

# Les alliages à mémoire de forme

## Application à la robotique humanoïde

Dossier présenté par Nadia Abdelmoumni, Kévin Bonetti, Florent Devriese et France Mansiaux, dans le cadre des olympiades de la physique France 2009.

### 1) Introduction

Considérons les alliages métalliques suivants : l'acier, qui est du fer contenant un peu de carbone, et le nitinol, qui est un mélange équiatomique de nickel et de titane.

Nous constatons que l'acier est dur et rigide alors que le nitinol est superélastique.

**D'où provient donc cette différence étonnante de propriétés mécaniques de l'acier (alliage fer-carbone) et du nitinol (alliage nickel-titane) ?**

La dureté de l'acier est une propriété liée à la nature même de sa structure atomique. On l'obtient en soumettant cet alliage à un traitement thermique, par exemple du type « trempe thermique », qui consiste à le porter à haute température et à le refroidir brutalement. D'un point de vue microscopique, on constate que la structure du fer est modifiée au cours de cette opération, c'est-à-dire que la manière dont les atomes sont agencés relativement les uns aux autres a changé : il y a donc eu un changement de structure, ou « transition de phase », à haute température.

La superélasticité du nitinol s'explique par le fait qu'au cours de la déformation qu'on impose à cet alliage, la structure change : il y a donc, tout comme pour l'acier, une transition de phase, mais cette fois-ci à basse température.

Pouvant expliquer ces deux propriétés mécaniques par l'existence de transitions de phase, la différence de comportement mécanique de ces deux alliages pourrait donc être attribuée à la différence de température à laquelle ces transitions s'effectuent (l'acier est chauffé aux environs de 900°C alors que le nitinol est susceptible de se transformer à température ambiante).

Commençons par considérer le cas de l'acier.

Lorsqu'on chauffe un métal, on apporte de l'énergie aux atomes qui le constituent, les amenant à vibrer avec une amplitude de plus en plus élevée autour d'une position d'équilibre. Une haute température de chauffage (de l'ordre de 900°C) conduit à la multiplication de défauts ponctuels appelés lacunes (sites atomiques non occupés) qui autorisent le déplacement des atomes sur de longues distances par sauts successifs de site en site. Les éléments chimiques peuvent alors en se déplaçant sur des distances relativement grandes (bien supérieures la distance interatomique) adopter une nouvelle répartition au sein du matériau. Dans un nouvel environnement chimique, les atomes peuvent alors reformer d'autres liaisons (on décrira un peu plus loin la nature de ces liaisons) dans une nouvelle géométrie. On dit alors que la transformation de phase est « reconstructive ».

Qu'en est-il pour le nitinol?

La transformation s'effectuant à basse température, l'énergie n'est pas suffisante pour casser les liaisons interatomiques. La modification de la géométrie ne porte alors que sur une variation faible des angles et des longueurs des liaisons. Les atomes se déplacent alors sur de très petites distances

(bien inférieures à la distance interatomique). On parle alors de transformation « displacive ».

**En résumé, nous pouvons attribuer en partie cette différence de comportement mécanique des deux alliages acier et nitinol à des transitions de phase ( modification de la géométrie globale des édifices formés par les atomes sans changement de la composition chimique) de natures différentes, l'une étant qualifiée de « reconstructive » et l'autre de « displacive ».**

Dans le travail qui suit, nous nous attacherons à clarifier, dans une première partie, cette hypothèse en commençant par examiner les structures atomiques des alliages, puis à mettre en évidence la relation étroite entre ces mêmes structures et les propriétés mécaniques se manifestant à l'échelle macroscopique.

Dans une deuxième partie, nous étudierons le cas du nitinol et mettrons en évidence la relation entre ses propriétés mécaniques remarquables- la superélasticité et la mémoire de forme- et sa structure atomique.

Enfin nous nous intéresserons à un exemple d'application des AMF dans le domaine de la robotique humanoïde, où nous proposons un système d'articulation des phalanges dans une prothèse de main bionique.

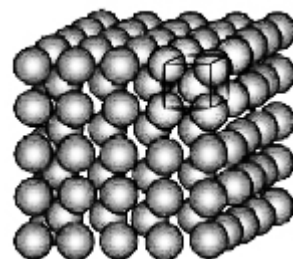
## 2) Généralités sur la structure des métaux

### 21- modèle

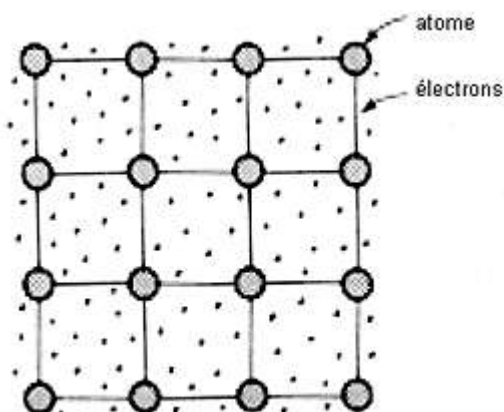
Nous pouvons considérer les métaux suivant deux modèles :

#### *a) le modèle des sphères dures*

Les atomes sont assimilés à des billes ou de balles ou encore de sphères dures au contact les une des autres suivant certaines directions dans le cristal.



#### *b) modèle du gaz d'électrons*



En réalité, le cristal est constitué d'ions fixes positifs et d'électrons (un ou plusieurs suivant la valence de l'atome). Les électrons sont alors considérés comme libres, c'est-à-dire qu'ils n'interagissent pas entre eux mais seulement d'une certaine manière avec les ions du métal, la charge positive de ceux-ci étant supposée répartie uniformément. Ce modèle permet d'expliquer les propriétés électriques des métaux.

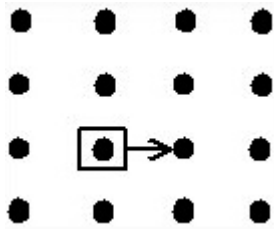
## 22- définitions cristallographiques et cristal idéal

### a) le réseau cristallin

Un métal pur peut être représenté par un cristal monoatomique défini comme étant un empilement infini et régulier d'atomes identiques. Le mot « infini » étant justifié par le fait que la distance entre deux atomes voisins d'un cristal est de quelques angströms ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$ ), donc dans un cristal de 1 micron cube, il y a de l'ordre de  $10^{12}$  atomes, soit 10 000 milliards ;

Le mot « régulier » désigne le fait que les atomes sont empilés de manière ordonnée, selon un schéma répétitif ou "réseau" .

