

Etude d'un couplage fort thermomécanique pour les bagues de jonctions des chambres UHV des accélérateurs de particules

Federico Cardile Gerald Feugueur Simona Gurri



SOMMAIRE

1. Introduction

3

2. De l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique...

7

3. ...le numérique a toute son importance...

13

4. ... pour analyser et comprendre le couplage

23

5. Conclusions

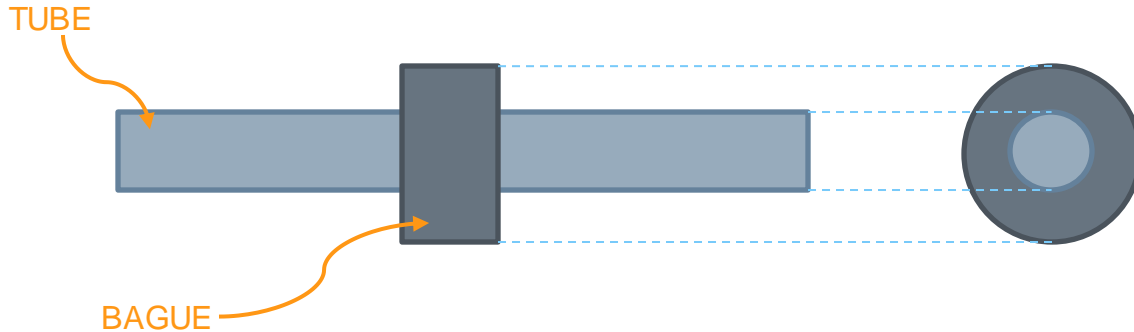
25

1.

Introduction

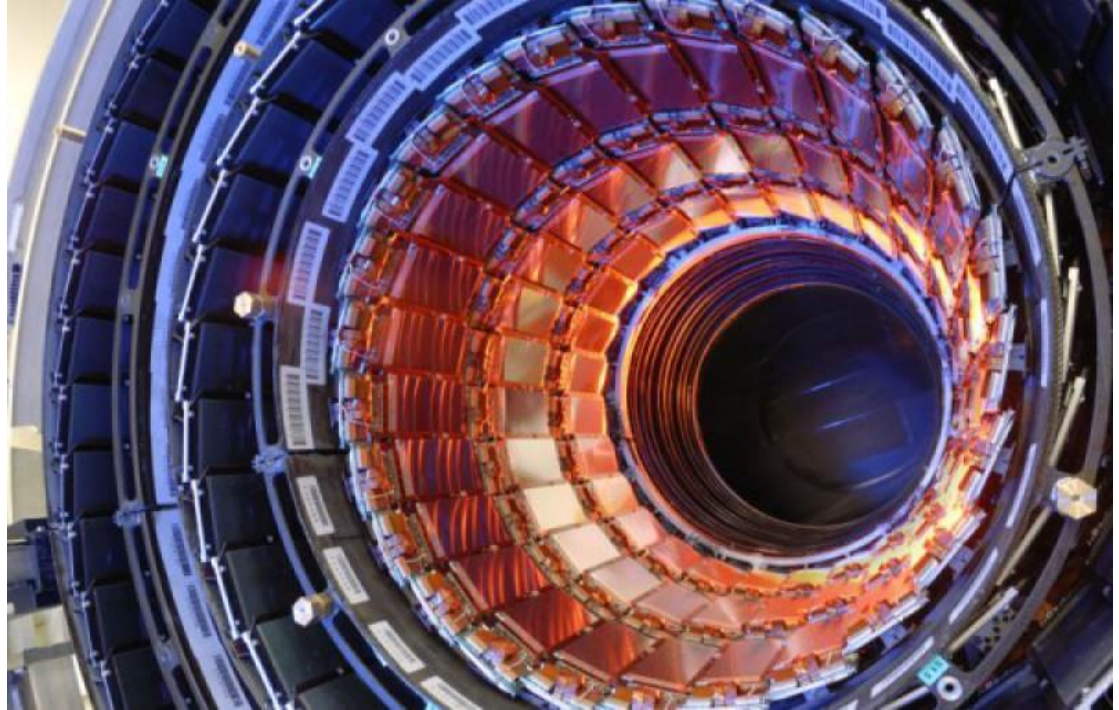
Présentation du problème

- ▷ Bague de jonction de chambres UHV des accélérateurs de particules
- ▷ Réalisé avec un alliage de Ni et Ti, appelé NiTinol



