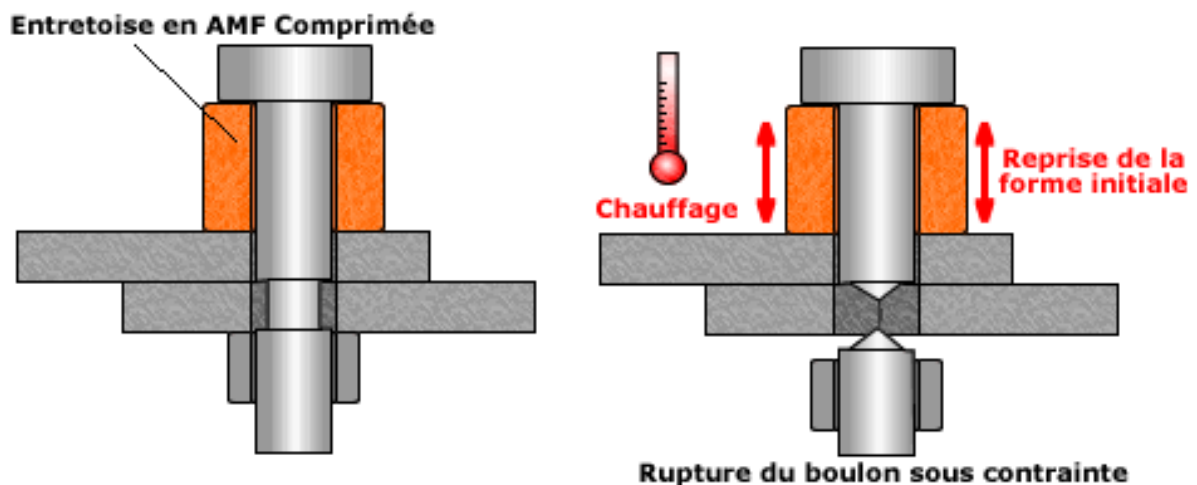


REALISATION D'UN DISPOSITIF DE DESACCOUPEMENT SPATIAL A BASE D'ACTIONNEURS EN ALLIAGES A MEMOIRE DE FORME



Etudiants :

Artémis BLONDEL

Souha ILHAM

Marie LARQUIER

Maxime DEFROMERIE

Pénélope LAROCHE

Matthieu SKLADANOWSKI

**Enseignant-responsable du projet :
Benoit VIEILLE**

Date de remise du rapport : **15/06/2020**

Référence du projet : **STPI/P6/2019 – 2020**

Intitulé du projet : **Réalisation d'un dispositif de désaccouplement spatial à base d'actionneurs en alliages à mémoire de forme**

Type de projet : **expérimental**

Objectifs du projet :

L'objectif premier de ce projet était de nous familiariser avec les Alliages à Mémoire de Forme (AMF) et leurs différentes propriétés. Ensuite, nous avons étudié la résistance des matériaux et les différentes notions de contrainte et déformation. Enfin, nous avons lié ces deux notions, avec notamment l'étude d'un ressort en A.M.F., pour comprendre le fonctionnement du dispositif de Frangibolt utilisé dans le domaine spatial.

Mots-clefs du projet: A.M.F./Ressort/Frangibolt

TABLE DES MATIERES

1. Méthodologie / Organisation du travail	7
2. Travail réalisé et résultats	9
2.1. Les alliages à mémoire de forme	9
2.1.1. Origine des alliages à mémoire de forme	9
2.1.2. Propriétés	9
2.1.3. La transformation martensitique	9
2.1.4. Les températures de la transformation	10
2.1.5. Le comportement mécanique : l'effet mémoire de forme simple sens	10
2.1.6. Le caractère pseudo élastique	11
2.1.7. Applications utilisant la mémoire de forme	12
2.1.8. Applications utilisant la pseudo élasticité	12
2.2. Résistance des matériaux : Rupture de la tige en acier	13
2.2.1. Notion de contrainte et de déformation	13
2.2.2. Phase élastique	14
2.2.3. Phase plastique	15
2.2.4. Phase de rupture	15
2.3. Principe du dispositif de Frangibolt	15
2.3.1. Principe	15
2.3.2. Notre dispositif et son fonctionnement	16
2.3.3. Avantages	18
3. Conclusions et perspectives	19
4. Bibliographie	21
5. Annexes (non obligatoire – exemples ci-dessous)	22
5.1. Caractérisation du comportement des ressorts utilisés en expérience	22
5.2. Description des différentes phases du fonctionnement de l'assemblage	23
5.3. Résultats expérimentaux	24
5.4. Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques	25
5.5. Relation entre le poids et la contrainte sur la bague	26

Table des illustrations :

FIGURE 1: TRANSFORMATION MARTENSITIQUE PILOTEE PAR LA TEMPERATURE A L'ETAT LIBRE DE CONTRAINTE [VIE].....	10
FIGURE 2: COMPARAISON ENTRE UN ALLIAGE CLASSIQUE ET UN ALLIAGE A MEMOIRE DE FORME	10
FIGURE 3: EFFET DE MEMOIRE SIMPLE SENS	11
FIGURE 4: COMPORTEMENT THERMODYNAMIQUE DES AMF.....	11
FIGURE 5: DEFORMATION DU RESEAU CRISTALLIN.....	11
FIGURE 6: RADIOGRAPHIE D'UN IMPLANT D'OSTEOSYNTHESE.....	12
FIGURE 7: DIFFERENTES AGRAFES D'OSTEOSYNTHESE EN NICKEL-TITANE	12
FIGURE 8: STENT POUR AORTE, AVEC SYSTEME D'APPLICATION.....	12
FIGURE 9: IMPLANT EN NiTi.....	12
FIGURE 10: DIVERS FILS ET RESSORTS POUR IMPLANTS D'ORTHODONTIE	13
FIGURE 11: ÉCARTEUR THORACIQUE POUR CHIRURGIE CORONARIENNE.....	13
FIGURE 12: GRAPHIQUE DE L'EVOLUTION CONTRAINTE, DEFORMATION DE LA TIGE EN ACIER (MODELE PLASTICITE PARFAITE).....	13
FIGURE 13: REPRESENTATION DE LA PIECE.....	14
FIGURE 14: REPRESENTATION DU DISPOSITIF DE FRANGIBOLT	15
FIGURE 15: DONNEES DU RESSORT	22
FIGURE 16: COURSE DU RESSORT EN FONCTION DE LA FORCE EXERCEE	22
FIGURE 17: DIAGRAMME DE CLAPEYRON DU RESSORT EN ALLIAGE NICKEL-TITANE.....	23
FIGURE 18: RUPTURE D'UN LOT DE VIS LORS DU SERRAGE. (A) VUE GENERALE. (B) VUE EN COUPE D'UNE DEMI-VIS ROMPUE. D'APRES ASM HANDBOOK	23

NOTATIONS, ACRONYMES

- A.M.F. : Alliage à Mémoire de Forme
Cu-Al-Ni-Zn : Cuivre-Aluminium-Nickel-Zinc
Ms° : température de début de transformation martensitique
Mf° : température de fin de transformation martensitique
As° : température de début de transformation austénitique
Af° : température de fin de transformation austénitique

INTRODUCTION

Dans le cadre de notre projet de groupe de 2^{ème} année à l'INSA de Rouen, nous avons choisi d'étudier le sujet : « Réalisation d'un dispositif de désaccouplement spatial à base d'actionneurs en alliages à mémoire de forme », parmi de nombreux sujets. Nous étions très intrigués par le thème de ce projet, nous voulions en savoir plus sur les matériaux impliqués dans le désaccouplement spatial. Travailler sur ce projet permet d'acquérir des connaissances théoriques sur les propriétés particulières des alliages à mémoire de forme (AMF) et des métaux tel l'acier. Ces connaissances nous permettront ainsi d'élaborer des études expérimentales vérifiant les caractéristiques de ces matériaux. Nous allons étudier les AMF et plus précisément les ressorts en alliage Nickel-Titane afin de déterminer expérimentalement leurs limites de travail mécanique.

La connaissance des matériaux en AMF nous sera très bénéfique pour notre parcours professionnel. En effet, on les retrouve dans de nombreux domaines tels que l'aérospatial, l'aéronautique ou l'industrie biomédicale.

Ce projet a pour but de nous enseigner des notions qui nous serviront pour notre futur métier d'ingénieur, et également de mettre en pratique les connaissances qu'on a acquises lors de nos deux premières années d'études. Nous apprendrons à s'organiser dans le travail en groupe, à être méthodiques et à acquérir une certaine autonomie.

1. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Tout au long de ce projet, nous nous sommes réparti le travail en séparant notre groupe, composé de 6 élèves, en sous-groupes. Cette initiative avait pour but de faire avancer notre projet en évitant de s'éparpiller dans le travail à fournir ou de négliger des notions.

