

8ème journée de l'institut FARMAN

Identification par rayons X des fractions de
variantes
dans les alliages à mémoire de forme
magnétiques

IDEFIX

Olivier HUBERT, Frédéric MAZALEYRAT

Mame DARO FALL, Karine LAVERNHE, Martino LO-BUE, Alexandre PASKO

SATIE

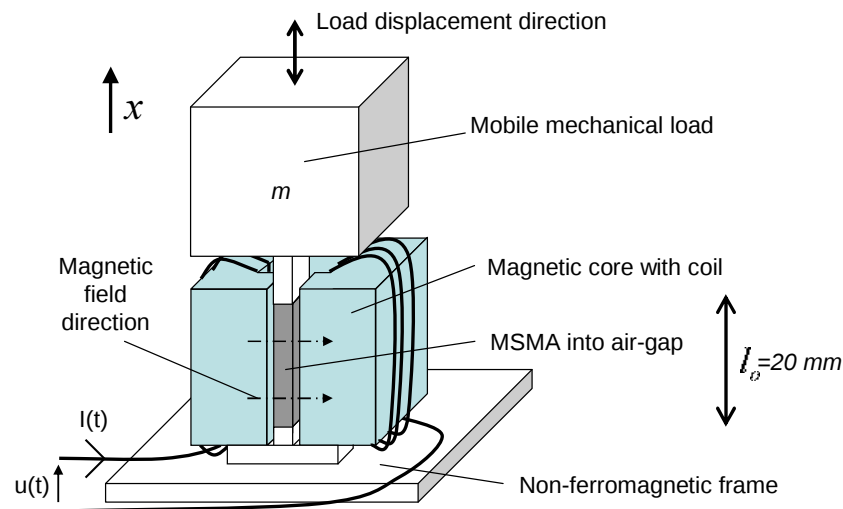
LOT
CACHAN



Projet IDEFIX

Contexte

- Alliages à Mémoire de Forme Magnétiques
- Grande déformation réversible (6%/10%)
- Chargement magnétique
- Chargement mécanique
- Chargement thermique



Projet IDEFIX

Contexte - Objectifs

➤ Problématiques scientifiques

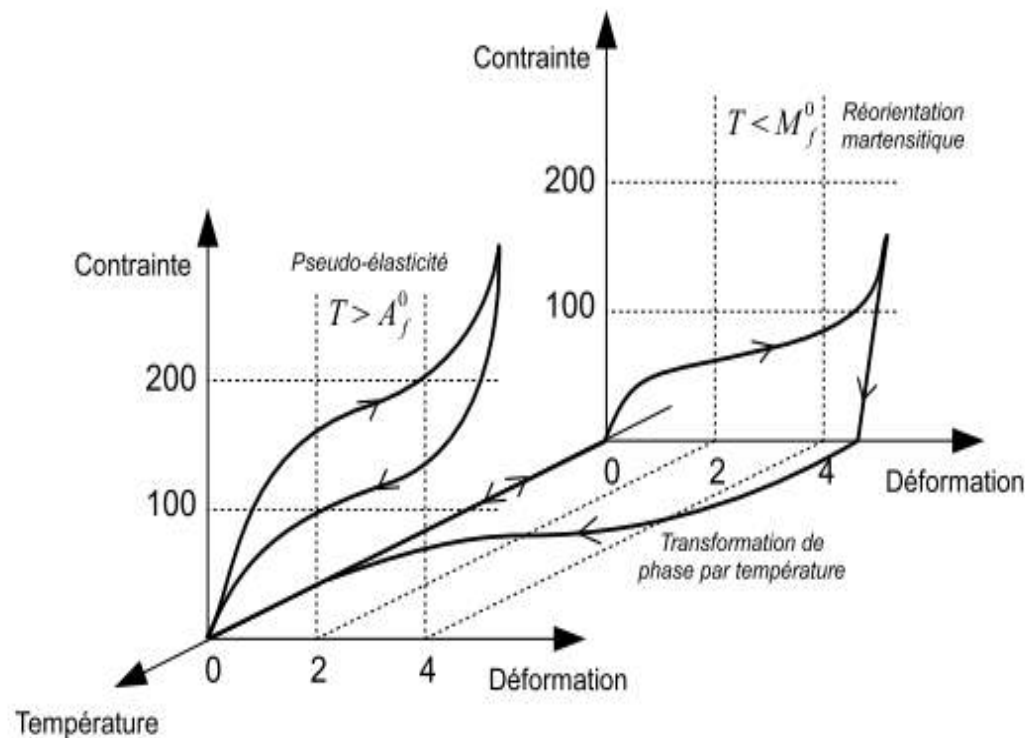
- ☐ Optimisation pour applications complexes
- ☐ Comportement sous chargement multiaxial
- ☐ Irréversibilités lors des grandes déformations
- ☐ Milieux multi champs
- ☐ Modélisation multiaxiale multiéchelle multiphasée

- Caractérisation expérimentale des mécanismes de transformation de phase des alliages à mémoire de forme magnétiques sous sollicitations simples par la mesure in situ (de l'évolution) des fractions de phase par DRX
- Développement d'un modèle multiéchelle couplé chemo-magnéto-mécanique



Projet IDEFIX

Principes – Alliages à Mémoire de Forme



Propriétés:

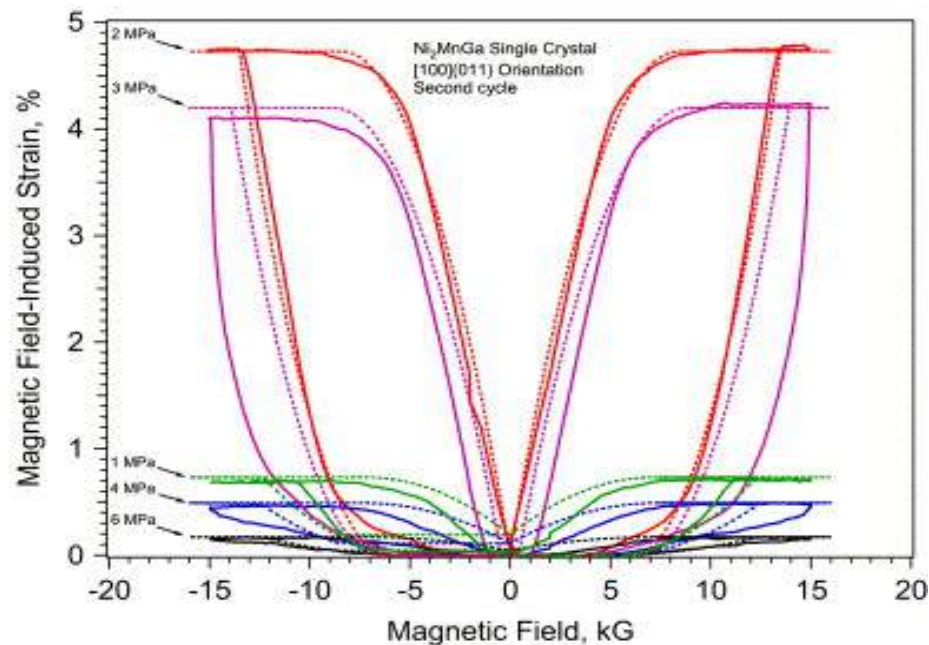
- Pseudoélasticité (haute température)
- Déformation résiduelle (basse température)
- Effet mémoire de forme



Projet IDEFIX

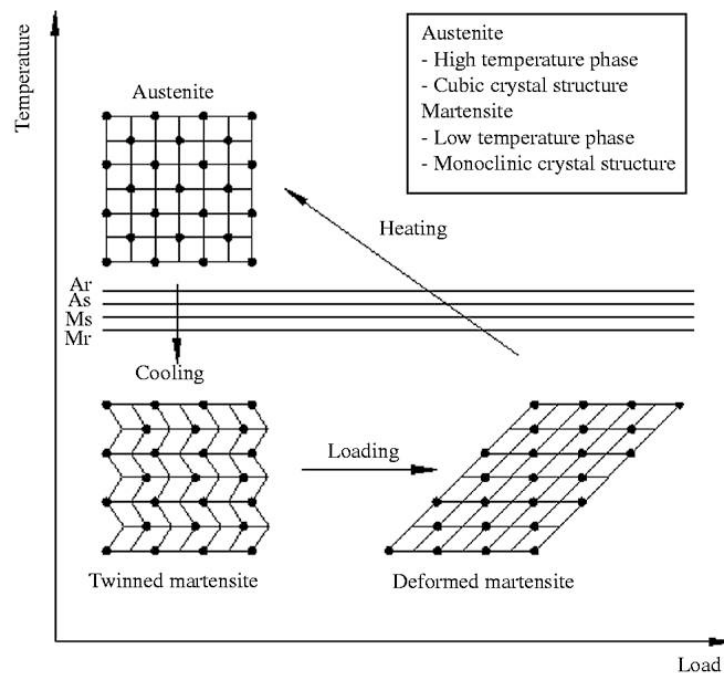
Principes – Alliages à Mémoire de Forme

Couplage ferromagnétique
Déformation de magnétostriction



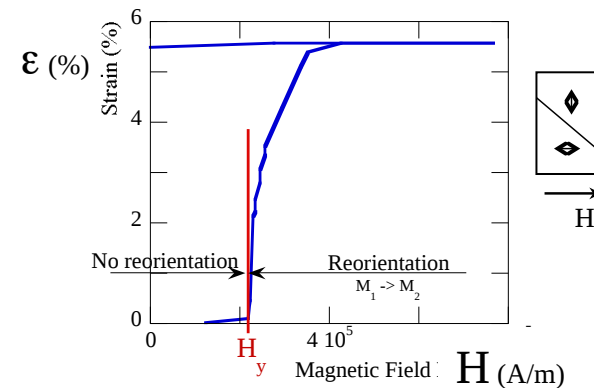
Projet IDEFIX

Principes – Transformation de phases



Notes: A_f – Austenite finish temperature; A_s – austenite start temperature;
 M_s – martensite start temperature; M_f – martensite finish temperature

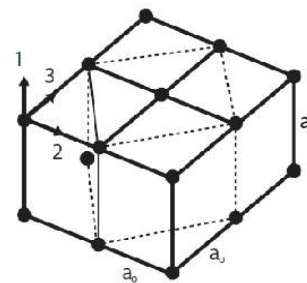
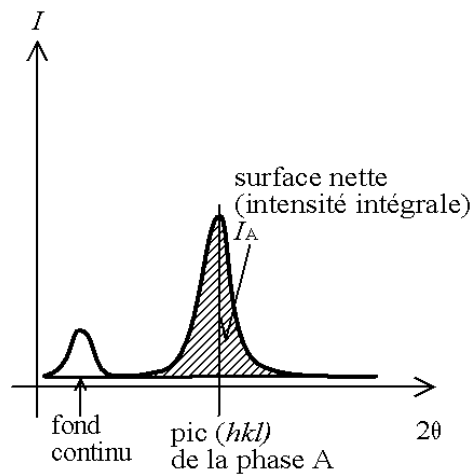
- Chargement thermique
- Chargement magnétique
- Chargement mécanique



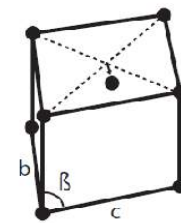
Projet IDEFIX

Principes – Transformation de phases

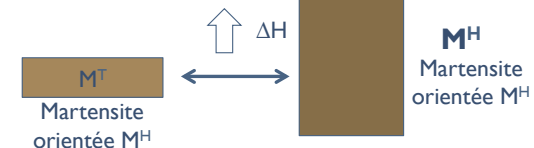
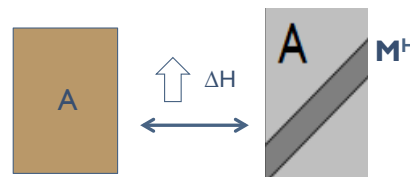
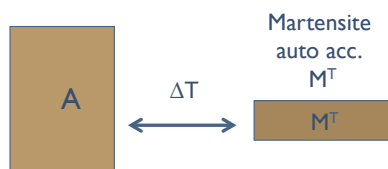
➤ Suivi par diffraction des Rayons X



