (propriétés mécaniques des matériaux « classiques » et des Alliages à Mémoire de Forme). Ce projet nous permet également de mieux comprendre certaines observations du quotidien concernant les matériaux, nous avons aussi découvert les alliages à mémoire de forme au-delà de la simple appellation connue de tous ou presque.

Les objectifs de ce projet sont de nous proposer une application concrète des nouvelles connaissances apportées sur le sujet et de connaissances déjà acquises lors de nos études, et d'améliorer notre qualité de travail en groupe avec des partenaires non choisis et donc d'améliorer l'organisation, l'autonomie et la communication, qualités importantes en tant que futurs ingénieurs certainement amenés à travailler en équipe.

Pendant ce projet nous avons élargi nos connaissances sur les propriétés des Alliages à Mémoire de Forme et les avons mise en pratique dans un but : déterminer les limites de travail mécanique que peuvent produire des ressorts en alliage Cuivre-Aluminium-Béryllium. Dans ce rapport, nous allons retracer le parcours que nous avons suivi durant le déroulement de notre projet.

Nous vous en souhaitons une bonne lecture.

II - METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Nous avons d'abord remis à jour nos connaissances avec M. VIEILLE, fait des recherches sur les différentes contraintes et déformations que pouvait subir un matériau ainsi que les différents types de sollicitation : traction, compression, cisaillement, flexion, torsion, ..

Devant les nombreuses tâches que nous devons réaliser, -entre la fabrication du montage, les nombreuses mesures à effectuer, les analyses des mesures via Excel ou VirtualBox, ou encore la rédaction du rapport- nous nous sommes donc partagé le travail afin de pouvoir avancer continuellement à tous les niveaux. Ainsi nous nous sommes vu attribuer les rôles suivant :

- Geoffrey et Arnaud ont fabriqué le montage qui nous a permis de faire la plupart des mesures. En effet réalisant qu'un seul montage pour les deux projets ayant lieu au même créneau horaire n'était pas suffisant, Geoffrey et Arnaud se sont lancés dans la fabrication du montage (nous utilisons celui du groupe de l'année dernière en attendant que celui-ci soit terminé), ont réalisé les différentes mesures et rédigé chacun une partie du rapport.
- Marion a réparti les tâches au sein du groupe ainsi que rédigé une grande partie du rapport, et également participé aux différentes mesures.
- Gabriel a également participé aux différentes mesures, et a réalisé le montage électrique d'acquisition des données du thermocouple sur synchronie, qui nous a permis de mesurer la température lors des expériences. Il a également rédigé une partie du rapport.
- Sijia et HongLi ont rédigé la partie sur l'utilisation du logiciel VirtualBox et réalisé les manipulations sur ce logiciel, qui nous a permis de tracer des graphiques nous permettant de vérifier nos valeurs expérimentales

Une fois le second montage terminé, nous avons continué de réaliser les mesures sur ce nouveau montage, puis nous avons pu enfin analyser nos données, principalement à l'aide du logiciel Excel. Nous avons rédigé le rapport au fur et à mesure que nous avançons dans le projet.

III - CONNAISSANCES THEORIQUES

1/ Les matériaux mécaniques

Nous étudierons plus précisément les trois caractéristiques suivantes, propres aux matériaux :

- La rigidité (ou le module Young)
- La contrainte (notée $\sigma = \frac{Force}{Surface}$)

- La limite d'élasticité : la contrainte à partir de laquelle un matériau arrête de se déformer d'une manière élastique, réversible et commence donc à se déformer de manière irréversible.

Nous avons observé différents types de comportements chez les matériaux mécaniques

- **un comportement élastique** le matériau retrouve sa forme à force nulle

On a $\sigma = \epsilon \cdot E$ avec E le module Young

- **un comportement plastique**, c'est la déformation irréversible d'un objet ; elle se produit par un réarrangement de la position relative des atomes, ou plus généralement des éléments constitutifs du matériau.

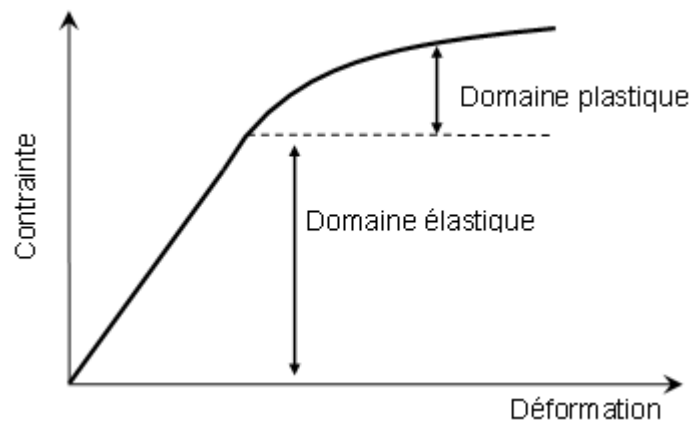


Illustration 1

2/ Les alliages à mémoire de forme (AMF)

a – Histoire

C'est en **1938** qu'ont été découverts les premiers alliages à mémoire de forme. Pendant de longues années, ils sont restés méconnus des industriels, ne dépassant pas le statut de curiosités.