Au cours des premières séances, nous avons effectués des recherches sur les A.M.F. et le dispositif de frangibolt afin de découvrir ces notions qui étaient méconnues pour la plupart des élèves du groupe. Une grande partie de nos recherches provenaient de sites Internet ou de livres pédagogiques que l'on a ensuite mis en commun. En parallèle, nous avons recherché un logiciel pour notre animation finale.

De plus, lors des premières séances en laboratoire, M. Vieille nous a expliqué les concepts les plus importantes de notre sujet tels que le fonctionnement d'un A.M.F. et ces propriétés ou encore les notions de déformation et de contrainte dans un ressort.

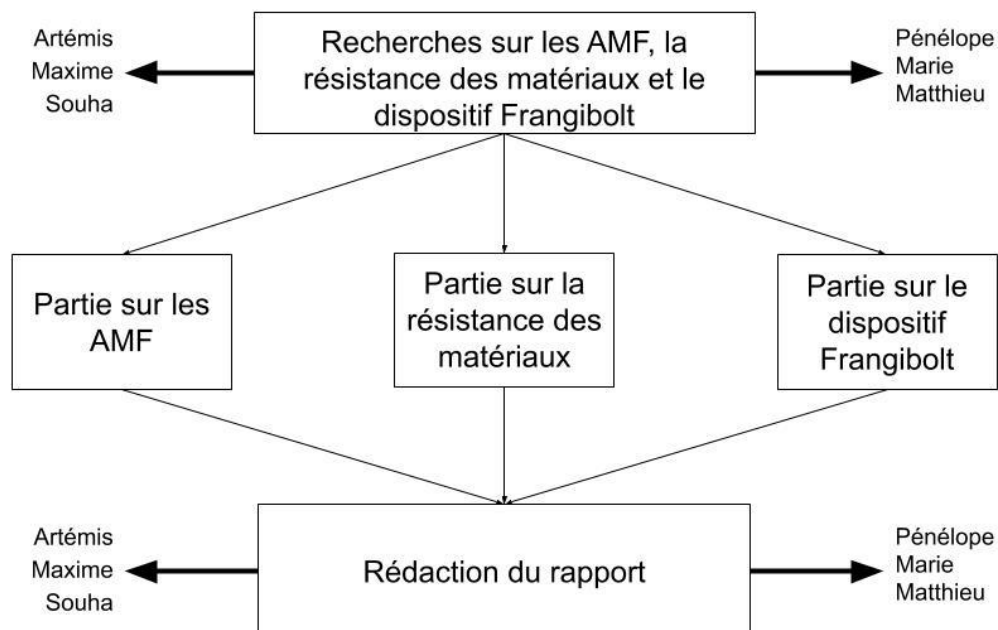
Ensuite, M. Vieille nous a présenté un dispositif avec un ressort en A.M.F. nous permettant de réaliser des mesures expérimentales. A ce moment, nous avons séparés notre groupe en deux, une première partie effectuait des mesures expérimentales tandis que l'autre partie du groupe fit des recherches sur l'animation et les A.M.F.

Cependant, suite à la fermeture de l'INSA à cause de la crise du Coronavirus, nous avons décidé de séparer notre groupe pour étudier les trois parties suivantes : les A.M.F., la résistance des matériaux et le dispositif de Frangibolt. Cette phase s'est avérée beaucoup plus théorique et chaque semaine nous avons une réunion en visio-conférence avec M. Vieille pour discuter de notre avancement dans le projet et pour qu'il puisse nous donner des informations et des pistes pour avancer celui-ci.

La principale difficulté fut la distance et donc la communication dans notre groupe. Pour remédier à cela, nous avons rédigé notre avancement sur un document écrit partagé et le groupe était informé des nouvelles données du projet par message.

Concernant notre rapport, notre idée fut de le commencer le assez tôt pour qu'il soit le plus clair et complet possible.

Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés



2. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

2.1. Les alliages à mémoire de forme

Un alliage à mémoire de forme (AMF) est un alliage possédant plusieurs propriétés inédites parmi les matériaux métalliques : la capacité de garder en mémoire une forme initiale et d'y retourner même après une déformation, la possibilité d'alterner entre deux formes préalablement mémorisées lorsque sa température varie autour d'une température critique, et un comportement super élastique permettant des allongements sans déformation permanente supérieurs à ceux des autres métaux.

2.1.1. *Origine des alliages à mémoire de forme*

Le phénomène des alliages à mémoire de forme a été observé en 1930, par Ölander pour la première fois ce fut l'alliage or-cadmium, capable de retrouver sa forme originelle après déformation. Chang et Read avaient également fait ces observations en 1932. Puis en 1938 l'alliage de cuivre-zinc est découvert par Greninger et Mooradian.

Ces découvertes ont longtemps été ignorées par les industriels et sont restées sur le côté de nombreuses années. C'est en 1962 que Buelher et Wiley du Naval Ordnance Laboratory découvre l'effet mémoire de forme dans un intermétallique d'un alliage nickel-titane (nitinol). Suite à cela d'autres alliages ont été développés tels que les alliages cuivreux aux mêmes propriétés CuAlNi, CuAlZn... L'intérêt pour les AMF en industrie n'a fait que grandir et leurs applications se sont multipliées. Par exemple, les AMF sont utilisés dans le textile ou encore les montures de lunettes.

2.1.2. *Propriétés*

Outre leur mémoire, les AMF possèdent également d'autres propriétés assez remarquables. L'ensemble de ces spécificités tire sa source de la transformation de phase thermoélastique durant laquelle une phase mère, appelée austénite, donne naissance, de façon réversible, à une phase martensitique sous l'effet d'une variation de température et/ou sous l'application d'une contrainte mécanique. De cette transformation on obtient cinq propriétés essentielles des AMF

- Effet de mémoire simple
- Effet de mémoire double
- Effet super élastique
- Effet caoutchoutique
- Effet d'amortissement

Dans notre projet nous allons principalement nous intéresser à l'effet de mémoire simple sur notre ressort en AMF.

2.1.3. *La transformation martensitique*

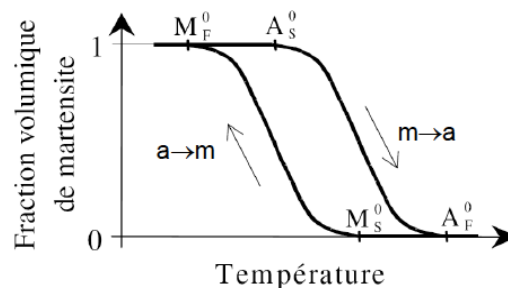
Il s'agit d'une transition de phase solide-solide entre une phase très symétrique, appelée austénite ou phase mère, et une phase moins symétrique, appelée martensite ou phase produit. Elle est reconnue comme étant responsable du durcissement des aciers par refroidissement brutal. Cette transition est qualifiée de displacive car elle se réalise sans diffusion, c'est-à-dire que les atomes ne changent pas leurs places respectives au cours de la transformation. Ainsi, la composition chimique du matériau n'est pas modifiée.

On peut également noter que la transition martensitique est exothermique tandis que la transition austénitique ou transition inverse est endothermique. Typiquement, l'austénite est stable à haute température pour un faible niveau de contraintes. La martensite est, quant à elle, stable à basse température et pour un niveau de contraintes élevé.

2.1.4. Les températures de la transformation

La transformation martensitique débute au refroidissement à une température appelée M_s («martensite start») et s'achève à une température M_f (« martensite finish»). Entre ces deux températures, il y a coexistence des deux phases. Au chauffage, la transformation inverse débute à une température A_s (« austenite start») pour être complète à une température A_f («austenite finish») plus élevée que M_s . La différence entre ces deux températures indique l'existence d'une hystérésis.

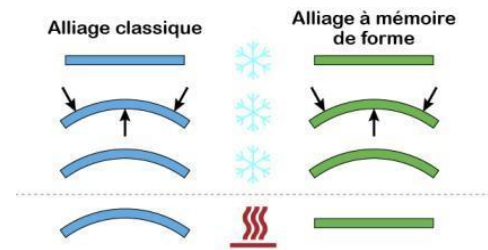
- M_s^0 est la température de début de transformation martensitique,
- M_f^0 est la température de fin de transformation martensitique, température en dessous de laquelle la martensite est stable ($z = 1$),
- A_s^0 est la température de début de transformation austénitique,
- A_f^0 est la température de fin de transformation austénitique, température au dessus de laquelle l'austénite est stable ($z = 0$).