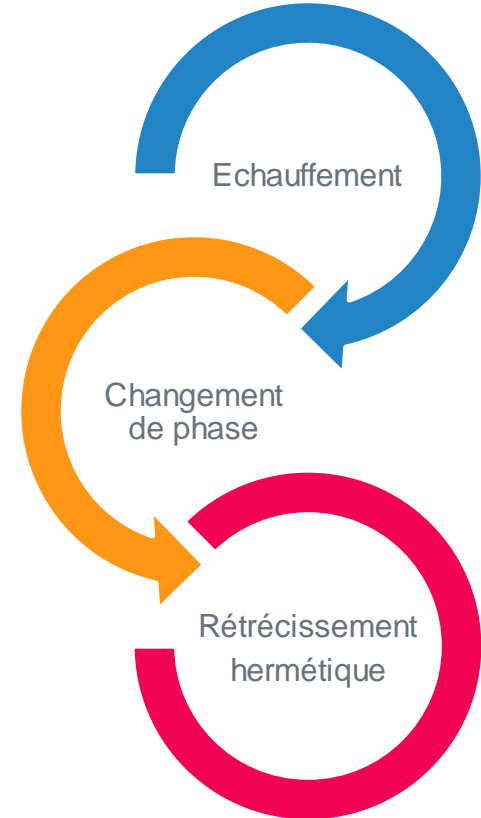
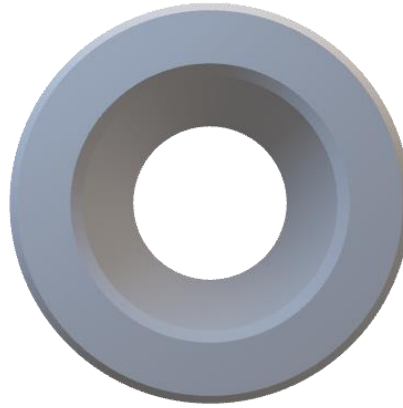
Qu'est ce qu'un accélérateur de particules ?

- Instrument qui utilise des champs électriques ou magnétiques pour amener des particules chargées électriquement à des vitesses élevées.
- Utilisé par la physique nucléaire pour étudier la collision entre particules chargées



La bague : Principe de fonctionnement

- ▷ Montage : jeu entre la bague et le tube
- ▷ Echauffement uniforme : rétrécissement du rayon intérieur
- ▷ Déclanchement du changement de phase : rétrécissement hermétique au niveau du tube



2.

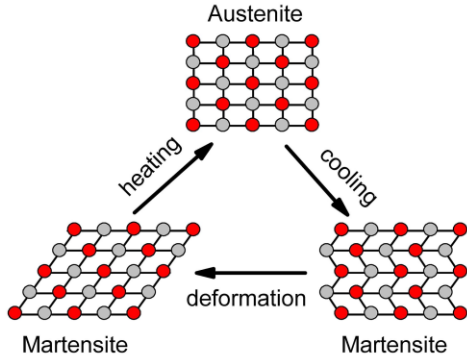
De l'échelle microscopique à
l'échelle macroscopique...

Matériau à mémoire de forme

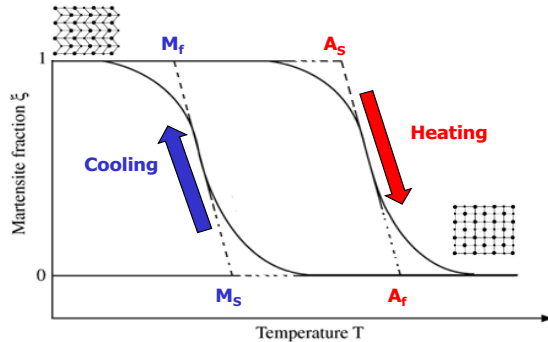
- ▷ Alliage possédant des propriétés inédites parmi l'ensemble des métaux
- ▷ Capacité de garder en mémoire une forme initiale et de la retrouver après une déformation ou une variation de température
- ▷ Comportement super-élastique permettant des allongements sans déformation permanente



Austénite et martensite des alliages Nitinol



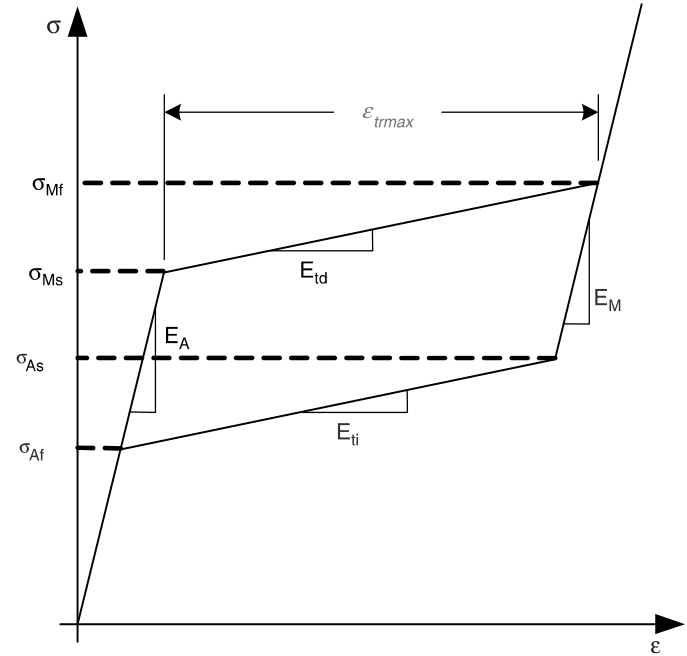
- ▶ Martensite: structure monoclinique qui se forme entre -25°C (M_S) et -50°C (M_f)
- ▶ Austénite: structure cubique simple qui se forme entre 40°C (A_S) et 50°C (A_f)
- ▶ La transition de phase est induite soit par une variation de température ou une déformation