L'appellation AMF ne correspond en fait qu'à l'un des aspects du comportement complexe que présentent ces alliages. En effet, lorsqu'un alliage ordinaire est soumis à une sollicitation extérieure supérieure à sa limite élastique, il se déforme et cette déformation persiste après suppression de la contrainte. Les alliages à mémoire de forme **échappent à ce comportement**. A basse température, un échantillon d'un alliage à mémoire de forme peut subir une déformation apparemment plastique de quelques pour-cent et récupérer intégralement sa forme initiale par simple chauffage.



Illustration 2

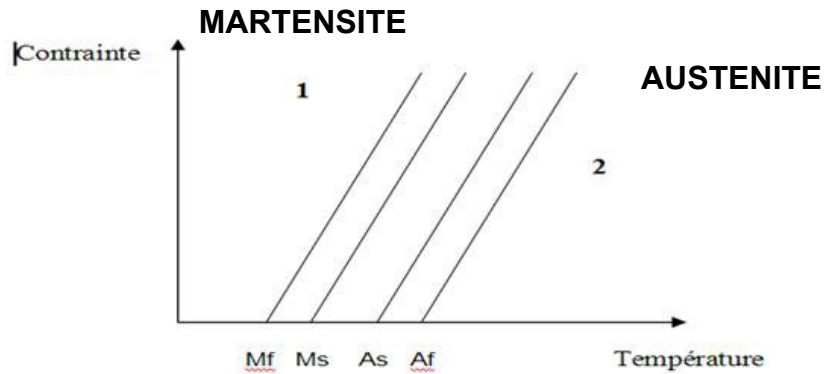
Ce n'est cependant qu'en 1962, à la découverte d'un effet mémoire de forme dans un intermétallique d'un alliage de nickel-titane par Buehler et Wiley du Naval Ordnance Laboratory (d'où le nom « nitinol » est tiré : nickel-titane Naval Ordnance Laboratory), que l'intérêt pour la recherche et le potentiel commercial des AMF prit réellement son envol.

b – Propriétés

Les propriétés pseudo-élastiques des alliages à mémoire de forme (super-élasticité, mémoire de forme) reposent sur l'existence d'une transformation de phase à l'état solide appelée transformation martensitique thermo-élastique

- A l'état libre de contrainte, le matériau est en phase **austénitique**
- En appliquant une contrainte, on modifie la structure cristallographique pour obtenir une phase martensitique
- On revient à l'état de base par la transformation austénitique

On peut observer des changements de phase lors d'un changement de température, on utilise le diagramme de Clapeyron



Pour $T < M_f$, représenté par la zone 1, 100 % de martensite. À l'opposé, pour $T > A_f$ représenté par la zone 2, on retrouve 100 % d'austénite. Entre les deux zones, on retrouve une coexistence des deux phases. La proportion dépend alors des conditions de chargement thermique et/ou mécanique antérieures.

Finalement, le dernier concept important pour comprendre les propriétés des AMF réside dans le fait que l'austénite a un réseau cristallin cubique et que la martensite a un réseau monoclinique comme dans la figure ci-dessous.

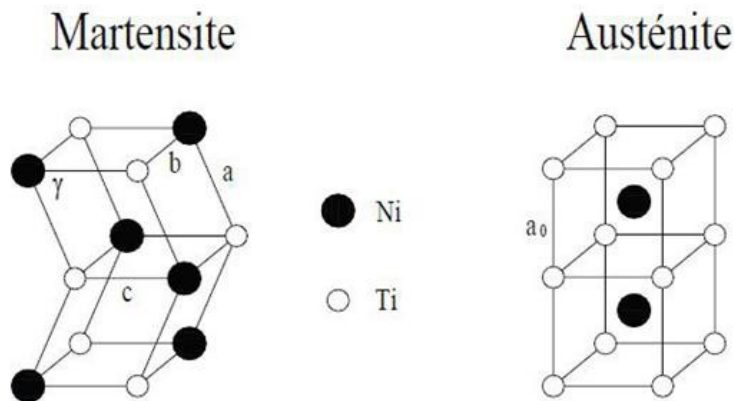


Illustration 3

IV - PARTIE EXPERIMENTALE

Nous disposons de deux ressorts en AMF mesurant chacun 1,7 cm et pesant 0,70g

Le but est de déterminer la limite du travail mécanique que peut fournir le ressort en AMF lorsqu'il est soumis à une contrainte

On augmentera la masse qui est à l'origine de la compression du ressort puis nous chercherons à déterminer la limite, le travail mécanique maximum que peut fournir le ressort en le chauffant avec le pistolet pour qu'il reprenne sa forme initiale