1 : Transformation martensitique pilotée par la température à l'état libre de contrainte [VIE]

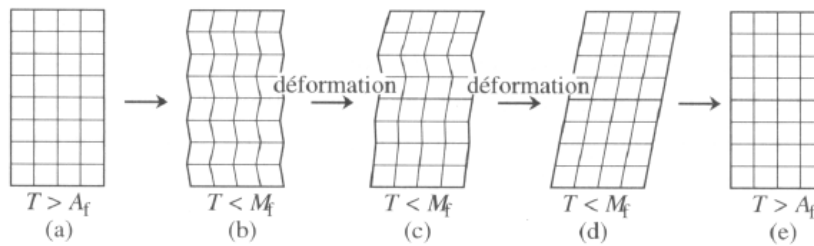
2.1.5. Le comportement mécanique : l'effet mémoire de forme simple sens

La propriété de mémoire de forme correspond à l'aptitude d'un échantillon ayant subi une déformation à l'état martensitique, à reprendre sa forme initiale à l'état austénitique dont il a conservé le « souvenir » par chauffage à température supérieur à A_f .



2 : Comparaison entre un alliage classique et un alliage à mémoire de forme

Sur la figure a, on observe un monocristal en phase austénitique (forme initiale). Puis on diminue la température telle que l'on voit alors apparaître des variantes de martensite auto-accommodante (martensite twinnée) sous la forme de plaquettes (figure b). Le matériau étant dans un état martensitique peut alors se déformer sous l'action d'une faible contrainte (figure c). Les différentes variantes de martensite s'orientent sous l'effet de la contrainte, on observe alors de la martensite orientée. Ceci est le résultat d'une déformation macroscopique permanente mais réversible du matériau (figure d).



3 : Effet de mémoire simple sens

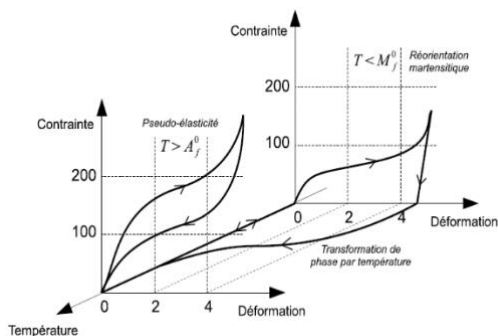
En augmentant la température telle que les variantes de martensite orientées peuvent se transformer en austénite afin de retrouver la forme initiale du matériau (figure e).

2.1.6. Le caractère pseudo élastique

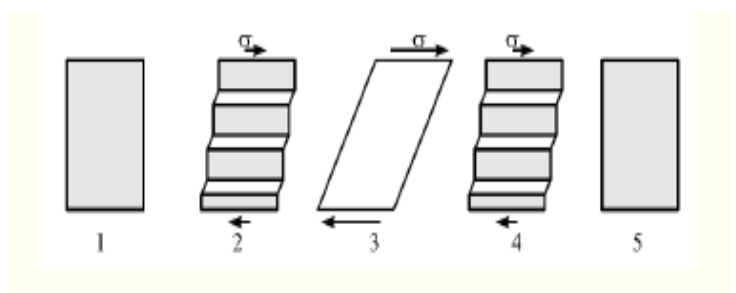
La pseudo-plasticité, ou super-élasticité, est la capacité des AMF à se déformer en grande proportion (jusqu'à une dizaine de % en traction) et de recouvrer leur configuration initiale à la décharge. Ce comportement est observable lorsqu'on applique à un volume d'AMF une contrainte croissante, dans des conditions quasi-isothermes, à partir d'un état totalement austénitique c.-à-d. lorsque la température d'essai $T > A_{0F}$. La figure 5 représente la déformation du réseau cristallin par cisaillement (appelée déformation de Bain) lors d'un essai de traction avec une contrainte σ . Ainsi, lors d'un cycle de sollicitation mécanique (charge- décharge), on peut observer une déformation élastique de l'austénite (État 1 sur la figure 5) suivie de la transformation martensitique à partir d'une contrainte seuil σ_{sam} jusqu'à une contrainte seuil σ_{fam} où toute l'austénite est transformée en martensite (État 2), laquelle se déforme élastiquement (État 3). Lors de la décharge, la martensite se déforme élastiquement jusqu'à une contrainte seuil σ_{sma} (État 3) à partir de laquelle commence la transformation austénitique qui se termine (État 4) dès que la contrainte $\sigma < \sigma_{fma}$. Toute la martensite est alors transformée en austénite qui se déforme élastiquement pour retrouver sa forme initiale (État 5). On peut également souligner que les contraintes de début de transformation σ_{sma} et σ_{sam} évoluent linéairement en fonction de la température selon les relations dites de Clapeyron :

- $\sigma_{sma} = C_m (T - M_{S0})$
- $\sigma_{sam} = C_a (T - A_{S0})$

En effet, les AMF présentent un fort couplage thermomécanique. De fait, la température de travail a une grande influence sur le comportement pseudo-élastique. De nombreux travaux expérimentaux ont montré sur différents alliages que l'augmentation de la température ambiante augmente considérablement la contrainte seuil de début de transformation décalant la boucle d'hystérésis vers des contraintes plus élevées.



4 : Comportement thermodynamique des AMF



5 : Déformation du réseau cristallin

2.1.7. Applications utilisant la mémoire de forme

L'effet mémoire simple sens est par exemple exploité dans les agrafes d'ostéosynthèse. Il s'agit d'implants de diamètre variable en forme de « U ». Pour consolider une fracture osseuse, les deux parties de l'os sont solidarées à l'aide de cette pièce. Les bras du « U » se referment au contact du corps grâce à une variation de température de l'ordre de 10°C, consolidant la fracture, et permettant aux os de se ressouder plus rapidement.



6 : Radiographie d'un implant d'ostéosynthèse

De nombreux stents utilisent le même principe physique (voir figure ci-dessous). Le stent est inséré déformé dans le corps (dans une veine, une artère...) et se déploie sous l'effet de la chaleur du corps humain. Son déploiement déforme la veine ou l'artère où il est placé, facilitant l'écoulement du sang. Une fois en place, l'effet pseudo-élastique autorise l'implant à se déformer selon les mouvements du patient tout en maintenant l'artère ouverte.



7 : Différentes agrafes d'ostéosynthèse en Nickel-Titane

2.1.8. Applications utilisant la pseudo élasticité

La pseudo-élasticité est exploitée soit pour des applications où les déformations sont répétées et doivent rester réversibles, soit parce qu'on cherche à obtenir un effort constant, à déformation variable. Ce dernier point est possible lorsque le point de fonctionnement se situe dans « plateau » de transformation.

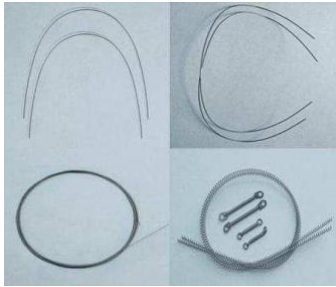
Ainsi les AMF de type Nickel-Titane super élastiques sont utilisés pour la confection de fils d'orthodontie, ou d'écarteurs thoraciques pour la chirurgie coronarienne (voir figures ci-dessous). En effet, les structures déformées, fixées (pour les fils d'orthodontie dans les bagues, pour l'écarteur thoracique dans l'incision), maintiennent un effort constant sur leurs points d'ancrage.



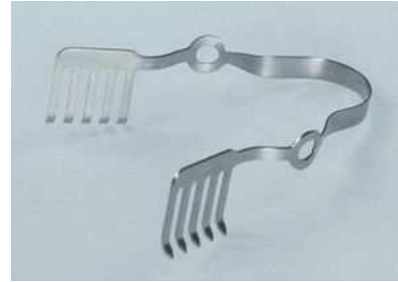
8 : Stent pour aorte, avec système d'application



9 : Implant en NiTi



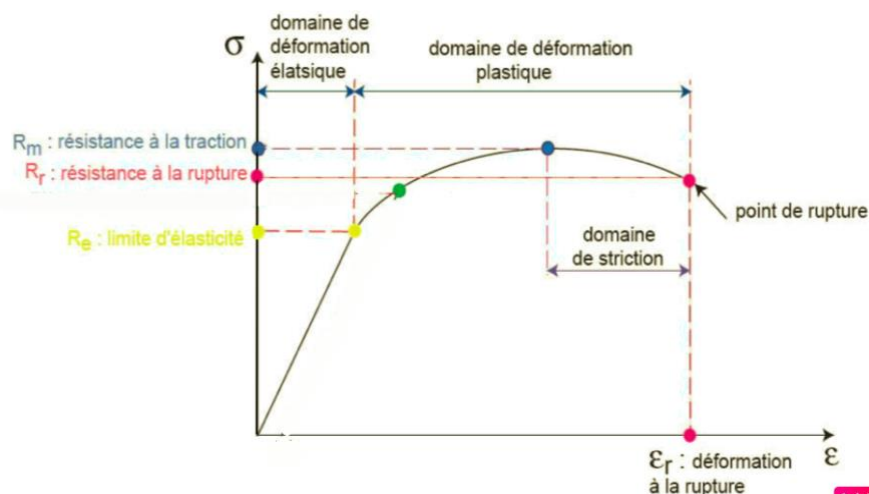
10 : Divers fils et ressorts pour implants d'orthodontie



11 : Écarteur thoracique pour chirurgie coronarienne

2.2. Résistance des matériaux : Rupture de la tige en acier

Dans notre mécanisme de désaccouplement nous allons mettre en jeu le comportement mécanique de l'acier lors d'un phénomène de traction, c'est-à-dire l'allongement de la tige sous l'effet d'une contrainte induite par le ressort.