Un réseau est un ensemble de points, ou "noeuds", en 3 dimensions, qui présente la propriété suivante : une translation dans l'espace selon certains vecteurs permet de retrouver exactement le même environnement. Il y a donc une périodicité spatiale.



Invariance par translation dans un réseau

A chaque noeud de ce réseau se trouve un "motif", c'est à dire un un atome.

Nous pouvons, à ce stade, préciser la définition précédente :

un cristal est un empilement infini et régulier de motifs identiques, (dans un métal pur, le motif est un atome).

On peut illustrer ces notions de motif et de réseau dans le cas d'un carrelage : les carreaux sont les motifs, et leurs emplacements sont les noeuds d'un réseau.

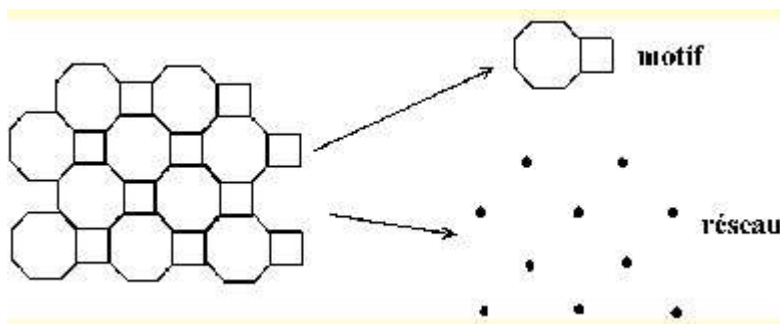
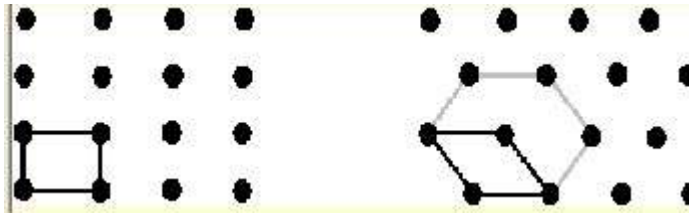


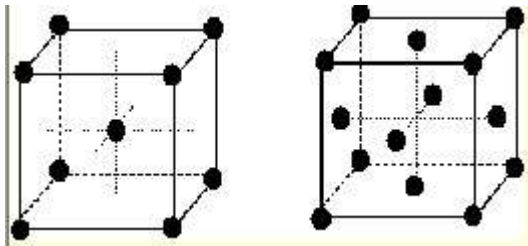
Illustration de la notion de motif et de réseau dans un carrelage

On voit que l'on peut découper le réseau en mailles, une maille étant la plus petite portion du réseau ayant les mêmes symétries que le réseau lui-même. Une maille est donc un parallélépipède (Il y a un noeud à chaque sommet mais chacun d'eux est partagé entre plusieurs mailles); le réseau est un empilement de mailles élémentaires. On distingue 7 mailles élémentaires (systèmes cristallins) différentes en 3 dimensions, de la maille triclinique (parallélépipède quelconque) de plus basse symétrie au cube de plus haute symétrie.



Exemple de mailles élémentaires dans des réseaux à deux dimensions

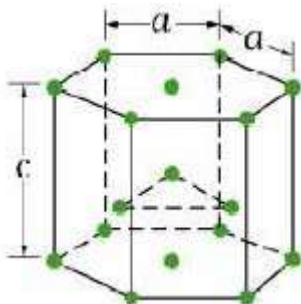
Les motifs sont donc situés aux noeuds du réseau, c'est à dire aux 8 sommets de la maille élémentaire. Cependant, on a parfois des motifs situés au centre de la maille, structure dite "centrée" ou bien encore aux centres des faces, structure dite "à faces centrées".



Structures cubique centrée (cc) et cubique à faces centrées (cfc)

En combinant ces différentes possibilités aux 7 systèmes cristallins, on obtient les 14 réseaux de Bravais.

Le caractère essentiel de la structure cristalline des métaux est le mode d'empilement des atomes qui offre une compacité optimale, c'est-à-dire que le volume occupé par les atomes d'une maille est le plus grand possible. Parmi l'ensemble des structures cristallines, seuls trois types de réseaux répondent à ce critère de compacité. Ce sont les réseaux **cubique centré (cc)**, **cubique à faces centrées (cfc)**, et **hexagonal compact (hc)**.



Structure hexagonale compacte (hc)

Nous retrouverons donc éventuellement ces structures par la suite.

### ***b) Liaison métallique***

Les atomes métalliques s'ionisent facilement (1 à 3 électrons sur la couche externe, faiblement liés au noyau), la mise en commun d'un ou de plusieurs électrons dans un nuage « délocalisé », forme la liaison métallique. Les métaux sont donc un assemblage d'ions positifs dans un « gaz d'électrons » qui assure leurs conductivités électrique et thermique élevées, ainsi que l'éclat métallique (interactions entre électrons et photons) et les propriétés mécaniques (plasticité). La liaison métallique « pure » ne se rencontre que pour les métaux normaux (alcalins, alcalino-terreux, Al...) où elle est assez faible. Pour les métaux de transition, les ions sont beaucoup plus rapprochés et l'interaction entre les sous-couches incomplètes crée une composante covalente, qui renforce la liaison parfois de manière

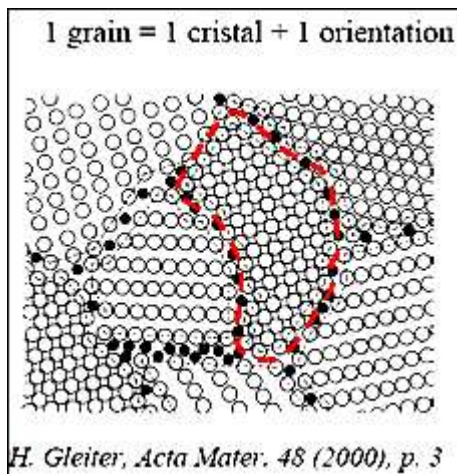
considérable. La liaison métallique n'est pas dirigée et conduit à des assemblages compacts.

Le type de liaison détermine quelques propriétés mécaniques telle que la rigidité. Les atomes étant très proches les uns des autres et exerçant une force de répulsion élevée, ne pourront que se rapprocher faiblement les uns des autres : la compressibilité est alors faible, et donc la rigidité élevée.