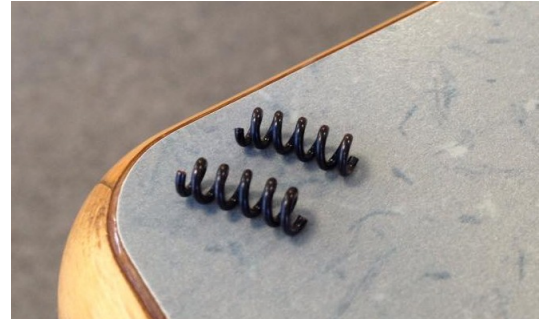
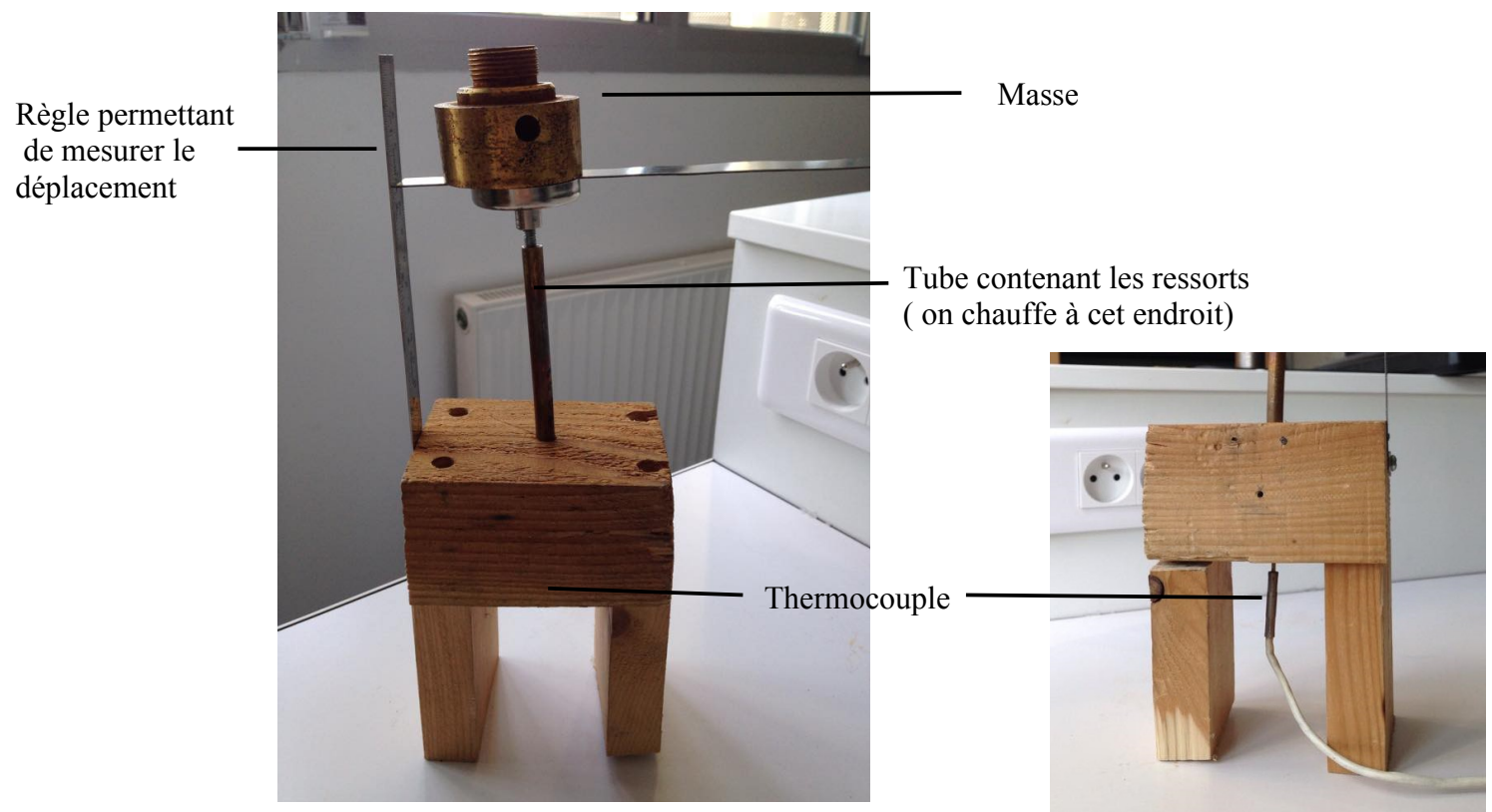


Illustration 4

Lorsqu'on le comprime, comme ici dans notre expérience, il revient automatiquement à sa forme initiale, jusqu'à la limite d'un certain poids, c'est cette limite que nous cherchons à connaître :

1/ Montage réalisé

Nous avons à notre disposition un montage que nous avons pu reprendre, et que nous allons décrire dans cette partie.



Les ressorts sont préalablement comprimés, à l'aide de la masse. Comme on l'a vu dans la partie théorique, les ressorts peuvent reprendre leur forme initiale lorsqu'ils sont chauffés, pour cela nous chauffons à travers le tube. Ceux-ci vont chercher à reprendre leur forme initiale et vont donc repousser la masse, jusqu'à la limite d'un certain poids, c'est cette limite que nous cherchons à connaître.

Pour nos mesures, nous disposons du matériel suivant

2/ Le thermocouple

Le thermocouple dans notre montage afin de voir plus précisément l'évolution de l'AMF en fonction de la température.



Lorsque deux fils composés de métaux différents sont raccordés à leurs extrémités et que l'une d'elles est chauffée, il se produit une circulation de courant continu dans le circuit. C'est l'effet Thermoélectrique.

Circuit coupé et en chauffant la jonction des deux métaux différents A et B, une tension apparaît, elle est fonction de la température de la jonction et de la composition des deux métaux.