Property	Martensite	Austenite
Young Modulus E	28000 MPa	75000 MPa
Yield strength $R_{p0.2}$	150 MPa	650 MPa
Coefficient of thermal expansion α	$6,6 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{K}$	$11 \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{K}$

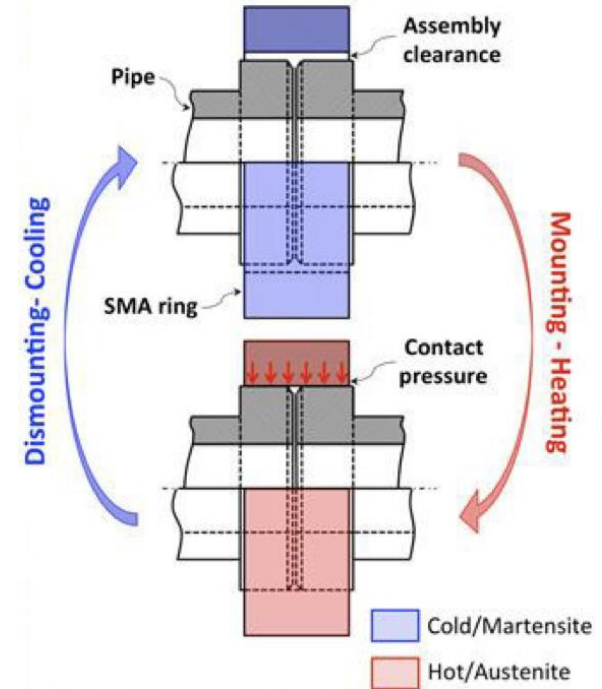
Pseudo-elasticité

Capacité d'un matériau de se déformer en grande proportion (jusqu'à 8% dans notre cas) et retrouver sa configuration initiale une fois déchargé



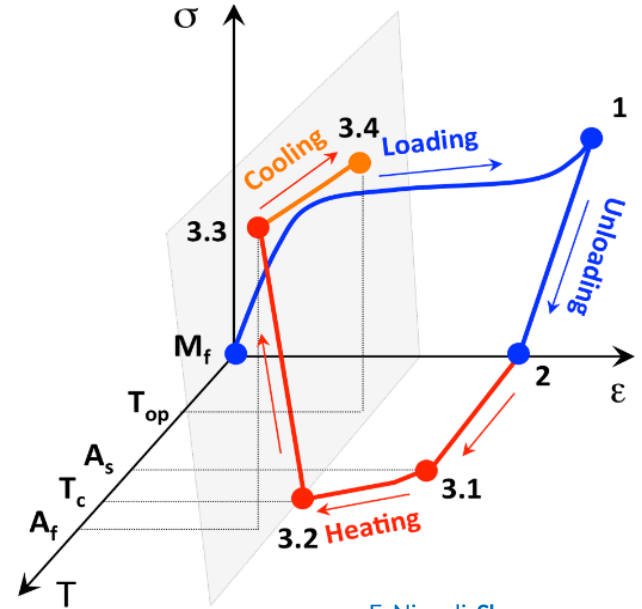
Principe de montage

- ▷ Activation de SMA à distance
- ▷ Bague monté à froid avec un jeu
- ▷ Contraction de la bague par activation du changement de phase
- ▷ La pression à l'intérieur augmente jusqu'à ce qu'un couplage sans fuites soit garanti



Cycle de montage

1. Pré-chargement mécanique en conditions martensitiques ($T < M_f$)
2. Montage avec vide entre la bague et le tube
- 3.1 Activation thermique (SME) à $T = A_s$
- 3.2 Contact entre SMA et le tube
- 3.3 Transformation complète ($T = A_f$)
- 3.4 Refroidissement à T_{op}



F. Niccoli, Shape memory alloys for remote connection of beam pipes in radioactive areas

3.

...le numérique a toute son
importance...