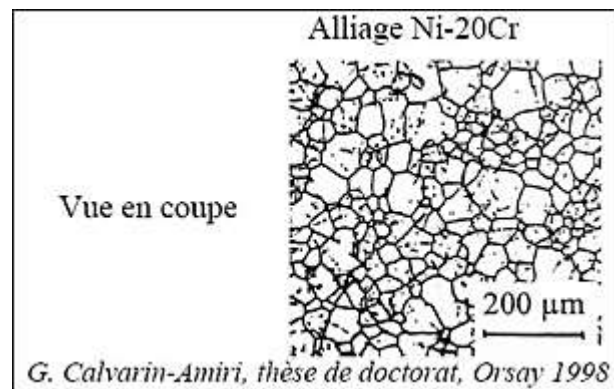
### c) Notion de grain

Il est rare de trouver des matériaux dans lesquels l'orientation cristalline (c'est-à-dire celle du repère principal du cristal) soit constante d'un bout à l'autre de la pièce. En fait, les matériaux sont le plus souvent « polycristallins », c'est-à-dire constitués de cristaux appelés grains d'orientations différentes, séparés par des interfaces appelées joints de grains.

D'une manière générale, les cristaux sont anisotropes : leurs propriétés ne sont pas identiques dans toutes les directions de l'espace. La distribution des orientations cristallines est appelée « texture cristallographique », à l'échelle de l'objet concerné.



Orientation des grains



joints de grains

### d) Notion de phase

En sciences des matériaux, une phase se caractérise par une composition chimique et un arrangement atomique, cristallin (avec une certaine structure) ou non. Un matériau comporte généralement plusieurs phases (désirées ou non). La taille, la morphologie et la répartition spatiale de ces phases gouvernent de nombreuses propriétés d'emploi des matériaux et en particulier la résistance aux sollicitations mécaniques.

Tout comme l'assemblage de grains, l'assemblage de phases peut se faire à une échelle qui va de quelques dizaines de nanomètres jusqu'à des tailles centimétriques.

## 3) Cas du nitinol

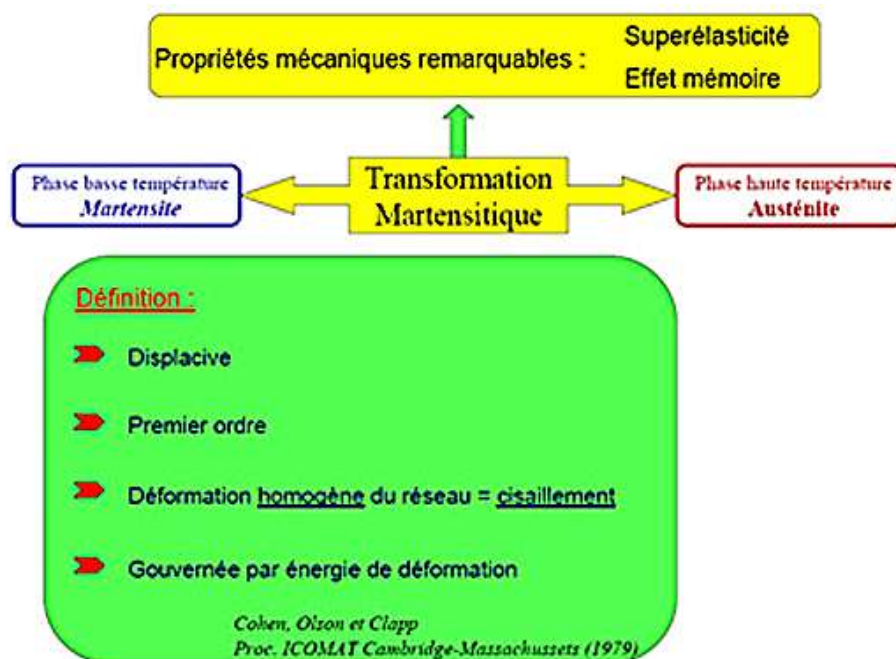
### 31) Historique et définition

Les alliages à mémoire de forme (AMF) constituent, comme leur nom l'indique, une famille de matériaux possédant des propriétés mécaniques tout à fait remarquables : mémoire de forme simple et double, et superélasticité. Cette mémoire de forme a été découverte en 1938 sur un alliage Au-Cd. Elle a été ensuite largement étudiée à partir de 1963 sur le système Ni-Ti (le Nitinol, alliage composé de nickel et de titane en proportion équiatomique).

Le comportement mécanique particulier de ces alliages est lié à l'existence d'une transformation de phases structurale, la transformation martensitique à caractère thermoélastique (l'élasticité du matériau dépend de la température) entre une phase haute température (l'austénite) et une phase basse température (la martensite).

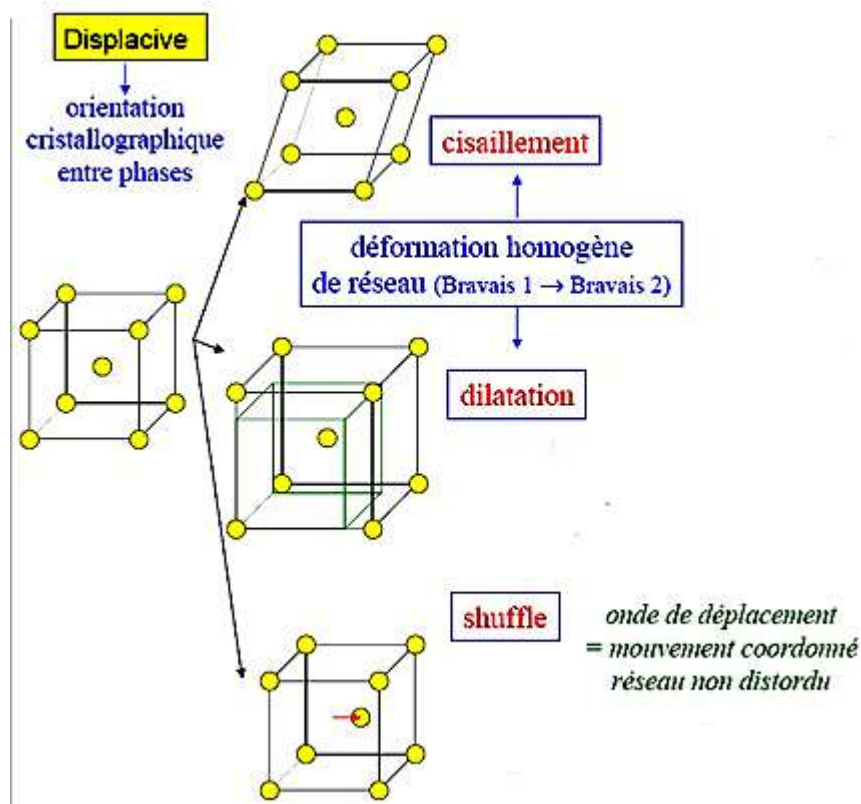
Historiquement, le terme de transformation martensitique décrit la transformation de l'austénite des aciers (alliage fer-carbone) en martensite lors d'une trempe (refroidissement brutal après chauffage). Par extension, ce terme a été généralisé pour un grand nombre d'alliages dont les transformations de phase possèdent certaines caractéristiques typiques de la transformation des aciers.