Austénite
Maille cubique centrée



Martensite
M5 / M7

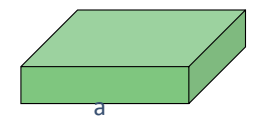
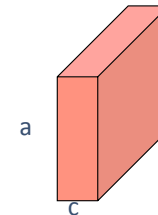
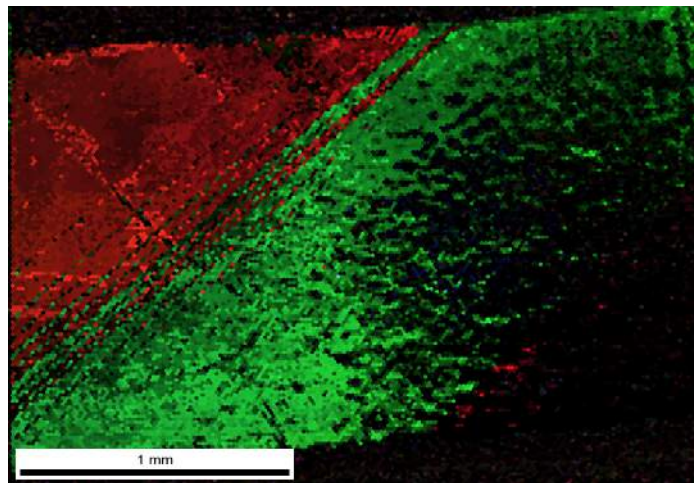


Projet IDEFIX

Matériau

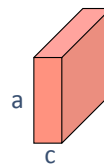
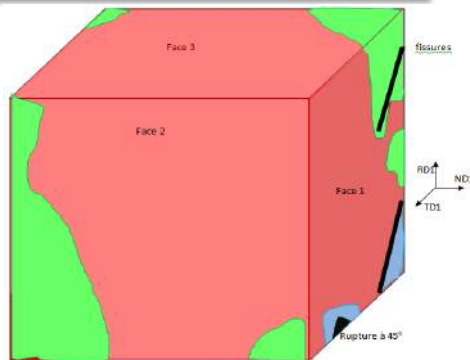
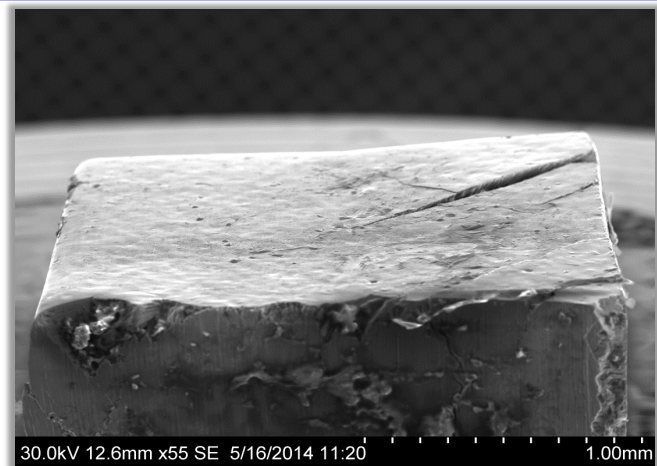
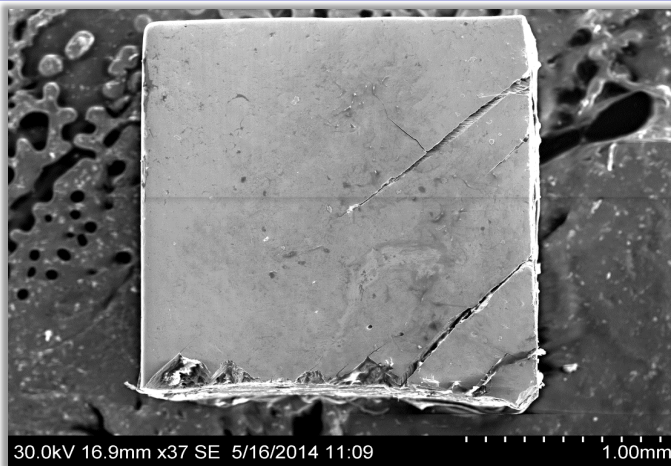
Ni₂MnGa

- Monocristal {100}<001> (Goodfellow)
- Polycristaux (EEL - Univ. São Paulo)
- Polycristal fabriqué par assemblage de poudres
- Identification EBSD
- Mesures VSM
- Mesures DSC