Illustration 5

3/ Synchronie

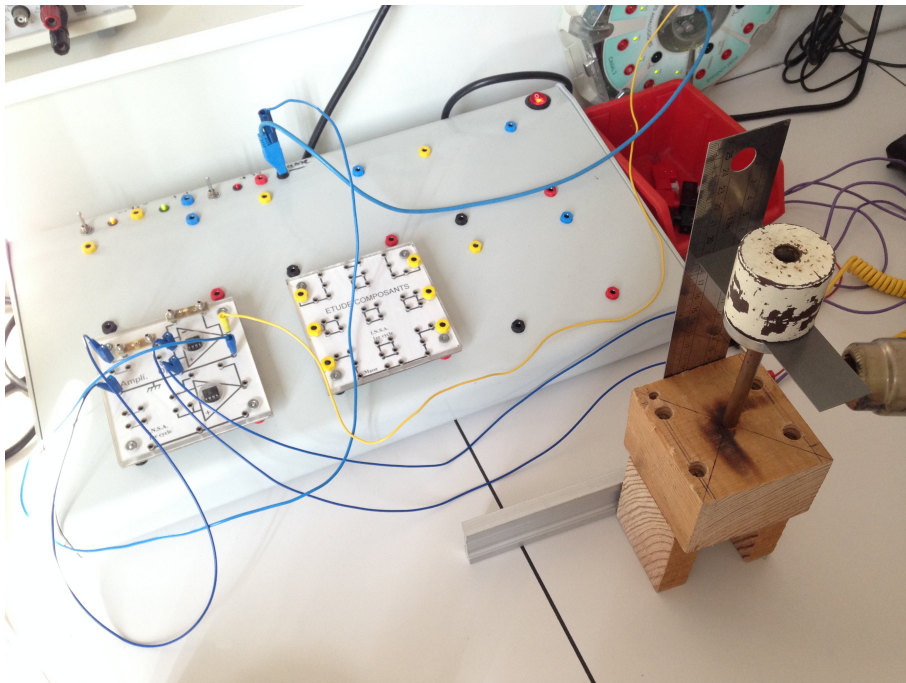


Illustration 6

Nous devons donc réaliser un montage pour associer tension et température. On chauffe à proximité le thermocouple et le thermomètre puis à l'aide du logiciel Synchronie nous obtenons une courbe correspondant à une évolution de tension.

Le montage sert à amplifier la variation de tension pour qu'elle soit facilement mesurable.

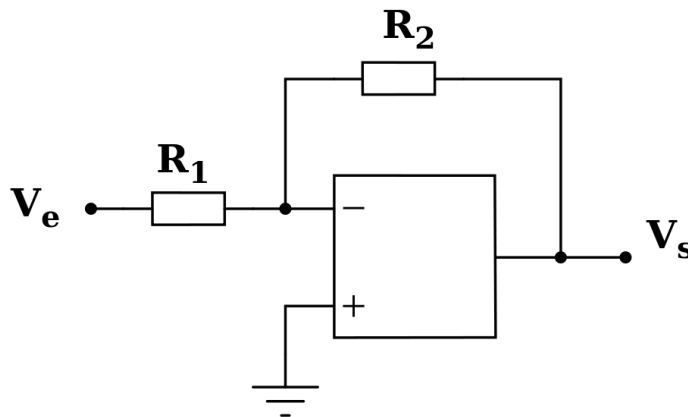
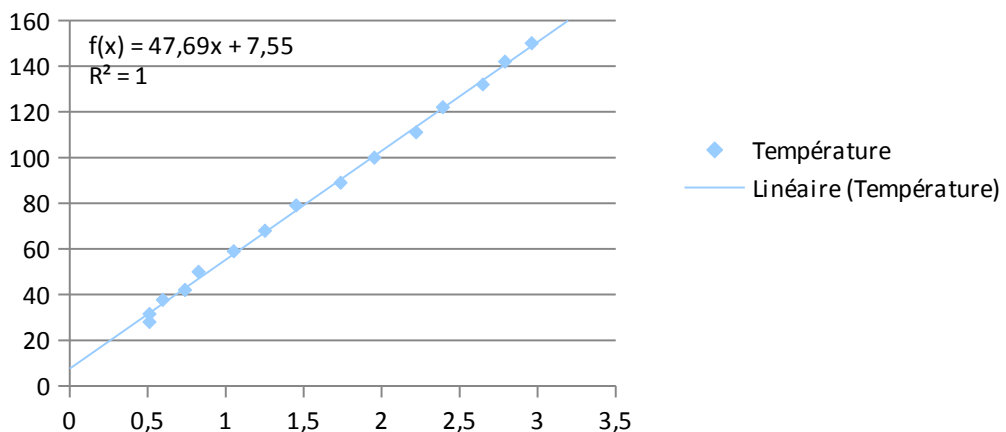


Illustration 7
Montage amplificateur inverseur

Après plusieurs essais, nos mesures nous permettent d'obtenir cette courbe, le R^2 obtenu (coefficient de détermination) étant proche de 1, cela permet de confirmer notre régression. Cela signifie que le modèle mathématique utilisé, ainsi que les paramètres a et b calculés sont ceux qui déterminent la distribution des points.