12 : Graphique de l'évolution contrainte, déformation de la tige en acier (modèle plasticité parfaite)

2.2.1. Notion de contrainte et de déformation

On retrouve souvent les notions de contrainte et de déformation en résistance des matériaux.

En effet la **contrainte** mécanique représente la force appliquée sur la tige divisée par sa section avec dans le cas de la traction la force orientée orthogonalement à cette section. Lors de notre projet, la contrainte est modélisée par différentes masses appliquées sur nos ressorts en AMF.

On définit la contrainte par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

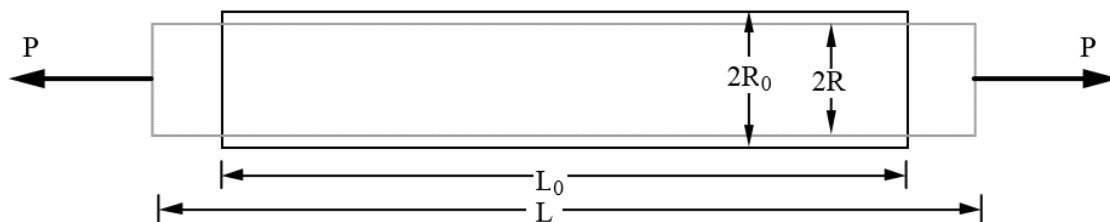
Avec σ en [Mpa], F : Force [N] et S : Surface [m²]

La **déformation** pour une traction simple est le rapport de l'allongement à la longueur initiale.

$$\varepsilon = \frac{(L - L_0)}{L_0}$$

Où L_0 : longueur de la tige sans charge et L : longueur de la tige supportant une charge P .

Nous savons par expérience que tout dépendant de l'intensité de la force qu'on exerce sur une pièce ou partie d'une structure, elle se déforme de façon minime et temporaire ou de façon prononcée et permanente. Expérimentalement, on note que la déformation est proportionnelle à la charge que l'on place sur la pièce. Voir figure ci-dessous :



13 : Représentation de la pièce

De plus, quand une pièce subit un allongement (ou raccourcissement) axial, elle subit en même temps, une contraction (dilatation) transversale. Si la contrainte axiale demeure inférieure à la limite élastique, le rapport entre la déformation transversale et la déformation unitaire axiale demeure constant.

Lorsqu'on charge un matériau, si la contrainte produite demeure inférieure à sa limite élastique, sa déformation est proportionnelle à la contrainte qu'il subit, c'est la loi de Hooke.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ en [N/m}^2\text{] ou [MPa]}$$

où E : est la constante de proportionnalité appelée module d'élasticité ou module de Young définissant la rigidité du matériau. [MPa]

2.2.2. Phase élastique

Sous l'effet de la contrainte, la tige s'allonge de manière uniforme jusqu'à une certaine limite nommée limite élastique. Sur la figure 2, cette limite est notée R_e , elle est donnée par la relation :

$$R_e = \frac{F_e}{S}$$

Une fois la contrainte enlevée, le matériau reprend sa dimension initiale, il y a donc réversibilité du phénomène en phase élastique. Lors de cette phase, l'allongement évolue linéairement avec la contrainte, on retrouve ici la loi de Hooke énoncée ci-dessus.

2.2.3. Phase plastique

Au-delà de la limite d'élasticité, l'allongement de la barre augmente même si la charge évolue peu (la courbe a un accroissement beaucoup plus faible). Le matériau rentre donc dans la phase de déformation dite plastique une fois dans cette phase, le matériau conserve une déformation permanente. On peut également noter le fait que pour les métaux, un durcissement du matériau est observé lors de cette phase, Ce phénomène est appelé écrouissage. En enlevant totalement la sollicitation, un allongement permanent va demeurer.

2.2.4. Phase de rupture

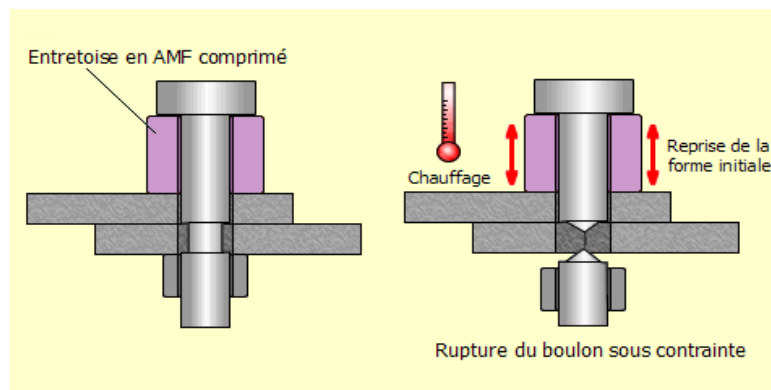
Après une phase d'allongement, la charge diminue car la section d'acier diminue. Ce phénomène est appelé « striction ». Il y a alors rupture de la barre lors que que $\sigma > R_r$, la déformation totale est appelée « allongement à la rupture » noté r .

2.3. Principe du dispositif de Frangibolt

Le dispositif Frangibolt permet de désassembler des composants dans des applications aérospatiales.

2.3.1. Principe

Deux parties d'un ensemble que l'on veut séparer sont reliées par une tige en acier (retenues à l'aide d'un écrou par exemple). Une entretoise en Alliage à Mémoire de Forme (AMF) préalablement comprimée à température ambiante est placée autour de la tige. Le chauffage de cette entretoise provoque la reprise de sa forme initiale. L'effort fourni par celle-ci pour ce faire est suffisant pour rompre le boulon et ainsi, désolidariser l'ensemble.



14 : Représentation du dispositif de Frangibolt

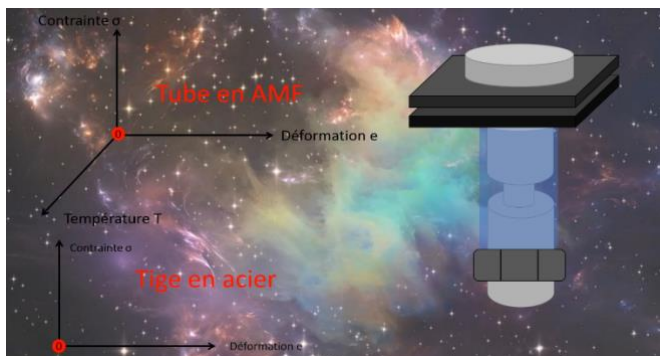
2.3.2. Notre dispositif et son fonctionnement

Le dispositif expérimental prévu initialement reprenait ce principe même si il différait sur quelques points. En effet, à la place de l'entretoise nous possédions des ressorts en AMF. L'idée étant de les enfilez autour d'une tige en acier fileté et d'en provoquer la rupture par chauffage.

Cependant, nous allons décrire le cas simplifié de ce dispositif, avec un tube en AMF et non un ressort, vu que nous n'avons malheureusement pas pu mener l'expérience à son terme et que l'étude d'un tube est plus aisée. Pour mieux en comprendre le fonctionnement, nous allons décrire points par points les différents étapes du processus pour le tube en AMF conjointement avec le comportement de la tige. Chaque étape sera décrite par un point sur les figures ci-dessous pour faciliter la compréhension des différents états du système.

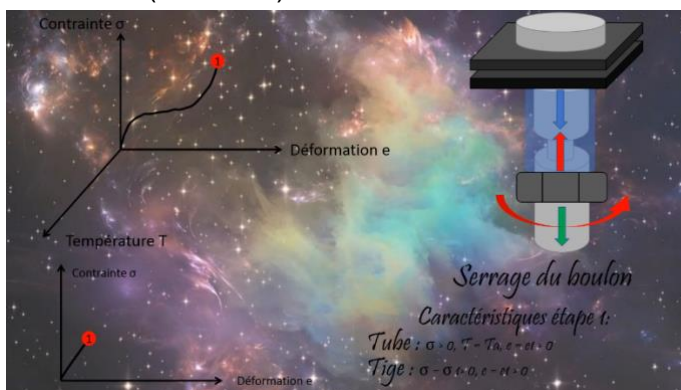
0 à 0' : Le tube est en phase martensitique à température ambiante, notée T_a . On l'assemble autour de la tige en acier et on va le comprimer à partir de l'aide de, par exemple, un écrou. En serrant, le tube se déforme sous la contrainte. Et en se comprimant, il exerce à son tour une contrainte sur la tige qui s'allonge.