L'interprétation de ce comportement mécanique peut se résumer de la manière suivante :



Il existe deux grandes familles de transformation de phases : les transformations reconstructives et les transformations displacives. Les premières se font par rupture des liaisons chimiques. Les déplacements d'atomes se font par diffusion. De telles transformations sont donc thermiquement activées et ne peuvent se produire qu'à des températures relativement élevées : c'est le cas du fer que nous avons étudié précédemment. Dans la seconde catégorie, une nouvelle phase est produite lors d'une déformation des mailles du cristal, sans rupture des liaisons, par un déplacement coopératif des atomes, c'est-à-dire de manière coordonnée, sur de petites distances (inférieures à une distance interatomique). Ce mécanisme ne nécessite pas d'activation thermique, les transformations peuvent donc se produire à basses températures.

La transformation martensitique appartient à cette dernière catégorie. Elle est caractérisée par une déformation homogène du réseau cristallographique, constituée principalement par un cisaillement, c'est-à-dire que les forces appliquées sur les surfaces opposées, inférieure et supérieure, sont de même direction mais de sens contraires. Les cas de dilatation (la maille finale occupe un volume supérieur à la maille initiale) et de shuffle (une onde de déplacement parcourt le réseau en déformant ce dernier) ne seront pas examinés dans le cadre de ce travail.

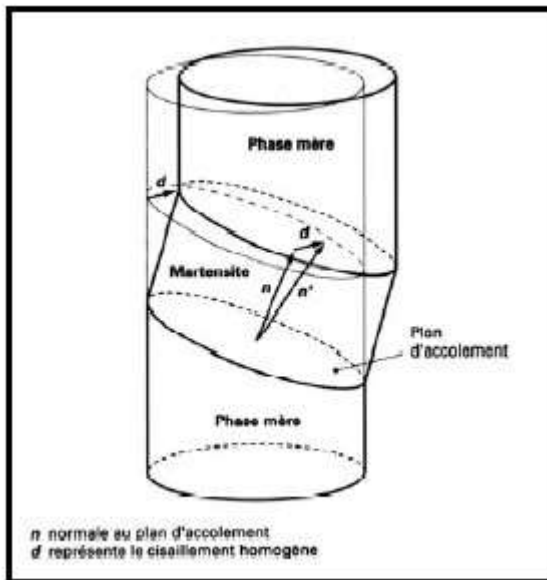


Lors d'une transformation martensitique, la maille élémentaire change donc de forme : la microstructure de la martensite est conditionnée par ce changement de forme et par une différence de volume qui existe entre elle et la phase austénitique. Il s'ensuit des contraintes internes lors de l'apparition de domaines martensitiques au sein de l'austénite. Le cisaillement peut s'appliquer de différentes façons à la maille de l'austénite et faire ainsi apparaître différents variants de martensite, c'est-à-dire des domaines d'apparition de la martensite ayant des orientations différentes et produisant au sein de l'austénite des déformations de même amplitude mais dans des directions différentes. En l'absence de contraintes externes, ces variants sont équiprobables et s'auto-compensent. Le matériau transformé conserve sa forme initiale. Dans les alliages à mémoire de forme, la formation de la martensite n'entraîne essentiellement que des déformations élastiques donc réversibles.

A température constante, dans le domaine biphasé (c'est-à-dire où coexistent deux phases, une phase étant caractérisée par sa composition chimique et son réseau cristallin), les interfaces martensite-austénite sont immobiles ; une modification de la température dans un sens ou dans l'autre fait déplacer ces interfaces au profit de l'une ou l'autre structure. Les interfaces peuvent aussi se mouvoir sous l'action d'une contrainte. Un objet peut donc être déformé non par glissement (mécanisme usuel de la déformation plastique, lié aux déplacements des dislocations) mais au moyen de la croissance et de la disparition des variantes de martensite.

La figure 1.2.a représente l'effet macroscopique produit par l'apparition d'une plaquette de martensite dans un cristal d'austénite. L'interface entre la martensite et l'austénite est appelé plan d'accolement ou d'habitat. Le changement de forme est dominé plutôt par un cisaillement (d), mais

un faible changement de volume ( $< 0,5\%$ ) peut exister pour certains alliages thermoélastiques. Ainsi, la transformation peut être décrite par un cisaillement homogène parallèle au plan d'habitat. Du point de vue cristallographique, la transformation entraîne un mouvement coopératif des atomes qui se propage de façon ordonnée à travers une interface, résultant dans le changement de forme. L'absence de diffusion dans ce genre de transformation établit une correspondance cristallographique entre les mailles des phases mère et martensitique. La figure 1.2.b montre schématiquement que le changement de forme est produit par déformation et réarrangement atomique dans la maille de l'austénite, avec l'existence d'un plan invariant (déformation plane invariante) appelé plan d'habitat.



Les caractéristiques principales de la transformation martensitique sont donc :

- un mouvement collectif d'atomes sur de très petites distances qui conduit à une déformation du réseau cristallin
- une faible variation de volume, mais cisaillement de la structure dans une direction déterminée
- les cristaux de martensite croissent en plaquettes

Les températures de transformation

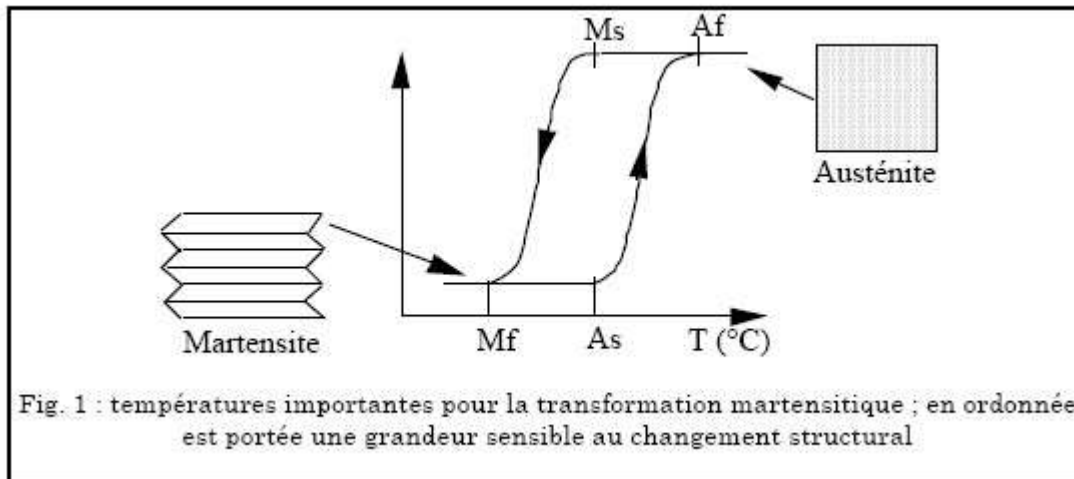
La transformation martensitique est caractérisée par quatre températures :