Température

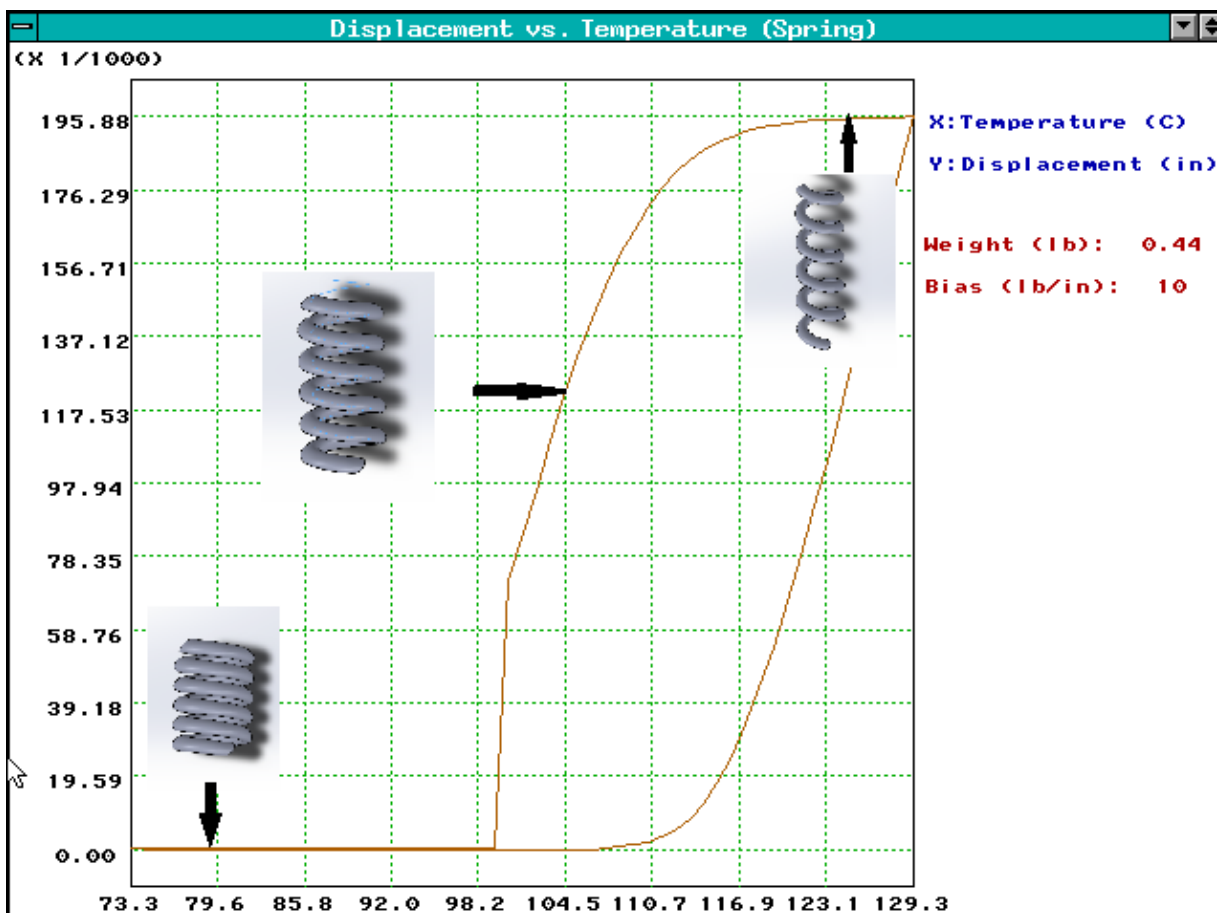


On conclut grâce à cette courbe, qu'une augmentation de 1 volt sur Synchronie correspond à une augmentation de 47,69 °C

4/ Virtual box

Nous utilisons le logiciel ' Virtual Box ' pour simuler la déformation du ressort avec les poids différents. On trace la courbe de ϵ en fonction de T et on entre les caractéristiques de l'alliage à mémoire de forme dans le simple sens.

Il faut entrer beaucoup de données des propriétés du ressort en AMF et également celles qui viennent de nos expérimentations. Il a fallu être assez attentif car les unités des valeurs sont différentes de celles qui nous appliquons d'habitude. Par exemple, **psi,inch,ksi,lb**, etc. Nous avons eu besoin d'employer quelques fonctions pour calculer certaines données.



■ **Thermoelastic tensor = E (module Young) * coefficient de la dilatation thermique**

C'est la fonction pour trouver le tenseur thermoélastique.

■ **Initial deflection = l_0 (la longueur initiale du ressort) – l (la longueur du ressort comprimé)**

C'est la fonction pour trouver la déformation initiale.

■ **$\sigma_{11max} = (16 F D \sin \alpha).(1 + 1/4 d/D) / (\pi d^3)$**

[L'angle d'enroulement α est donné par la relation : $Tan \alpha = m/(\pi D)$]

C'est la fonction pour trouver le valeur de la contrainte normale sur la section de fil quand le ressort est comprimé par la force F.

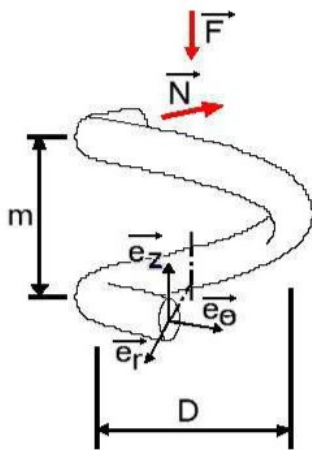


Illustration 8

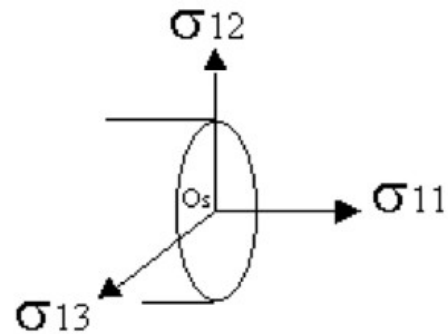


Illustration 9

Ca et Cm

Nous calculons la pente de courbe dans le diagramme de ' σ -T' en utilisant les valeurs obtenues dans nos expérimentations.