0 : On installe le tube en AMF autour de la tige, retenu par un écrou. A température ambiante, T_a , le tube est en phase martensitique, une des phases caractéristiques des AMF.



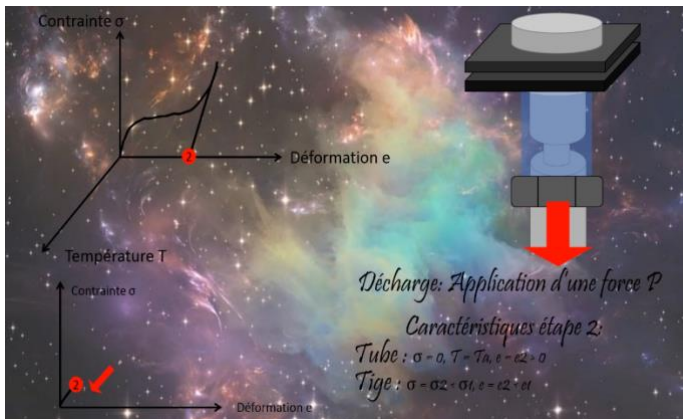
0 à 1 : On comprime le tube à l'aide de l'écrou que l'on serre autour de la tige en acier. Dû à ce serrage, le tube se déforme. En se comprimant, il appuie sur la tige en acier qui, en réaction à cet effort de traction, s'allonge.

1 : En résumé, à ce stade, le tube est sous contrainte ($\sigma = \sigma_1 > 0$), et déformé ($\epsilon = \epsilon_1 > 0$) à température ambiante $T = T_a$. De même, la tige en acier est déformée ($\epsilon = \epsilon_1 > 0$) et sous contrainte ($\sigma = \sigma_1 > 0$).



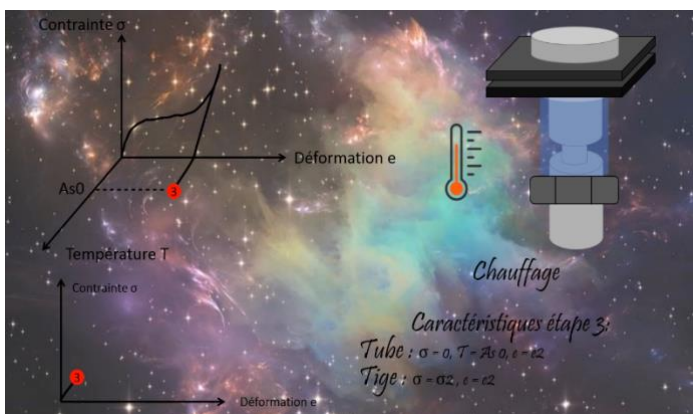
1 à 2 : On décharge en appliquant une force P sur le système. La contrainte exercée sur le tube redevient nulle mais ce dernier reste déformé. De même, dans la tige, la contrainte ainsi que la déformation ont un peu diminué.

2 : Nous avons donc un tube très légèrement moins déformé ($\epsilon_2 < \epsilon_1$) mais libre de contrainte ($\sigma_2 = 0$) à température ambiante T_a . Pour la tige : $\sigma_2 < \sigma_1$ et $\epsilon_2 < \epsilon_1$.



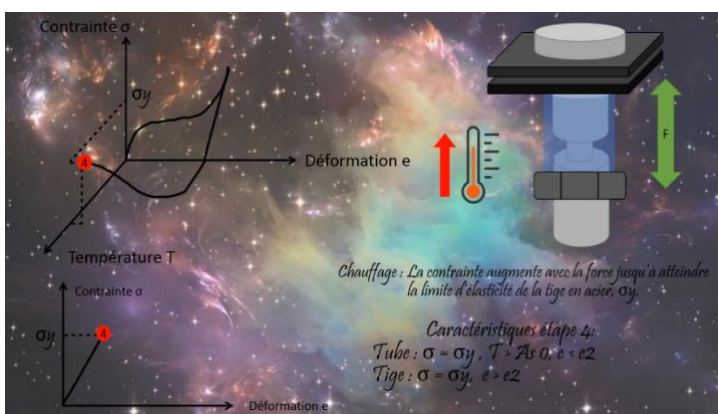
2 à 3 : On commence à chauffer. Il ne se passe rien de remarquable pour les deux parties jusqu'à atteindre la température $T = A_s(0)$ qui marque le début de la transformation austénitique de l'AMF à contrainte nulle.

3 : Les conditions sont identiques au point 2 si ce n'est que $T = A_s(0)$.



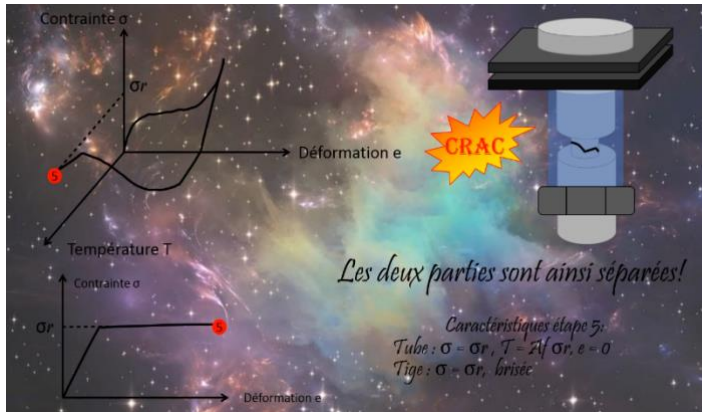
3 à 4 : On continue à chauffer. Cependant, un changement de phase s'opère pour l'AMF qui devient peu à peu austénitique. Se faisant, il développe une certaine force pour retrouver sa longueur originelle. Une contrainte s'exerce donc maintenant sur la tige en acier et inversement, en réaction, sur le tube lui-même qui augmente sa force en réponse... jusqu'à ce que la contrainte exercée sur la tige en acier soit égale à la limite d'élasticité de cette dernière σ_y . (voir le détail du calcul dans l'annexe "relation entre le poids et la contrainte")

4 : La contrainte vaut $\sigma_4 = \sigma_y(\text{tige})$ pour la tige et le tube ; le tube tend à retrouver sa forme donc $\epsilon_4 < \epsilon_3$ alors que la tige a subi une déformation croissante sous la contrainte $\epsilon_4 > \epsilon_3$ pour une température $T > A_s(0)$.



4 à 5 : On chauffe toujours jusqu'à atteindre $T = Af(\sigma_r)$, σ_r étant la limite de rupture de la tige en acier. Le tube est alors totalement austénitique et a repris sa forme initiale, l'effort qu'il développe est alors maximal. La résistance de la tige en acier est également à sa limite : elle se rompt. Notons que l'on suppose une plasticité parfaite et que le module d'érouissage H est nul, ce qui n'est évidemment pas le cas en réalité.

5 : $\sigma_5 = \sigma_r$ pour les deux parties, $T = Af(\sigma_r)$, $\varepsilon_5 = 0$ pour le tube qui a retrouvé sa longueur initiale tandis que la tige est brisée.



Finalement, cette analyse détaillée nous permet de souligner l'importance de la détermination de la contrainte de rupture de la tige en acier. En effet, en modifiant la section de cette dernière on change la valeur de la force que doit développer l'AMF pour la rompre !

Remarque qui aurait du nous servir dans l'élaboration de notre démonstrateur car nous avons commencé à retailler le diamètre de notre tige en acier pour trouver la meilleure valeur pour notre expérience !

2.3.3. Avantages

Ce système est utilisé dans l'aérospatial afin de remplacer les systèmes de désaccouplement pyrotechnique. En effet, l'absence de chocs et la non-émission de débris (produits par une combustion ou une explosion) sont particulièrement utiles pour des applications dans des milieux confinés tels que les satellites.

Pour une version animée de cette partie, veuillez-vous référer à la vidéo envoyée en pièce-jointe résumant le principe du dispositif Frangibolt.



3. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Malgré les conditions difficiles auxquelles nous avons été confrontées au cours ce projet, nous avons tout de même acquis de nombreuses connaissances sur le comportement pseudo-élastique des matériaux en AMF. Avant de faire ce projet, nous n'avions que peu de connaissances au sujet de ces matériaux, c'est pourquoi nous avons été directement intéressés par ces nouvelles notions, d'autant plus que cela pourra nous être utile au cours de notre parcours professionnel. Notre étude s'est concentrée davantage sur la théorie plutôt que sur la pratique contrairement à ce que nous avons prévu initialement. En effet, l'objectif initial était de fabriquer un démonstrateur mécanique afin de mettre en évidence expérimentalement le comportement des ressorts en alliage Nickel-Titane à mémoire de forme et de connaître leurs limites mécaniques. A cause des conditions extérieures actuelles, il ne nous a malheureusement pas été possible d'en concevoir un. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés sur une animation complète du dispositif Frangibolt représentant les expériences que l'on aurait pu faire si nous avions été dans des conditions normales. Cela nous a permis d'apprendre à concevoir des animations précises, ce que nous ne savions pas faire avant ce projet. Nous avons également pu conserver quelques résultats d'expériences faites avant le confinement, ce que nous avons trouvé intéressant de mettre dans notre rapport, bien qu'elles auraient pu être plus complètes.