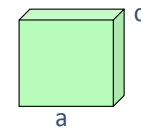


Projet IDEFIX

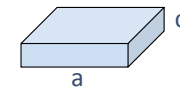
Matériau



Variante I



Variante II

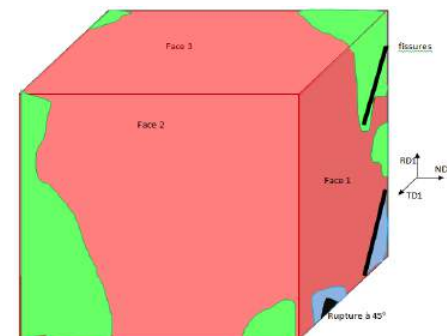
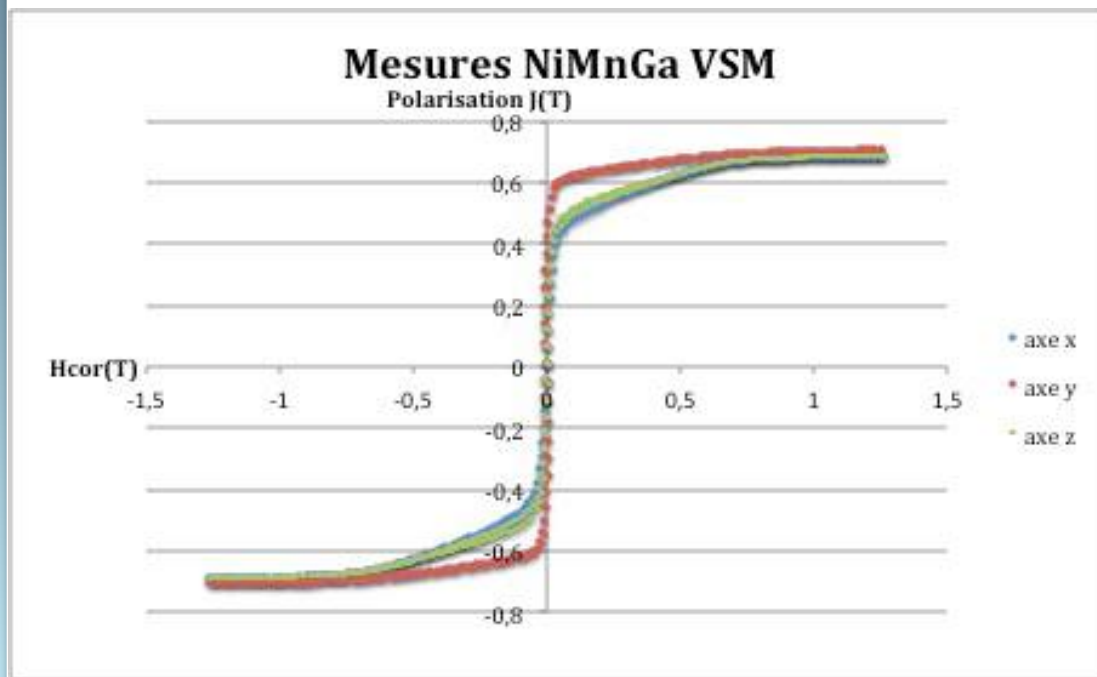


Variante III



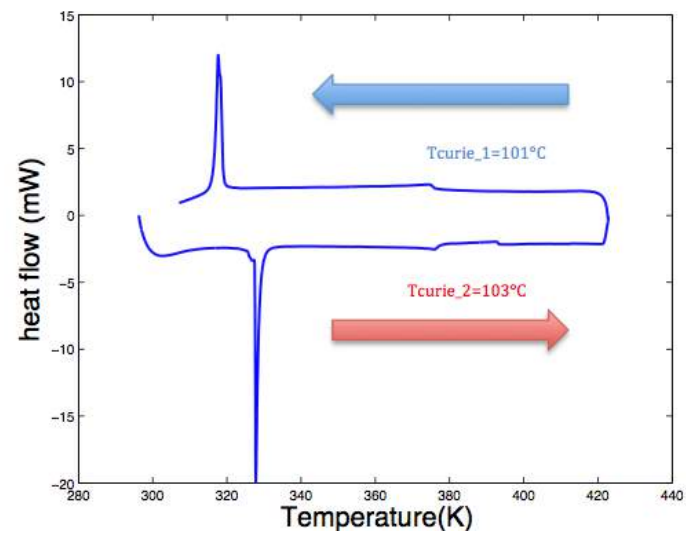
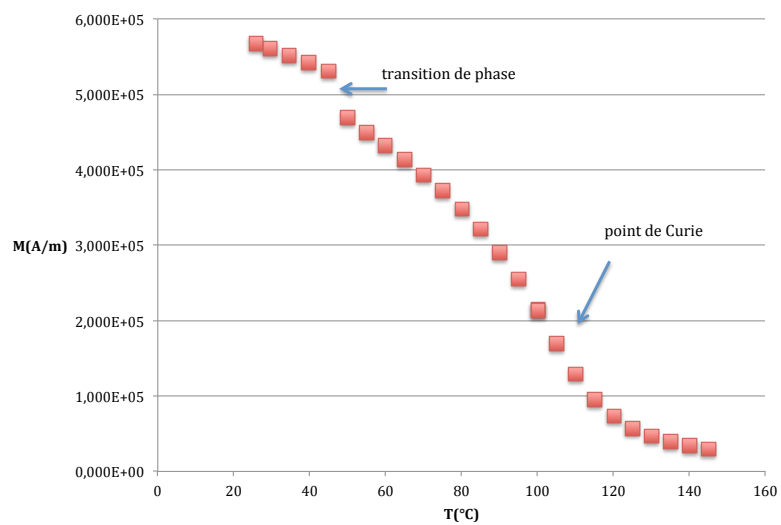
Projet IDEFIX