Ms : température au-dessous de laquelle la martensite apparaît (martensite start)

Mf : température au-dessous de laquelle tout [échantillon est transformé en martensite (martensite finish)

As : température au-dessus de laquelle l'austénite apparaît (austenite start)

Af : température au-dessus de laquelle tout l'échantillon est transformé en austénite (austenite finish)



La transformation débute au refroidissement à la température  $M_s$ . Cette transformation est complète à la température  $M_f$ . Entre ces deux températures, il y a coexistence des deux phases (caractéristique d'une transformation du 1er ordre). Si le refroidissement est interrompu, il n'évolue plus dans la plupart des cas. On montre ainsi qu'elle est théoriquement indépendante du temps.

Au retour, à température croissante, la transformation inverse débute à la température  $A_s$ , et se termine à  $A_f$  qui est plus élevée que  $M_s$ . Si l'on trace la fraction volumique de matériau transformé en fonction de la température, on observe un hystérésis. Ceci est dû à la présence d'une énergie irréversible, correspondant à une dissipation d'énergie mécanique transformée en chaleur (Fig. 1). Ces températures de transformation sont très sensibles à la composition chimique de l'alliage ainsi qu'à son histoire thermo-mécanique.

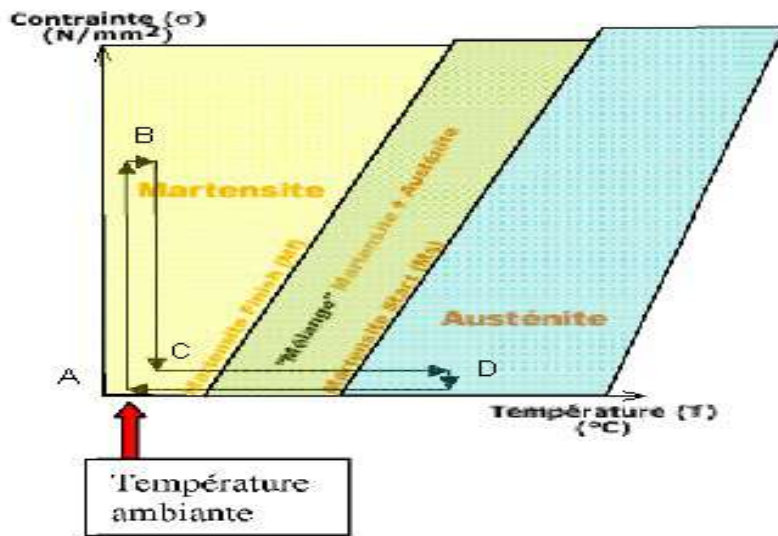
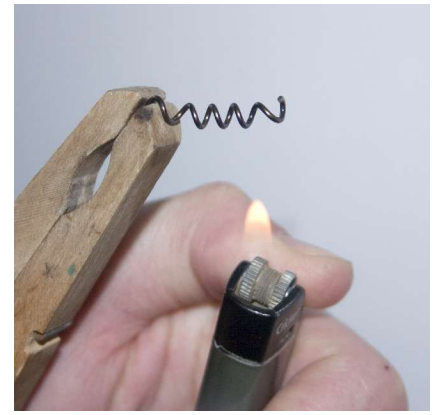
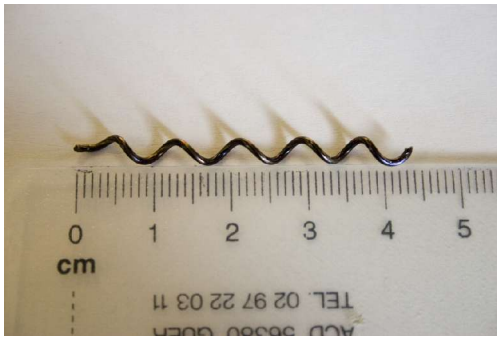
### 32) L'effet mémoire de forme

Définition : c'est le recouvrement de forme d'un objet au chauffage après déformation en phase basse température.

Un matériau initialement austénitique possède une forme donnée. Refroidi à une température inférieure à  $M_f$ , il devient totalement martensitique et sa forme macroscopique est inchangée. Si on lui applique une contrainte suffisante à l'état martensitique, il prend une autre forme en privilégiant les variantes de martensite dont la déformation associée réalise le changement de forme, au détriment des autres. Il conserve cette forme basse température après cessation de la contrainte puisque la martensite est stable à cette température. Si l'alliage est réchauffé au-dessus de  $A_f$ , on assiste à un retour à l'état austénitique et le matériau reprend sa forme initiale (toutes les variantes redonnent la même austénite) Dans un échantillon polycristallin, le pourcentage de déformation « plastique » au delà duquel on ne peut plus retrouver la forme initiale est de l'ordre de 8% pour les Ni-Ti.