Ca (la pente des lignes de A_f et A_s) = $(\sigma - \sigma_0) / (A_f^\sigma - A_f^0)$

- A_s^0 est la température de début de transformation austénitique,

- A_f^0 est la température de fin de transformation austénitique,

Dans les expériences, nous changeons la masse que l'on fait porter par les ressorts, et donc changeons la force appliquée sur les ressorts. Alors nous obtenons les A_s^σ et A_f^σ correspondantes. En appliquant la fonction de contrainte et force, nous obtenons les contraintes correspondantes. Nous pouvons ainsi calculer la pente Ca.

Pour obtenir la pente C_m (la pente des lignes de M_f et M_s), nous utilisons la même méthode. Cependant nos expérimentations étudient seulement le simple sens, alors nous n'avons que les données de A_S^0 et A_F^0 et nous pouvons seulement obtenir la pente C_a .

On va supposer $C_m=C_a$.

A cause de l'erreur expérimentale et le manque de valeurs exactes de la pente C_m , la courbe obtenue ne correspondait pas réellement à la courbe théorique. Mais l'utilisation du logiciel 'Virtual Box' nous permet de vérifier les données obtenues dans nos expériences et de les améliorer pour trouver des valeurs plus exactes.

5/ Résultats des expériences

Nous avons donc mesuré, pour différentes masses :

- ▶ l'instant où le ressort commençait à reprendre sa forme initiale avec :
 - la tension correspondante (mesurée avec le thermocouple),
- ▶ l'instant où le ressort ne bougeait plus avec :
 - la tension correspondante,
- ▶ l'allongement du ressort final.

Avec ces mesures, nous obtenions les températures correspondant aux tensions mesurées.

Nous avons pu calculer pour toutes les masses les valeurs suivantes :

- **le travail (J)** : $W = F \cdot \varepsilon$

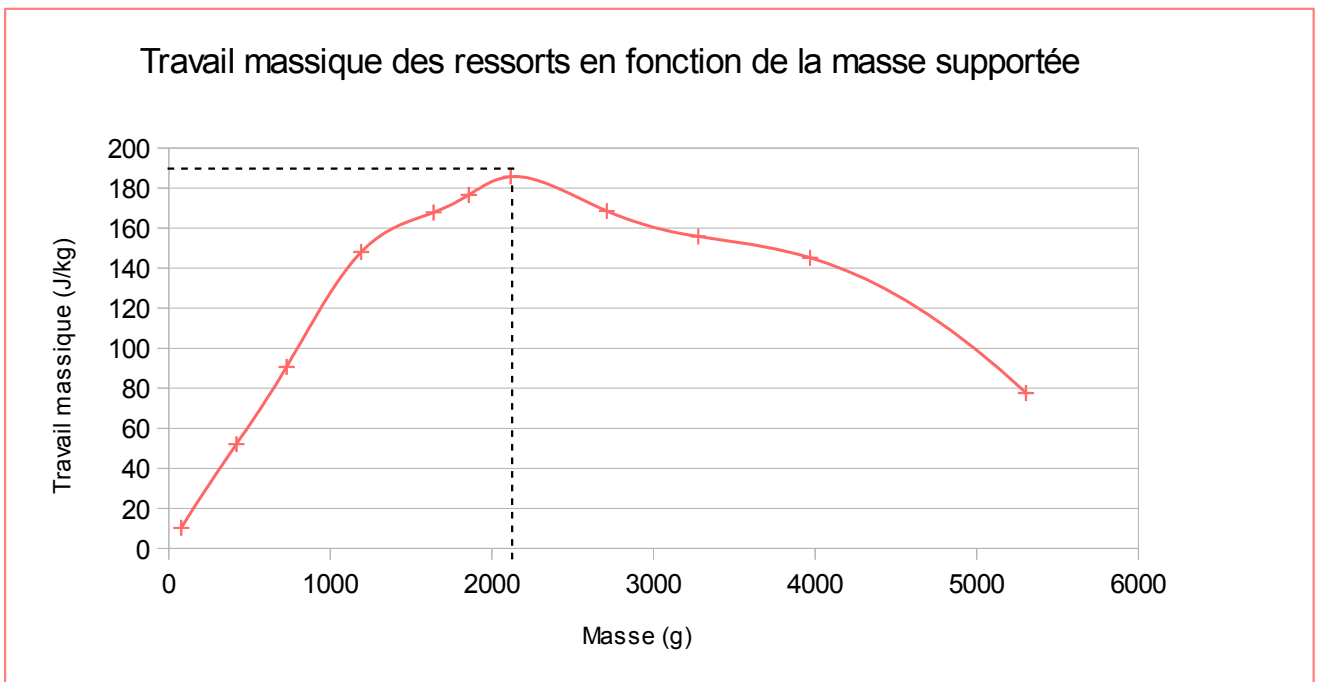
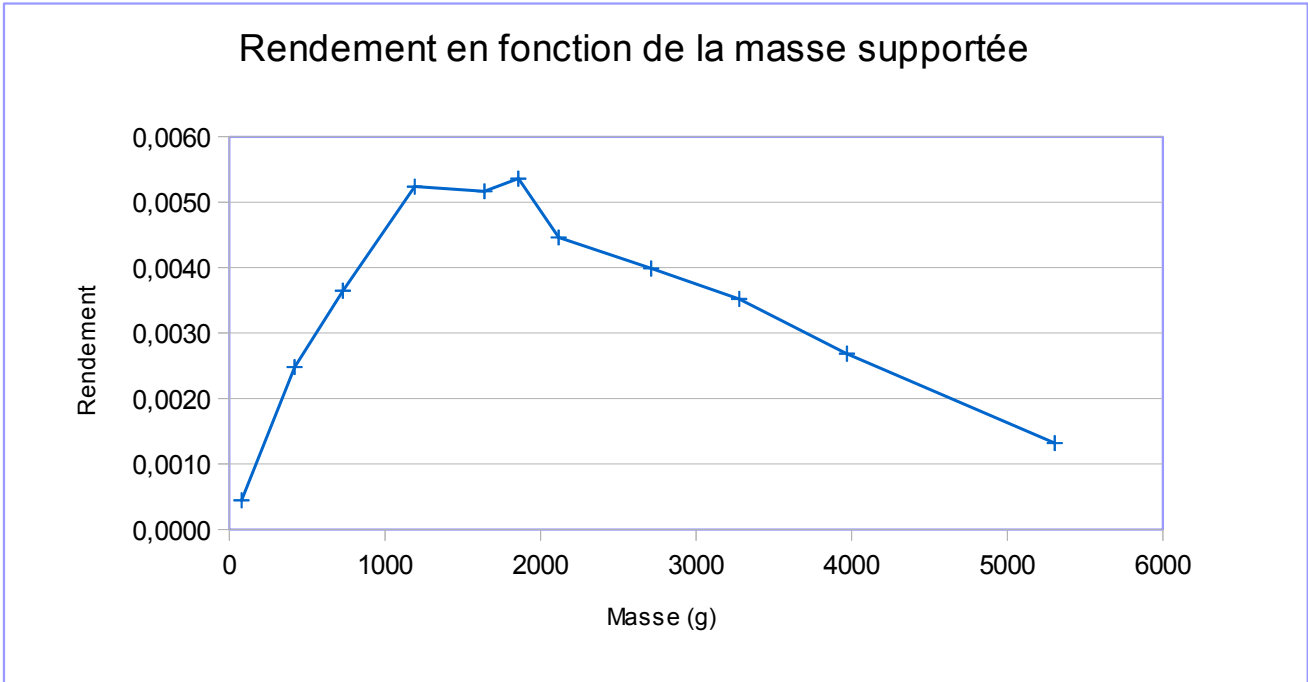
- **le travail relatif**, en divisant les travaux obtenus par la masse des deux ressorts (**$m=1,341g$**)