Matériau



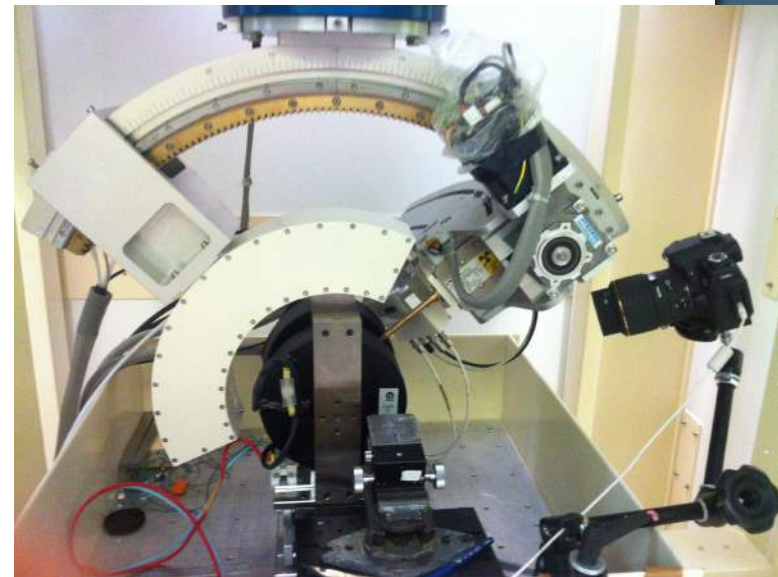
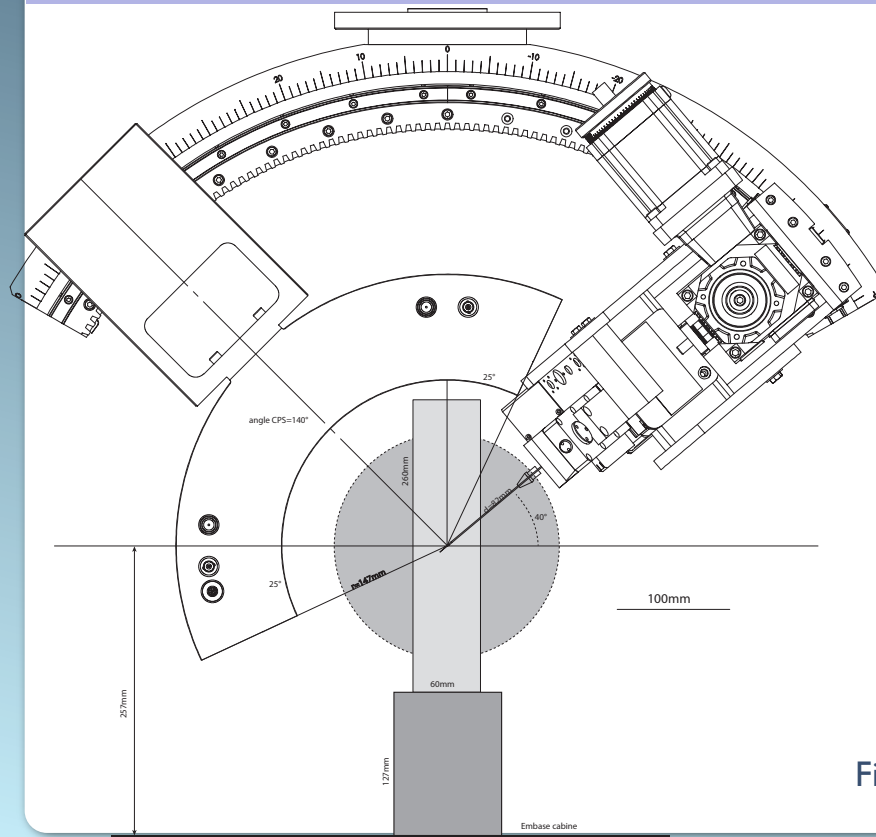
Projet IDEFIX

Matériau



Projet IDEFIX

DRX sous champ magnétique

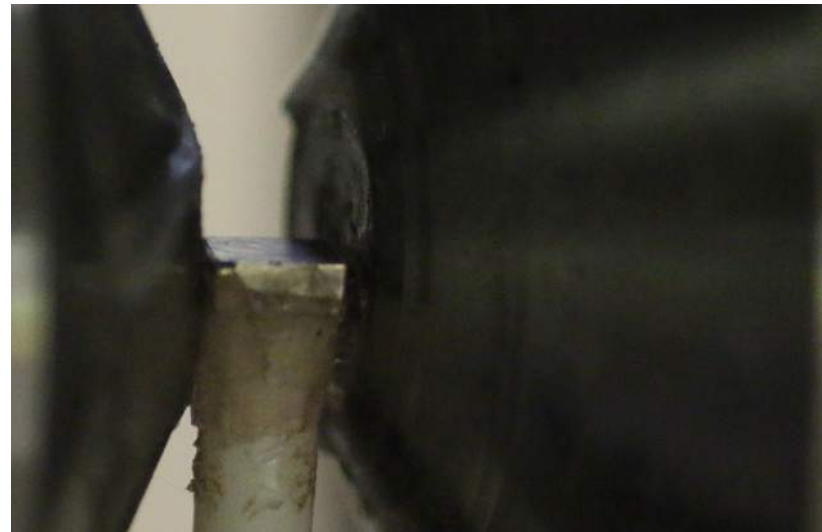


Financement FARMAN - 2013



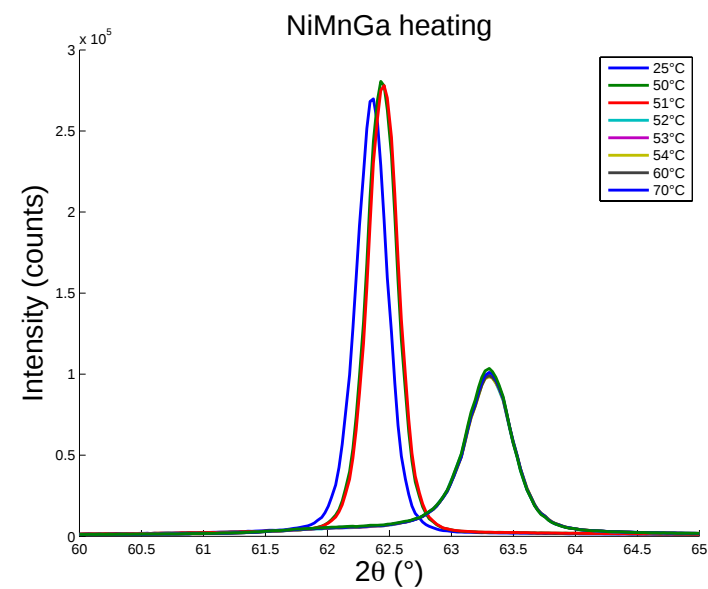
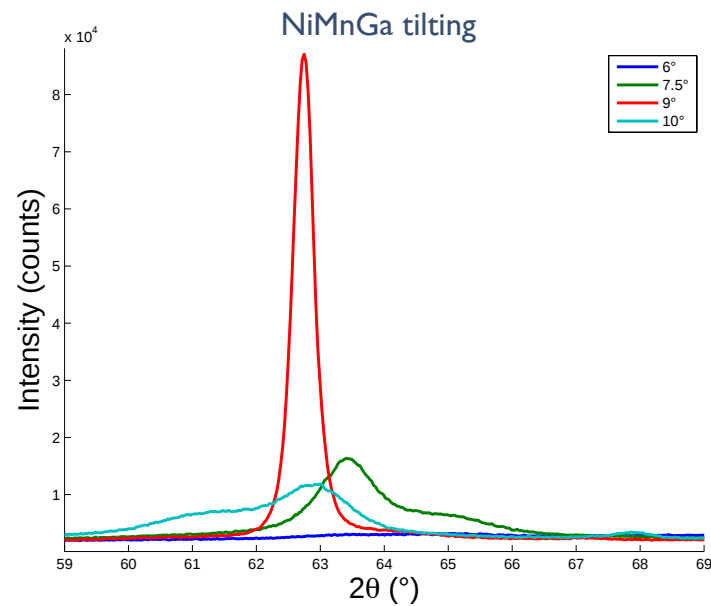
Projet IDEFIX