La coordination dans notre travail en groupe était en premier lieu compliquée étant donné que nous nous connaissions pas tous et que nous étions nombreux, mais nous avons rapidement pris nos marques et avons acquis une bonne organisation. Chacun s'est investi au mieux dans ce projet dans le but de le faire avancer. Ce fut finalement une très bonne expérience, nous avons appris à nous organiser en groupe grâce à une bonne communication, à se répartir les tâches et à avancer ensemble dans le projet.

Nous tenons à remercier M. Vieille pour son investissement dans notre projet. Il a su nous aiguiller et nous conseiller tout au long de notre projet pour que tout se déroule convenablement. Ses explications nous ont permis d'appréhender les notions compliquées auxquelles nous étions confrontés.

Conclusion sur l'apport personnel de cet E.C. projet:

Souha: Ce projet a été bénéfique pour moi, en tout point, puisqu'il m'a permis à la fois d'en apprendre plus sur les différentes notions abordées telles que les alliages à mémoire de forme ou encore le dispositif Frangibolt, mais il m'a également permis de redécouvrir le travail de groupe. En effet, malgré les conditions quelque peu particulières, j'ai quand même pris du plaisir à travailler sur ce projet et je suis reconnaissante des leçons que j'ai pu en tirer, autant scolairement qu'humainement parlant.

Marie : J'ai choisi ce projet par curiosité puisque l'intitulé m'était complètement inconnu. J'ai pu alors découvrir de nouvelles notions que je n'aurais pas forcément rencontrées plus tard et qui sont pour le moins extrêmement intéressantes. Je ne regrette pas ce choix puisque j'ai appris beaucoup de choses concernant les alliages à mémoire de forme et le principe de Frangibolt. De plus j'ai beaucoup aimé le travail en groupe bien que ça se soit déroulé dans des conditions particulières. La communication a donc été primordiale afin de pouvoir mener à bien notre projet.

Maxime: Selon moi, ce projet fut très enrichissant. En effet, il m'a permis d'approfondir mes connaissances en mécanique, ce qui est bénéfique pour la suite de mes études car c'est un domaine dans lequel je veux m'orienter. J'avais choisi ce sujet car je trouve le thème de l'espace particulièrement intéressant au vu des multiples technologies développées. Pour conclure, durant ce projet, j'ai découvert des notions qui m'étaient jusqu'à lors méconnues tels que les AMF ou encore le dispositif Frangibolt et j'ai apprécié travailler en groupe sur ce sujet.

Artémis: J'ai choisi ce sujet pour son rapport avec l'aérospatial, domaine qui me passionne depuis longtemps. Si le projet s'est révélé très différent de ce à quoi je m'attendais, bien plus mécanique (et donc assez éloigné de mes spécialités), j'ai trouvé intéressant de travailler sur quelque chose de nouveau et complexe. En effet, sa difficulté théorique a permis d'avoir matière à comprendre pendant les semaines confinées et malheureusement sans expérimentation. Enfin, ayant réalisé l'animation, cela m'a donné l'occasion de me pencher sur la dimension pédagogique du projet, à chercher le moyen de transmettre une information claire sur un sujet riche. Cela n'a pas toujours été simple, au début il a fallu trouver un logiciel adapté (prise en main rapide, gratuit...) et ensuite cinq versions d'essais ont été nécessaires avant l'obtention de la vidéo finale car il aura fallu comprendre en profondeur le fonctionnement du dispositif Frangibolt pour pouvoir le résumer au mieux.

Pénélope: Travailler sur les alliages à mémoire de forme, dans le cadre du projet de P6, a été pour ma part une très bonne expérience. L'idée de découvrir de nouvelles notions et de nouveaux matériaux m'a directement séduite. Même si ces notions ne sont pas directement liées à la spécialité que j'ai choisie, « énergie et propulsion », cela m'a permis d'acquérir des connaissances plus poussées, qui me seront très probablement utiles au cours de mon parcours professionnel. Nous faire travailler en groupe sur un thème que nous choisissons, est selon moi très bénéfique, car cela nous pousse à nous investir dans un sujet qui nous intéresse. En particulier, cette expérience m'a permis d'approfondir mes capacités d'adaptation et d'organisation au sein d'un groupe, qui sont fondamentales dans le métier d'ingénieur. Nous avons eu une bonne organisation tout au long du projet, grâce à une communication permanente sur les avancées du projet, et grâce à une bonne répartition des tâches. La seule déception que j'ai eue au cours de ce travail, fut l'importance de la partie théorique dans la réalisation du projet. En effet, après l'annonce de l'arrêt des cours à l'INSA, il était, pour nous, compliqué de continuer nos expériences sur les AMF.

Matthieu : J'ai été attiré par ce projet par son rapport avec l'aérospatial sans vraiment savoir à quoi il correspondait. Ainsi, ce projet s'est révélé un peu difficile car il fait appel à des notions de mécanique des matériaux et de comportements des alliages à mémoire de forme que je n'avais pas. Cette difficulté a cependant ce qui a rendu ce projet vraiment intéressant, en effet j'ai donc pu découvrir des domaines totalement inconnus qui ne me seront peut-être pas nécessairement utiles pour la suite de mes études mais qui ont enrichi ma culture scientifique. De plus ce projet a été très intéressant dans la gestion de projet qui a été assez difficile du fait de la situation actuelle mais également car nous étions nombreux dans ce projet.

4. BIBLIOGRAPHIE

Gérard Guénin, "Alliages à mémoire de forme", *Techniques de l'ingénieur*, 1996.

Jordan, Prima, Vermat, Portier, "Les alliages à mémoire de forme", *L'actualité chimique*, n°371-372, pages 119-120, 2013.

Patoor E., Berveiller M., "Technologie des alliages à mémoire de forme", *Traité des nouvelles technologies*, série Matériaux, Hermès, 1994.

Yoneyama T., Miyazaki S., "Shape Memory Alloys for Biomedical Applications", *Woodhead Pub.*, 2009.

Karine Chastaing. "Étude d'alliages à mémoire de forme base Ru pour applications hautes températures", *Chemical Sciences*, 2007.

<https://www.technologuepro.com/resistance-des-materiaux-2/chapitre-3-traction-et-compression.pdf> (valide à la date du 08/06/2020).

http://btscm.fr/dicocm/G/Construire_en_acier/LE_COMPORTEMENT_MECANIQUE.pdf (valide à la date du 08/06/2020).

<https://wassimelias.files.wordpress.com/2017/02/chap-3.pdf> (valide à la date du 08/06/2020).

<https://metalblog.ctif.com/2018/07/02/alliages-memoire-de-forme/> (valide à la date du 08/06/2020).

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Nitinol> (valide à la date du 08/06/2020).

<http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap16/site/html/cours.pdf> (valide à la date du 08/06/2020).

<https://metalblog.ctif.com/2018/07/02/alliages-memoire-de-forme/> (valide à la date du 08/06/2020).

https://fr.wikipedia.org/wiki/Alliage_%C3%A0_m%C3%A9moire_de_forme (valide à la date du 08/06/2020).

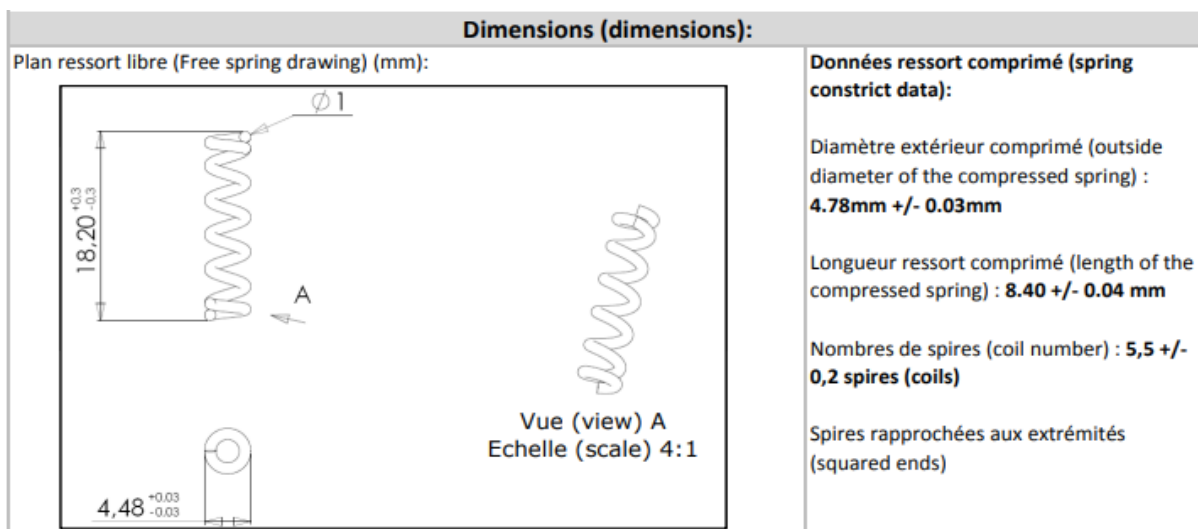
<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01420125/document> (valide à la date du 08/06/2020).

http://mc.amf.free.fr/2_applications/app_emss.htm (valide à la date du 08/06/2020).