Expérience n°1 :

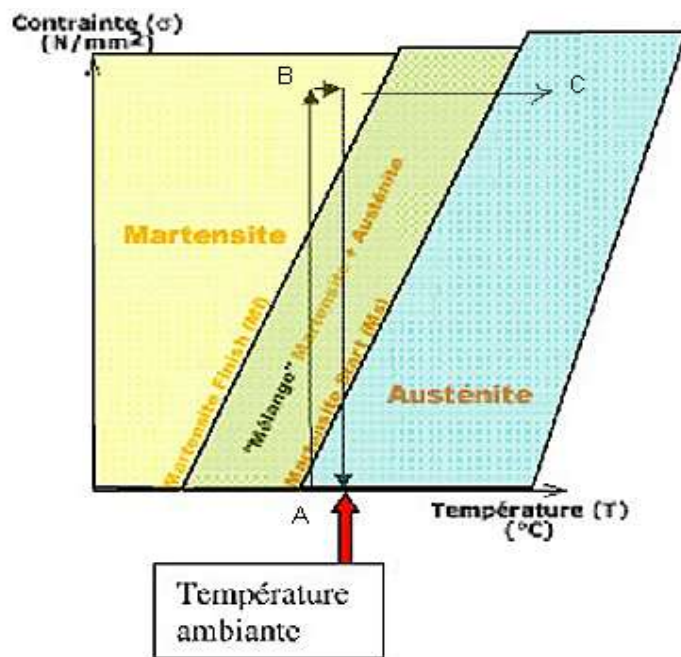
Pour visualiser cette propriété, il suffit par exemple d'appliquer une contrainte sur l'alliage sous sa forme martensitique (point A), à température ambiante, afin de le déformer (point B). Puis, on relâche la contrainte. (point C) On le chauffe ensuite pour provoquer sa transformation en austénite : les cristaux se réorganisent et la déformation qu'on avait provoqué précédemment disparaît (point D). On laisse l'alliage se refroidir : ce dernier, ayant repris sa forme initiale, se transforme à nouveau en martensite (point A). **photo**



### 33) L'effet superélastique

La transformation martensitique thermoélastique peut être induite par une variation de température ou par application d'une contrainte externe. Dans le premier cas, la phase martensitique devient stable avec la diminution de température ( $T < M_f$ ). Dans le second cas, la transformation a lieu à températures supérieures  $A_f$ , dans l'intervalle de température où la phase austénitique est stable. La contrainte provoque une augmentation des températures de transformation critiques. Ceci s'explique par la caractéristique de la transformation qui est accompagnée d'un cisaillement macroscopique. L'énergie d'origine mécanique fournie au matériau (travail de la contrainte lors de la déformation de la maille) permet de compenser l'instabilité chimique de la martensite à cette température. L'orientation de la contrainte est discriminante et ne favorise que certains variants de martensite d'où une déformation à l'échelle macroscopique.

Pour visualiser ceci, on peut par exemple:  
-déformer l'alliage (on passe de A à B)



- relacher la contrainte (on passe de B à A).

ou alors :

- déformer l'alliage (on passe de A à B)

- chauffer : on passe de B à C: la contrainte n'étant pas relâchée, le matériau exerce, durant sa transformation en austénite, une force pour la vaincre.

### 34) Conclusion

Suite à une observation troublante concernant les propriétés mécaniques totalement différentes de deux alliages, l'acier et le nitinol, nous avons essayé de comprendre l'origine de ces comportements en examinant leur structure à l'échelle microscopique.

Nous en avons constaté alors que, bien qu'il soit question pour les deux alliages de transitions de phases, ces dernières ne s'effectuaient pas de la même manière, l'une étant qualifiée de « displacive » et l'autre de « reconstructive », se produisant d'ailleurs à des températures différant d'un facteur 10.

### 4) Application à la robotique humanoïde dans le cas de l'articulation d'une phalange de prothèse de main bionique.

Les propriétés remarquables des alliages à mémoire de forme ont suscité de nombreuses recherches appliquées, dans le domaine industriel et également en robotique humanoïde, c'est-à-dire dans la reproduction du comportement humain par les robots.

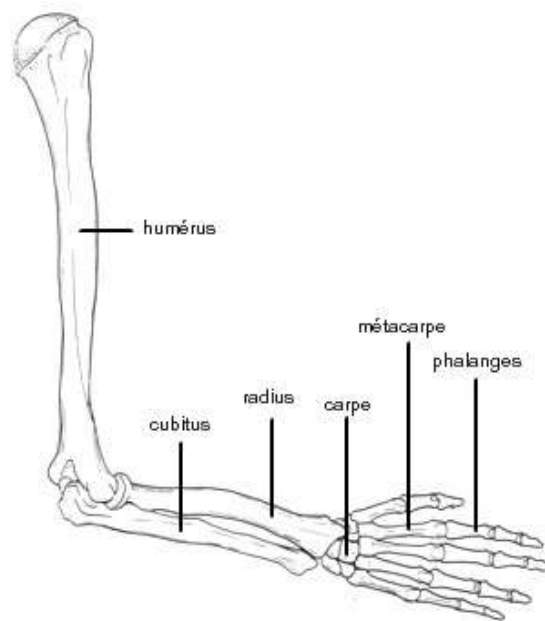
Ce domaine de recherche est très actif et le but ultime de bon nombre de chercheurs est de permettre aux personnes ayant perdu un ou plusieurs membres (bras ou jambes) de reprendre une activité "normale" : de remarquer ou de saisir les objets, gestes d'une banale simplicité pour la plupart d'entre nous mais qui sont désormais interdits pour des personnes handicapées.

Nous nous sommes intéressés à la main artificielle, et plus précisément au problème lié aux articulations : comment faire plier un doigt d'une main artificielle?

Avant de pouvoir proposer une solution à ce problème, nous avons recueilli des informations sur le fonctionnement d'une main humaine.

#### 41) La Main

##### 411) Structure osseuse de la main et du bras.



##### 412) Les Phalanges



On compte 14 phalanges distribuées de la façon suivante: 5 phalanges proximales (P1), 4 phalanges moyennes (P2) pour les quatre derniers doigts et 5 phalanges distales (P3, mais P2 pour le pouce). Leur taille décroît progressivement des phalanges proximales vers les distales. Tout comme les métacarpes, ces os longs possèdent chacun une base, un corps et une tête.

## 42) Application à la robotique

### a) Analyse du problème

Nous avons étudié le problème relatif à l'articulation entre les première et la deuxième phalanges de l'index.

Les contraintes imposées sont donc les suivantes :

1- la flexion de la phalange peut atteindre un angle de  $45^\circ$

2- L'extension ne doit pas aller au-delà d'un angle plat.

3- Le mouvement ne doit se faire que selon un seul degré de liberté : la rotation autour de l'axe de l'articulation. On doit interdire tous les mouvements de translation latéraux ainsi que les autres degrés de liberté de rotation.

Par ailleurs, le mouvement doit être provoqué par un courant de faible intensité, compatible avec une boîte de commande électronique.

Cette dernière condition nous a fait penser à la transition martensite-austénite provoquée par une élévation de température. En effet, puisque l'alliage à mémoire de forme est métallique, il s'échauffe lorsqu'il est traversé par un courant électrique (effet Joule) et donc sa température peut passer au-delà de sa température critique et se contracter. Cette propriété peut être mise à profit pour faire plier les phalanges de notre main artificielle.