DRX sous champ magnétique



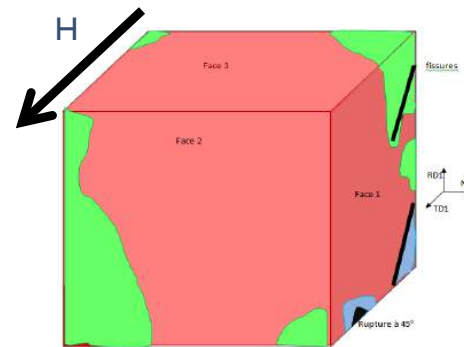
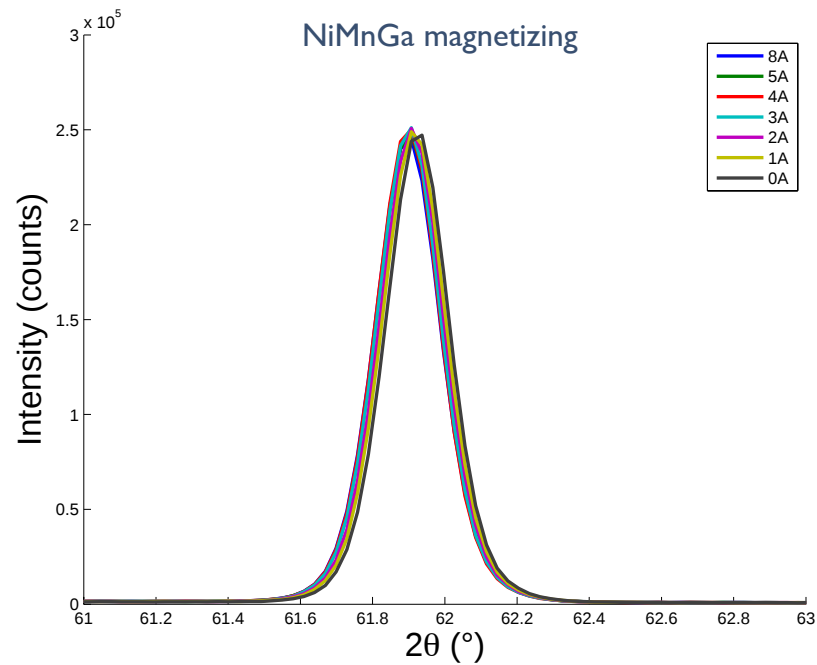
Projet IDEFIX

Résultats expérimentaux



Projet IDEFIX

Résultats expérimentaux



Projet IDEFIX

Modélisation

➤ Modélisation multiéchelle

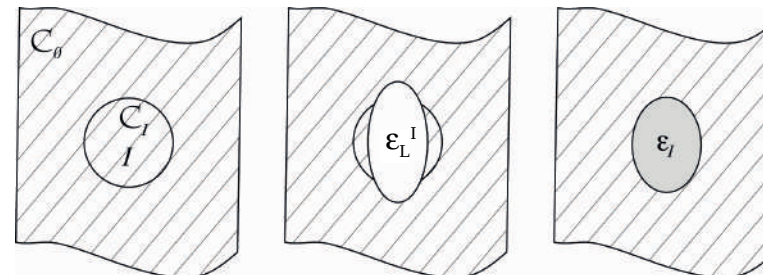
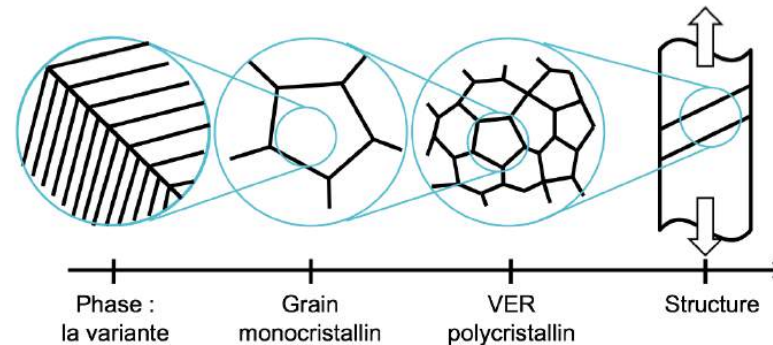
Hypothèses de modélisation

- ❖ Échanges thermiques non modélisés
- ❖ Interfaces non modélisées
- ❖ Minimisation énergie libre
- ❖ Homogénéisation (champ moyen)