- **ΔT** = $T(\varepsilon_f) - T(0)$ avec $T(\varepsilon_f)$: température de fin de déformation, $T(0)$: température ambiante.

- **l'énergie thermique totale reçue par le ressort (J)** : $E_{th} = m \cdot C_m \cdot \Delta T$

- **le rendement** : $r = W/E_{th}$

Nous avons grâce à ces mesures réalisé les graphiques suivants, dans le but de repérer le travail maximal que pouvaient développer ces ressorts en AMF.



On remarque que le travail massique fourni est maximal pour une masse de 2,116kg, et ce travail vaut **$W_m = 185,7536 \text{ J/kg}$** .

Les deux ressorts en AMF (1,34g) peuvent soulever, avec un rendement maximal, une masse **1500 fois** plus importante que la leur!

III - DIFFICULTES RENCONTREES

La première difficulté rencontrée lors de ce projet a été de réaliser un montage fonctionnel. Ce travail était réparti en deux parties, celle du montage mécanique dans lequel était placés les ressorts en AMF pour observer leur transformation, et celle du montage électrique nécessaire à l'exploitation des tensions aux bornes du thermocouple.

Lors de la réalisation du montage électrique, les principales difficultés ont été rencontrées lors de sa mise sous tension. En effet, le signal obtenu n'était que très peu proportionnel à la température, et le bruit était beaucoup trop important pour que le signal soit exploitable. Nous avons donc émis l'hypothèse que ceci était dû à un thermocouple défaillant. Nous avons donc testé la tension aux bornes de celui-ci directement sur un voltmètre, et il s'est avéré qu'en effet, un simple mouvement d'un fil du thermocouple suffisait à modifier de façon importante la tension à ses bornes. Après plusieurs essais, nous avons trouvé un thermocouple opérationnel, mais le signal obtenu en sortie du montage n'était pas encore satisfaisant. Notre hypothèse suivante a porté sur la défaillance de l'un des composants du montage. Pour tester cette hypothèse, nous avons vérifié la résistance de chacun des composants à l'Ohmmètre, et il s'est avéré que l'ensemble des fils avait comme prévu une très faible résistance, mais que l'une des résistances avait visiblement une valeur de résistance beaucoup trop faible. Nous avons donc dû la remplacer. Après ces corrections, le montage était opérationnel, mais nous avons rapidement remarqué que le signal en sortie du thermocouple étant trop important, l'amplificateur opérationnel était rapidement saturé, et la tension obtenue était de 10V quelque soit la température au dessus d'une certaine température de saturation. Nous avons donc dû modifier la valeur de l'une des résistances afin d'obtenir un coefficient d'amplification plus faible.