Ce faisant, les problèmes qui surgissent sont les suivants :

1- la contraction de l'échantillon d'alliage à mémoire de forme se fait sans contrainte au niveau de l'angle de flexion. Nous serons donc obligés d'imposer un angle maximal pour cette flexion par une butée mécanique.

2- Le refroidissement étant lent, le doigt plié ne reviendra que lentement dans sa position initiale, ce qui est gênant. Il faudra donc installer un système de rappel des phalanges. Cela peut se faire en attachant un ressort aux deux phalanges sur les parties externes des doigts, exerçant une force de rappel constante mais inactive lorsque le dispositif en alliage à mémoire de forme est activé.

3- Pour limiter l'extension des phalanges, on imposera également une butée. Cela peut être fait par exemple à l'aide d'une charnière possédant un système de blocage.

Nous constatons que le principe du mouvement d'un doigt à l'aide d'un alliage à mémoire de forme est relativement simple. Ce qui l'est moins, c'est la recherche des paramètres idéaux permettant effectivement à ce système décrit de fonctionner correctement.

### b) Manipulations

L'étape suivante de notre travail a été de trouver les ordres de grandeur de la force exercée par les phalanges lorsque le doigt se plie.

Pour cela, nous avons mesuré les forces exercées par le doigt sur un dynamomètre et trouvé les résultats suivants :

- flexion :  $F = 0,35\text{N}$

- extension :  $F = 0,25\text{N}$

Le ressort de rappel concernant l'extension devra donc exercer une force dont la valeur est de  $0,25\text{N}$ .

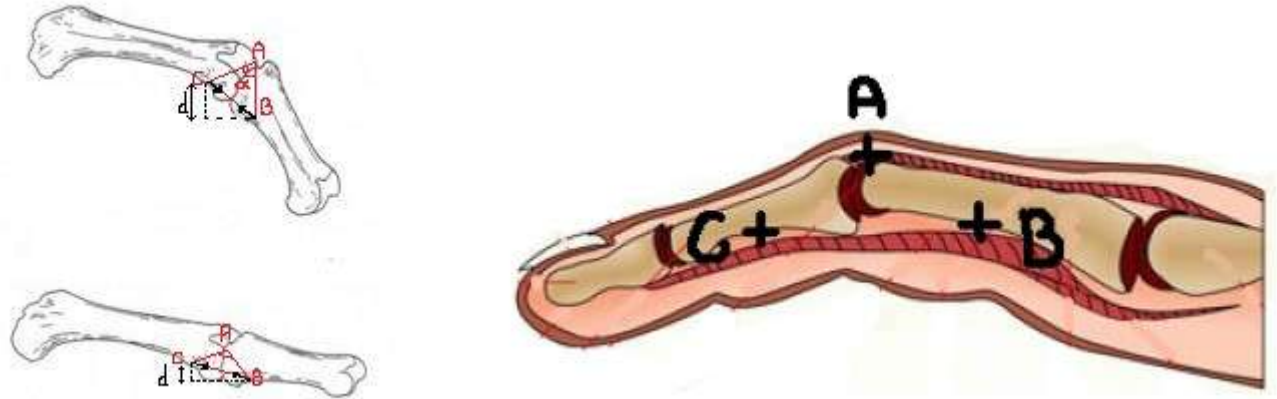
On mesure la distance entre deux points situés de part et d'autre de l'articulation (surface externe du doigt) lorsque le doigt est tendu et lorsqu'il est plié, on trouve :

- longueur pour le doigt tendu : 3,2 cm
  - longueur pour le doigt fléchi : 4,3 cm
- Soit une variation de longueur de  $x = 1,1\text{cm}$ .

La relation entre la variation de longueur du ressort et la force exercée étant la suivante :  $F = k.x$ , on en déduit la constante de raideur du ressort :  $k = F/x$ , soit :  $k = 31,8\text{ N/m}$

En prenant les mesures sur les parties latérales du doigt lorsqu'il se plie, on trouve :

- lorsque le doigt est tendu :  $BC = 2,2\text{ cm}$
- lorsque le doigt est plié :  $BC = 1,7\text{ cm}$



Il faut donc que le fil en nitinol se contracte de 0,5 cm, soit de 23% environ de sa longueur initiale, au cours de sa transition de phase (élévation de la température par effet Joule, faisant passer cette dernière à une valeur supérieure ou égale à la température critique de  $65^\circ\text{C}$ ).

Admettons qu'on utilise un fil en nitinol de  $L = 2,2\text{ cm}$  de longueur. Il faut déterminer sa section  $S$ . Pour simplifier, nous admettons que la contraction n'a lieu que pendant la transition de phase et que les dilatations thermiques sont négligeables.

Si l'échantillon de nitinol est à  $20^\circ\text{C}$  initialement, on doit augmenter sa température de  $45^\circ\text{C}$ , ce qui correspond à une quantité d'énergie de  $Q = m.c. \Delta T$

on a :  $m = d \cdot SL$

et  $W = R \cdot I^2 \cdot t$  l'énergie dissipée par effet Joule.

avec  $R = \rho \cdot L/S$

Soit :  $Q = dSL.c. \Delta T = \rho \cdot L \cdot I^2 \cdot t/S$

ou encore :  $S^2 = \rho \cdot L \cdot I^2 \cdot t / (dL.c. \Delta T)$

$S = (\rho \cdot I^2 \cdot t / (d.c. \Delta T))^{1/2}$

Données relatives au nitinol:

résistivité électrique :  $\rho$  entre  $76 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$  et  $82 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$

température critique :  $T_c = 65^\circ\text{C}$

conductivité thermique :  $\lambda = 18 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

masse volumique  $d = 6.45 \text{ to } 6.5 \text{ g/cm}^3$

Dilatation thermique  $D = 6.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  (martensite),  $11 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$  (austénite)

Si on impose les valeurs suivantes :

$t = 0,5\text{ s}$

$I = 10\text{ mA}$

et sachant que :

$c = 0,20 \text{ cal } \text{mg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C} = 0,20 \cdot 4,18 \cdot 10^6 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

$$c = 8,36 \cdot 10^5 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$d = 6,5 \text{ g/cm}^3 = 6,5 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho = 7,6 \cdot 10^{-8} \text{ } \Omega \cdot \text{m}$$

on obtient :  $S = 0,39 \text{ mm}^2$  , ce qui correspond à un fil de rayon  $r = \sqrt{S/\pi}$  , soit  $r = 0,35 \text{ mm}$ .