Déformation libre et contrainte associée

$$\epsilon_L^\alpha(T, \vec{R}, \vec{E}, \{\alpha, \gamma\}, \dots)$$

$$\epsilon_I = \mathbb{S}^E \epsilon_L^\alpha$$



Projet IDEFIX

Modélisation

➤ Modélisation multiéchelle

Localisation domaine $\Leftrightarrow$ grain / grain $\Leftrightarrow$ VER

$$\boldsymbol{\sigma}^\alpha = \boldsymbol{\sigma}^g + \mathbb{C}^\alpha (\mathbb{I} - \mathbb{S}_E) (\boldsymbol{\epsilon}_L^g - \boldsymbol{\epsilon}_L^\alpha)$$

$$\mathbb{W}_H^\alpha = -\mu_0 \vec{H}^\alpha \cdot \vec{M}^\alpha \quad \text{avec} \quad \vec{M}^\alpha = M_s \gamma_i \cdot \vec{e}_i$$

$$\mathbb{W}_\sigma^\alpha = \frac{1}{2} \boldsymbol{\sigma}^\alpha : \mathbb{C}^{\alpha-1} : \boldsymbol{\sigma}^\alpha = -\boldsymbol{\sigma}^g : \boldsymbol{\epsilon}_{tr}^\alpha + \frac{1}{2} \boldsymbol{\epsilon}_{tr}^\alpha : \mathbb{C}_{acc} : \boldsymbol{\epsilon}_{tr}^\alpha - \boldsymbol{\epsilon}_{tr}^g : \mathbb{C}_{acc} : \boldsymbol{\epsilon}_{tr}^\alpha$$

$$\mathbb{W}_T^\alpha = h_\alpha - T s_\alpha$$

$$\mathbb{W}_K^\alpha = K_1 (\gamma_1^2 \gamma_2^2 + \gamma_2^2 \gamma_3^2 + \gamma_3^2 \gamma_1^2) + K_2 (\gamma_1^2 \gamma_2^2 \gamma_3^2)$$

Principe de probabilité de présence associé à l'état énergétique $\Rightarrow$ Sommerfeld, Boltzmann



Projet IDEFIX

Modélisation

➤ Modélisation multiéchelle

Déformations libres

$$\varepsilon_{\Phi}^{tr} \simeq \frac{1}{2}(U_{\Phi}^T U_{\Phi} - I) \quad \epsilon_A^{\mu} = \frac{3}{2} \begin{pmatrix} \lambda_{100}(\gamma_1^2 - \frac{1}{3}) & \lambda_{111}\gamma_1\gamma_2 & \lambda_{111}\gamma_1\gamma_3 \\ \lambda_{111}\gamma_1\gamma_2 & \lambda_{100}(\gamma_2^2 - \frac{1}{3}) & \lambda_{111}\gamma_2\gamma_3 \\ \lambda_{111}\gamma_1\gamma_3 & \lambda_{111}\gamma_2\gamma_3 & \lambda_{100}(\gamma_3^2 - \frac{1}{3}) \end{pmatrix}$$

Variable interne du modèle:

- fractions de phase – estimation statistique

$$f_{\alpha} = \frac{\exp(-\Delta_s \mathbb{W}^{\alpha})}{\sum_{\alpha} \exp(-\Delta_s \mathbb{W}^{\alpha})}$$

- direction d'aimantation - minimisation

$$(\psi, \theta) = \min(\mathbb{W}_{\Phi})$$

Homogénéisation

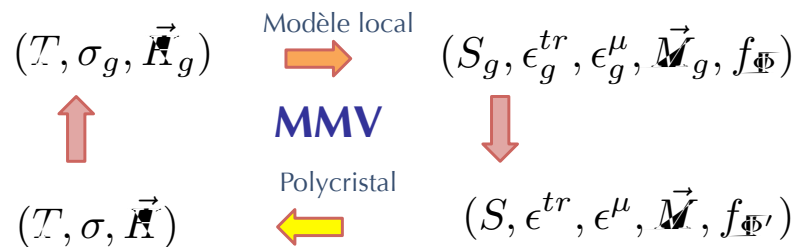
$$\epsilon_g^{tr} = \langle \epsilon_{\Phi}^{tr} \rangle = \sum_{\Phi=1}^{\Phi=n} f_{\Phi} \epsilon_{\Phi}^{tr} \quad S_g = \langle S_{\Phi} \rangle = \sum_{\Phi=1}^{\Phi=n} f_{\Phi} S_{\Phi} \quad \vec{M}_g = \langle \vec{M}_{\Phi} \rangle = \sum_{\Phi=1}^{\Phi=n} f_{\Phi} \vec{M}_{\Phi}$$



Projet IDEFIX

Modélisation

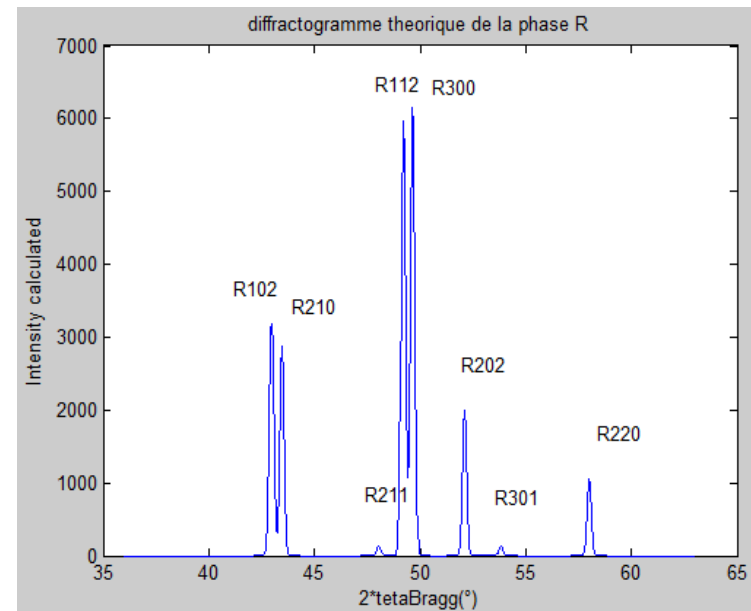
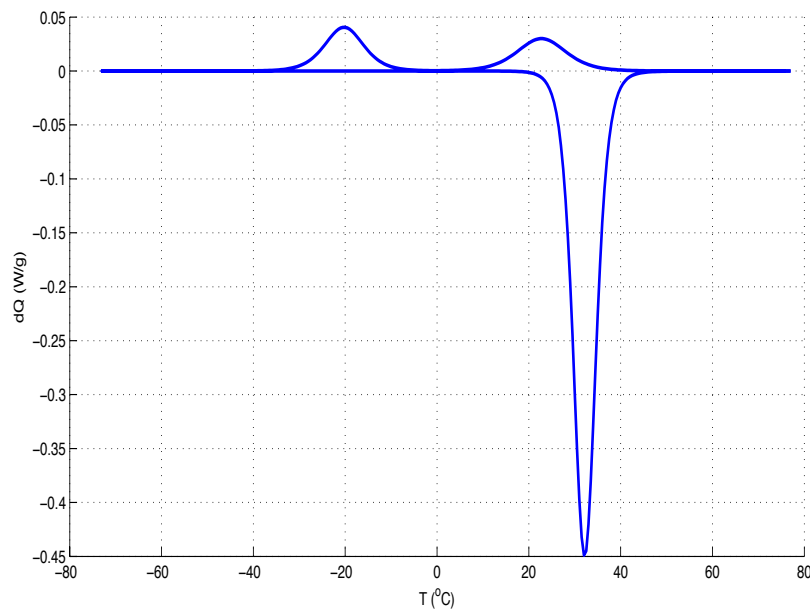
- Couplage modèle de structure thermomécanique