De nombreuses sources d'incertitudes dans les mesures sont venues compliquer celles-ci. Tout d'abord, pour mesurer le temps, et donc la température, de début et de fin de transformation. Il était difficile de se référer au temps mesuré par le logiciel Synchronie, car celui-ci n'est pas affiché clairement et précisément. Il fallait alors qu'une personne surveille finement le montage pour repérer le début de transformation, et qu'une autre surveille un chronomètre lancé au même moment que les mesures sur Synchronie et note le temps lorsqu'un signal lui est donné. Les incertitudes liées à ces mesures étaient donc le délai entre le lancement du chronomètre, l'évaluation des temps de début et de fin de transformation, et les délais entre le début de transformation, la fin de transformation le signal et la prise de note du temps.

Le thermocouple a également posé problème, les variations de températures étaient souvent brutales sur Synchronie, et il était donc très difficile de mesurer finement la température lors des débuts et des fins de transformations, cette imprécision étant par ailleurs fortement amplifiée par les imprécisions de mesure de temps évoquées plus haut.

Le filetage de la tige qui servait de support aux poids a apporté une source d'incertitude supplémentaire en frottant fortement contre les bords du tube en cuivre, et en apportant ainsi une contrainte supplémentaire pour les AMF. Il nous est ainsi régulièrement arrivé de ne pas voir de transformation, puis de constater une transformation brutale. Pour réduire cette incertitude, nous avons limé le filetage de la tige.

Un autre problème était lié au mauvais refroidissement des composants du montage. En effet, si les ressorts étaient compressés alors que la température A_s était dépassée, nos mesures étaient érronées. Nous n'avions pas besoin de faire des mesures durant le refroidissement des ressorts, et nous n'avons donc pas doté notre montage de système de refroidissement, mais pour éviter ce problème, nous avons constaté après quelques mesures incohérentes qu'il était nécessaire de toujours retirer les composants du montage et les plonger dans l'eau entre deux mesures afin de les ramener rapidement à une température proche de la température ambiante.

IV - CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Pour conclure ces expérimentations, nous avons pu observer que les ressorts en Alliage à Mémoire de Forme étaient capables de développer une force très importante. A cause des nombreuses incertitudes expérimentales engendrées par le matériel de notre montage, nous n'avons pas pu avoir des résultats extrêmement précis, mais nous avons néanmoins pu obtenir des courbes approximatives nous permettant de conclure et de vérifier ce qui nous a été appris durant les premières séances de projet.

Ce sujet de Projet de Physique n'était pas lié aux domaines de spécialités de chacun d'entre nous. Cependant pour la plupart, il avait un intérêt indirect, par exemple dans le domaine du Génie Civil dans lequel les Actionneurs à Mémoire de Forme sont encore peu exploités, mais ont un fort potentiel. Ce projet s'est donc avéré être une grande source d'ouverture d'esprit sur un sujet auquel nous ne nous serions pas forcément intéressés dans un autre contexte. Par ailleurs, il nous a permis de découvrir des notions, liées notamment à la résistance des matériaux, qui pourront nous être utiles dans nos études en département et dans notre travail en tant qu'ingénieur.

Ce projet a également été pour beaucoup d'entre nous l'une des premières occasions de mener un projet avec des personnes que ne nous connaissions pas. En effet, contrairement aux précédents projets que nous avons déjà menés au cours de nos études, nous avons l'occasion de choisir, ici nous avons fait connaissance pour la première fois, lors de la première séance du projet. La communication au sein du groupe a donc été plus compliquée, et cette expérience nous aura permis de tester nos capacités d'adaptation, une expérience qui nous servira dans le futur

Pour poursuivre ce projet, nous pourrions tenter d'améliorer le montage expérimental afin de réduire les incertitudes de mesure. Il serait notamment possible de percer la tige en cuivre du montage afin de permettre une meilleure conduction thermique entre le pistolet thermique et les ressorts en AMF. Par ailleurs, il pourrait être intéressant d'étudier plus en profondeur les différentes applications, par exemple : les agrafes en biomédicale sont des implants pour consolider une fracture osseuse, elles aussi sont faites en Ni-Ti (Nickel-Titane). C'est l'effet simple sens des AMF qui est exploité. Elles possèdent une forme à la température du corps humain ce qui permet à l'os de se ressouder plus facilement. Ou encore : l'ouverture d'une trappe sur SOJOURNER: le premier robot envoyé sur Mars possédait un activateur électrique à mémoire double sens afin d'ouvrir une trappe, derrière laquelle se trouvait un panneau solaire.

Bibliographie

Propriétés : - **PDF**- C.A.R.M.A. CENTRE D'ANIMATION REGIONAL EN MATERIAUX AVANCES – décembre 2001

- <http://cours-et-exercices.blogspot.fr/2012/10/les-materiaux-intelligents.html>

Conclusion et perspectives : - <http://www.nimesis.com/faq/exemples-dapplications/>

Logo INSA : <http://www.insa-rouen.fr/accueil/top-depart-un-nouveau-logo-pour-les-6-insa>

Illustration 1 : <http://momprou.free.fr/pages/elasticite-fr.html>

Illustration 2 : http://fr.wikipedia.org/wiki/États_limites_ultime_et_en_service

Illustration 3 : <http://cours-et-exercices.blogspot.fr/2012/10/les-materiaux-intelligents.html>

Illustration 4 : Photo personnelle

Illustration 5 : <http://www.cyronix.com/Barnant.htm>

Illustration 6 : Photo personnelle

Illustration 7 : http://fr.wikipedia.org/wiki/Montages_de_base_de_l'amplificateur_op%C3%A9rationnel

Illustration 8 : Document fourni par le professeur

Illustration 9 : Document fourni par le professeur