Cette valeur correspond au rayon du fil en nitinol de longueur 2,2cm dans lequel on fait passer un courant d'intensité 10 mA, pour une température initiale de 20°C, afin de provoquer la transition de phase à 65 °C.

Bien évidemment, ce calcul ne donne pas la variation de longueur au cours de la transition de phase. Pour être sûrs d'avoir la bonne variation de longueur, il faudrait utiliser non pas un échantillon linéaire de nitinol mais un ressort et lui donner les longueurs adéquates dans chacune des deux phases martensitique et austénitique...ce qui devient très compliqué!

### En résumé :

Lorsque les phalanges du doigts sont pliées, nous avons constaté que le nitinol mettait un temps assez long pour reprendre sa forme initiale, et ainsi permettre aux doigt de se retrouver tendu.

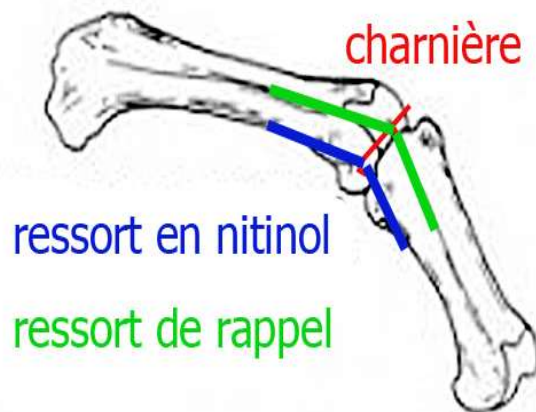
Voulant faire un doigt fonctionnel, nous avons du diminuer le temps d'extension du doigt.

La solution que nous avons choisi est la suivante :

- Nous envisageons de positionner deux ressorts en nitinol sur les faces latérales de l'articulation pour initier le mouvement de flexion des phalanges. La position exacte des points d'attache pourrait être calculée en fonction de la valeur du moment des forces exercées par le ressort en nitinol sur les phalanges.
- Un ressort en métal serait placé sur la face extérieure du doigt, afin de redresser le doigt plié lorsque le nitinol se refroidit (arrêt de la circulation du courant électrique). Le ressort de rappel déforme de manière permanente ces ressorts en nitinol mais leur permet également de se contracter au cours du chauffage.
- La charnière permet de restreindre le mouvement à un seul degré de liberté de rotation et de limiter l'extension à 180°.

Le montage ainsi fait, nous obtenons un doigt qui peut se plier et se déplier suffisamment vite pour être fonctionnel :

schéma de principe



## **5) Conclusion**

Dans le travail décrit tout au long de ce rapport, nous nous sommes attachés à expliquer comment les alliages à mémoire de forme pouvaient posséder les propriétés mécaniques remarquables suivantes : mémoire de forme et superélasticité. En nous plongeant dans l'univers de l'infiniment petit et la cristallographie, nous avons compris comment les structures moléculaires des métaux induisaient des propriétés mécaniques se manifestant à l'échelle macroscopique.

Enfin nous avons appliqué ces nouvelles connaissances à la résolution d'un problème appartenant au domaine de la robotique humanoïde : l'élaboration d'une articulation de phalanges d'une main artificielle. Le problème étudié est loin d'être marginal car il est en fait véritablement étudié dans certains laboratoires de recherche en robotique, mais sa complexité est telle que nous n'avons pu qu'approcher, à l'aide de nos connaissances actuelles de lycéens, la solution. Néanmoins, la richesse de ce thème et son étude partielle nous a apporté de nombreuses satisfactions, la première étant d'avoir été en contact avec des chercheurs passionnés et passionnants...

## **annexe 1 : Sommaire**

### **1) Introduction**

### **2) Généralités sur la structure des métaux**

#### **21- modèle**

- a) le modèle des sphères dures
- b) modèle du gaz d'électrons

#### **22- définitions cristallographiques et cristal idéal**

- a) le réseau cristallin
- b) Liaison métallique
- c) Notion de grain
- d) Notion de phase

### **3) Cas du nitinol**

31) Historique et définitions

32) L'effet mémoire de forme

Définition

Expérience n°1

33) L'effet superélastique

Définition

Expérience n°2

### **4- Application à la robotique humanoïde**

41) La main

42) Application à la robotique

- a) Analyse du problème
- b) Manipulations

### **5- Conclusion**

## **annexe 2 : bibliographie**

- 1) article : Ecole d'été « Microscopie des défauts cristallins » Ile d'Oléron 7-18 Mai 2001 - « Les alliages à mémoire de forme » écrit par Ph. Vermaut et R. Portier
- 2) article : « une introduction aux alliages à mémoire de forme – éducation et mémoire double » écrit par Richard Portier.
- 3) Diaporamas sur les alliages à mémoire de forme, créés par Ph. Vermaut et R. Portier
- 4) « Petit cours sur les AMF » écrit par Nimésis
- 5) « mode d'emploi des AMF » écrit par Nimésis
- 6) cours sur la métallurgie écrit par céfracor
- 7) « les aciers et alliages métalliques » diaporama de l'ENSAM maitre éco-conception
- 8) « la métallurgie générale» ouvrage écrit par Bénard, Michel, Philibert, Talbot
- 9) schémas prélevé sur « wikipédia » (internet)
- 10) <http://manus.crchul.ulaval.ca/>
- 11) le livre "anatomie du mouvement" de Blandine Calais-Germain
- 12) valeurs relatives au nitinol  
<http://209.85.129.132/search?q=cache:AVeuQM76v5QJ:paslu.phys.polymtl.ca/others/results/memoire.pdf+chaleur+massique+nitinol&hl=fr&ct=clnk&cd=6&gl=fr>
- 13) <http://www.nimésis.com>
- 14)  
<http://209.85.129.132/search?q=cache:AVeuQM76v5QJ:paslu.phys.polymtl.ca/others/results/memoire.pdf+chaleur+massique+nitinol&hl=fr&ct=clnk&cd=6&gl=fr>

## **annexe 3 : les partenaires**

- 1) Dr Fethi BEN OUEZDOU  
Université de Versailles St Quentin, LIS Versailles  
Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes de Versailles  
10, 12 Avenue de l'Europe, F 78140 Vélizy, France  
conseiller scientifique concernant la robotique
- 2) Philippe Vermaut, maître de conférence au laboratoire de physico-chimie des surfaces, école nationale supérieure de chimie de Paris  
conseiller scientifique concernant les alliages à mémoire de forme
- 3) Alain BESSON, kinésithérapeute, villa les ormeaux, avenue de verdun; 05200 Embrun  
conseiller technique (mouvement de la main)