5. ANNEXES (NON OBLIGATOIRE – EXEMPLES CI-DESSOUS)

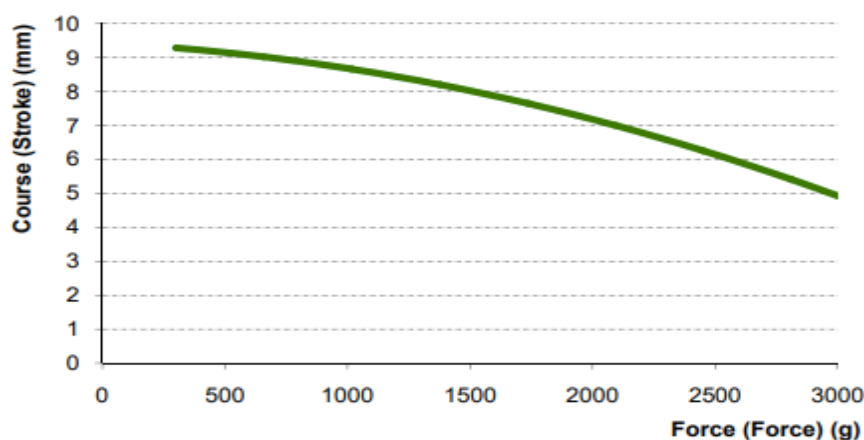
5.1. Caractérisation du comportement des ressorts utilisés en expérience

Nous avons choisi d'illustrer notre projet à l'aide d'expériences centrées sur les capacités de mémoire de forme des ressorts en alliage Nickel-Titane. En effet ces alliages présentent de très bonnes propriétés, ils résistent facilement à la corrosion et permettent de fabriquer de nombreux outils (fils, ressorts, tubes, feuilles métalliques, ...). Cela nous permet de réaliser toutes les expériences dont nous avons besoin grâce aux alliages Nickel-Titane, sans avoir pour autant peur d'abîmer les ressorts ni que nos expériences soient perturbées. Les ressorts que nous utilisons lors de nos expériences sont dotés des caractéristiques suivantes :



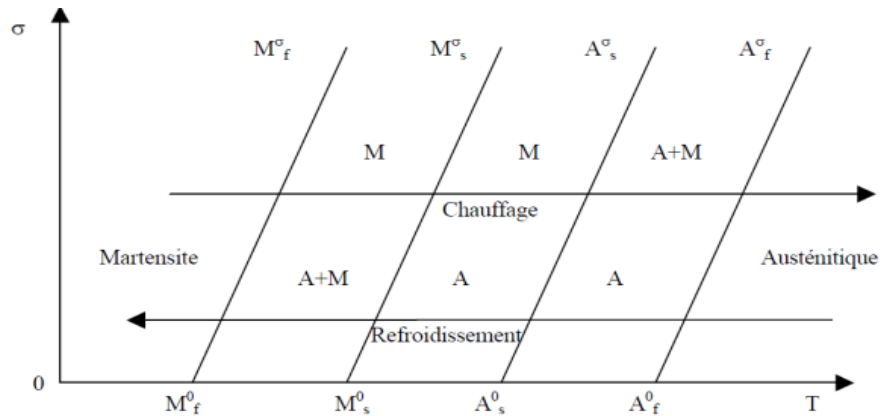
15 : Données du ressort

La course du ressort varie en fonction de la température environnante, en effet, elle augmente à une température allant de 80°C à 110°C. Sa course varie également selon la force exercée sur celui-ci, comme nous pouvons le voir dans le diagramme ci-dessous.



16 : Course du ressort en fonction de la force exercée

On dit que le ressort est à l'état martensitique à température ambiante (environ 25°C). Il se détend lorsqu'on le chauffe, il tend alors peu à peu vers un état austénitique. Au contraire, imposer une contrainte au ressort, exercer de la force sur celui-ci provoque une contraction du ressort, sa course rétrécit, le ressort tend alors vers l'état martensitique.



17 : Diagramme de Clapeyron du ressort en alliage Nickel-Titane

5.2. Description des différentes phases du fonctionnement de l'assemblage

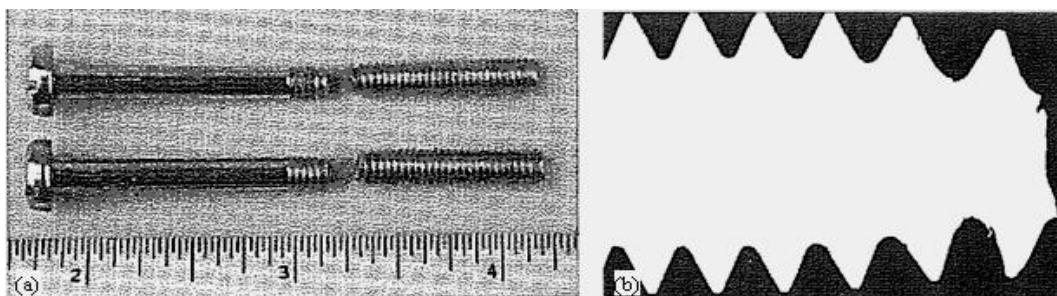
Lors du serrage, un couple de torsion est appliqué à la vis. Du fait du frottement des filets dans l'alésage, il en résulte notamment un effort de traction selon l'axe de la vis.

La vis ne tient serrée que par le frottement au niveau du filet : si elle est trop lubrifiée, elle risque de se dévisser.

Une relaxation excessive par déformation lente (fluage) pourrait également causer une perte de serrage.

La rupture des vis se produit dans la partie filetée, d'après la Figure 1a. Or le plan de rupture est perpendiculaire à l'axe de la vis, ce qui est compatible avec l'effort de traction cité précédemment.

On remarque sur la Figure 1b que près de la zone de la rupture, le diamètre de la vis a diminué et les filets se sont écartés : c'est le signe d'une déformation importante : la réduction de diamètre est de l'ordre de 50%. Le mode de rupture est donc ductile, il n'y a pas eu de fragilisation particulière à l'origine de la rupture de ces vis.



18 : Rupture d'un lot de vis lors du serrage. (a) Vue générale. (b) Vue en coupe d'une demi-vis rompue. D'après ASM Handbook

En effectuant des analyses complémentaires on observe que le couple de serrage utilisé pour ces vis défectueuses, ainsi que les caractéristiques mécaniques (notamment la force à rupture en traction) de vis identiques (même lot) sont conformes aux spécifications. L'analyse «matériau» ne signale donc pas d'anomalie particulière. Il faut alors affiner l'analyse mécanique.