Projet IDEFIX

Résultats de modélisation

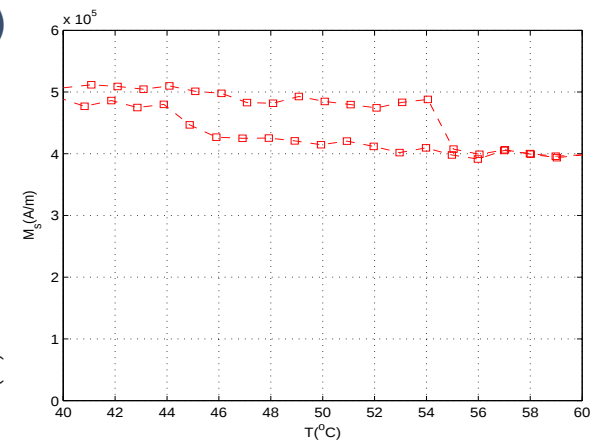
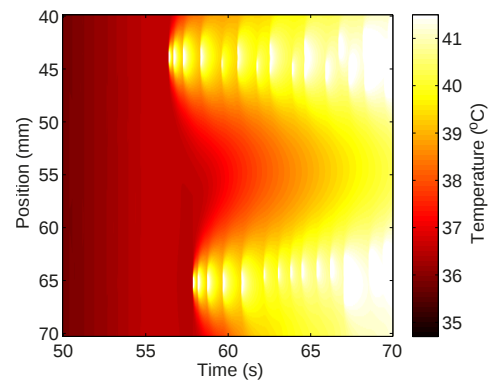
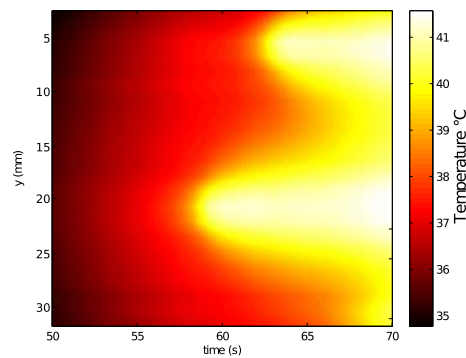
Modèle de VER: DSC + diffraction – fonctionnel – couplage structure thermomécanique fonctionnel



Projet IDEFIX

Perspectives

- Mesures sur monocristaux – autres plans (suivi effectif)
- Mesures sur polycristaux (à chimie contrôlée)
- Mesures de champs cinématiques (localisation)
- Modèle de structure magnétique
- Confrontation modèle/expérience



Comparaison essai/modèle
Dégagement de chaleur
Bandes de transformation
(chargement mécanique)

Projet IDEFIX

Références bibliographiques

- N. Calchand, A. Hubert, Y. Le Gorrec, « Port hamiltonian modeling of MSMA based actuator: toward a thermodynamically consistent formulation », LHMNLC'12., Bertinoro : Italy (2012)
- K. Taillard, S. Arbab-Chirani, S. Calloch et C. LExcellent, « Relation between martensite volume fraction and transformation strain for isotropic and anisotropic shape memory alloys », Mechanics of Materials, 40:151-170, (2008).
- A. Maynadier, thèse de doctorat, ENS-Cachan, (2012).
- D. Depriester, A. Maynadier, K. Lavernhe-Taillard, O. Hubert, « Thermomechanical modelling of a NiTi SMA sample submitted to displacement-controlled tensile test », IJSS submitted, (2013)
- F. Mballa Mballa, thèse de doctorat, ENS-Cachan, (2013).
- L. Hirsinger – alliages à mémoire de forme magnétiques, colloque national MECAMAT, Aussois 2012
- J-Y Gauthier, Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté (2007)
- B. Kiefer, H.E. Karaca, D.C. Lagoudas, I. Karaman, Characterization and modeling of the magnetic field-induced strain and work output in Ni_2MnGa magnetic shape memory alloys, J. of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 312, Issue 1, May 2007, Pages 164–175 (2007)
- Kainuma R., Imano Y., Ito W., Sutou Y., Morito H., Okamoto S., Kitakami O., Oikawa K., Fujita A., Kanomata T. et Ishida K., Magnetic-field-induced shape recovery by reverse phase transformation, Nature 439 (2006)
- Fähler S. et Müllner P., Magnetic shape memory alloys – From fundamentals toward applications, Tutorial of 2009 MRS Fall Meeting, Symposium G (2009)
- Söderberg O., Sozinov A., Ge Y., Hannula S.-P. et Lindroos V.K., Giant Magnetostrictive Materials, Handbook of Magnetic Materials 16 (2006)