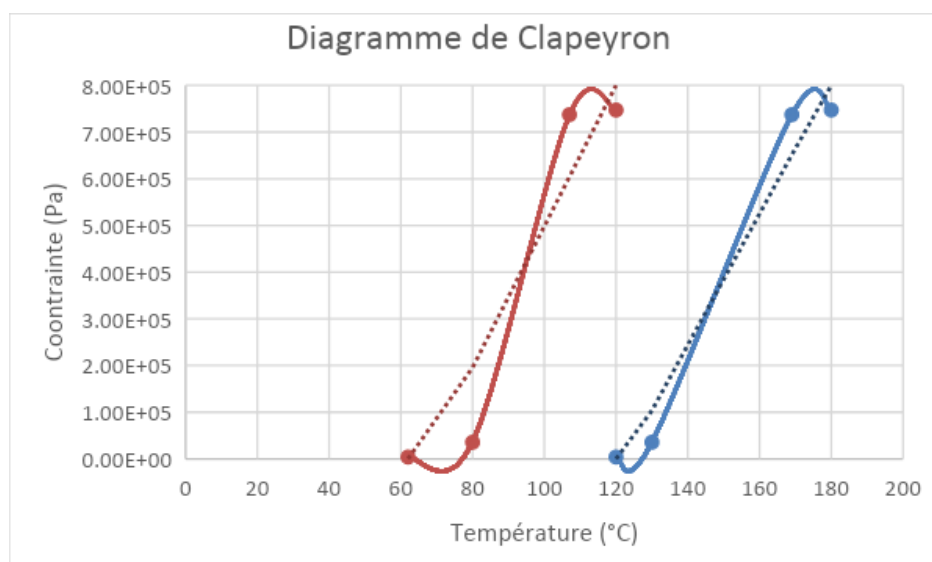
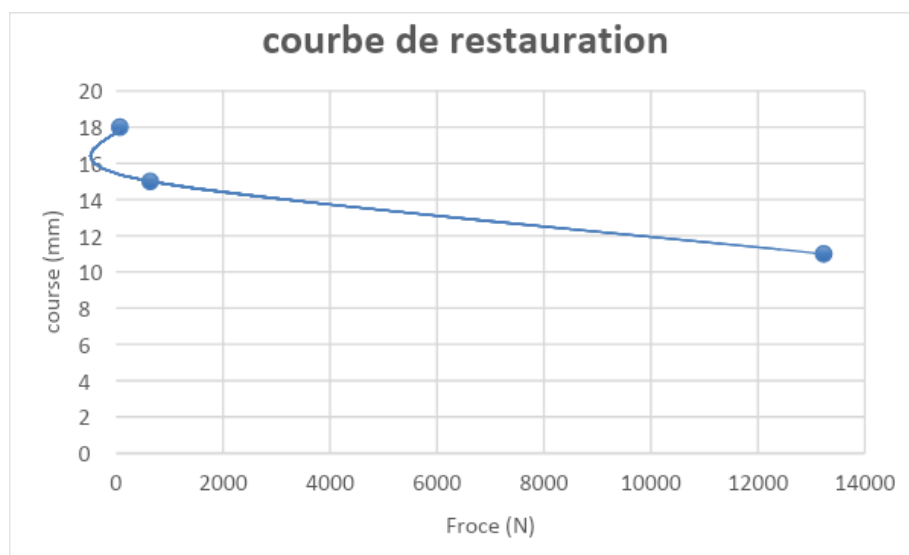
Une formule couramment utilisée pour le dimensionnement des assemblages vissés est la suivante :

$$T = K \cdot D \cdot P$$

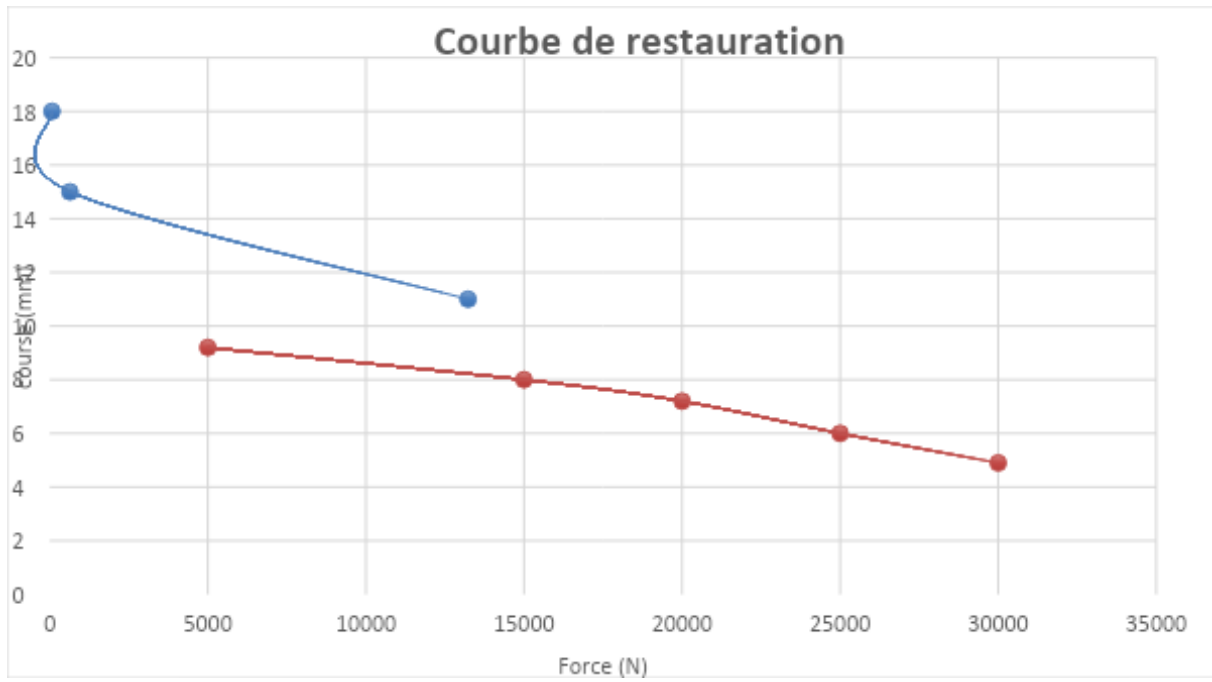
T est le couple de serrage, P est la force de traction le long de l'axe de la vis, D est le diamètre de la vis et K est un coefficient qui dépend notamment du coefficient de frottement entre la vis et l'alésage.

En procédant à ces analyses complémentaires, on remarque que le couple de serrage est conforme aux spécifications, la charge à rupture en traction également, il faut donc chercher au niveau du troisième terme de la formule : le coefficient K. On indique que le frottement intervient, il faut donc regarder les conditions de frottement et en particulier le graissage de la vis afin d'affiner nos recherches.

5.3. Résultats expérimentaux

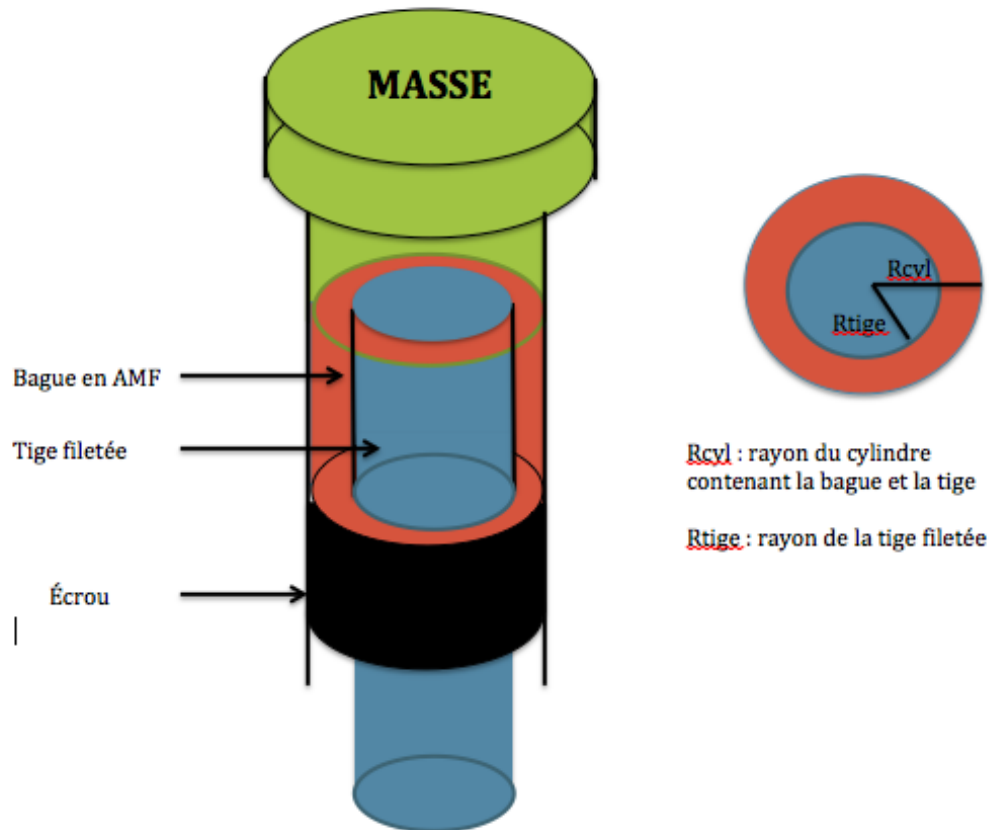


5.4. Comparaison des résultats expérimentaux et théoriques



5.5. Relation entre le poids et la contrainte sur la bague

Schématisation du problème



De manière générale on a que $\sigma = \frac{F}{S}$

Ici la réelle surface d'appuie du poids n'est pas la surface S_{cyl} mais bien la surface S' qui est en fait l'anneau formé par la bague en amf.

On calcule alors S'

$$S' = S_{cyl} - S_{tige} = \pi(R_{cyl}^2 - R_{tige}^2)$$

Ici la seule force exercée sur la bague est donc le poids du a la masse $P = mg$

Ainsi on a alors

$$\sigma_{bague} = \frac{mg}{\pi(R_{cyl}^2 - R_{tige}^2)}$$