Un phénomène complexe

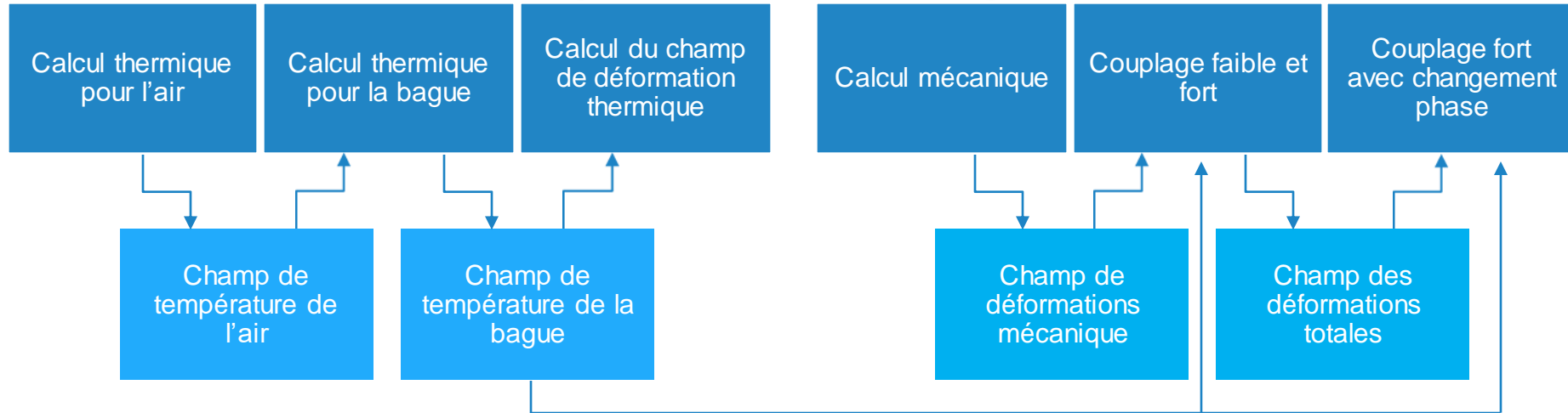
Démarche

Le problème est divisé en sous-problèmes
théoriques et numériques

En partant du modèle géométrique et en
intégrant les équations de la mécanique et de la
thermique

Pour obtenir un modèle complet réduit
développée entièrement sur Python

Scripts numériques



Fichiers de stockage

Démarche d'analyse

Géométrie

Couplage thermo-
mécanique

Modèle complet

Modèle géométrique

Le cycle de la chaleur

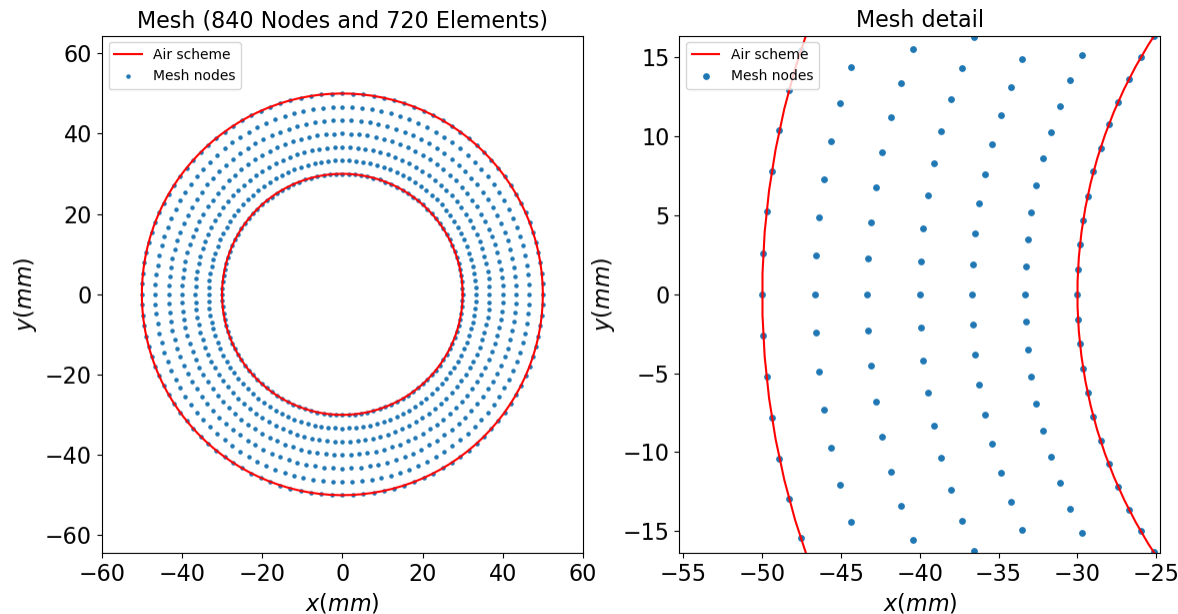
Le cycle des contraintes

Le cycle du changement
phase



Modèle géométrique

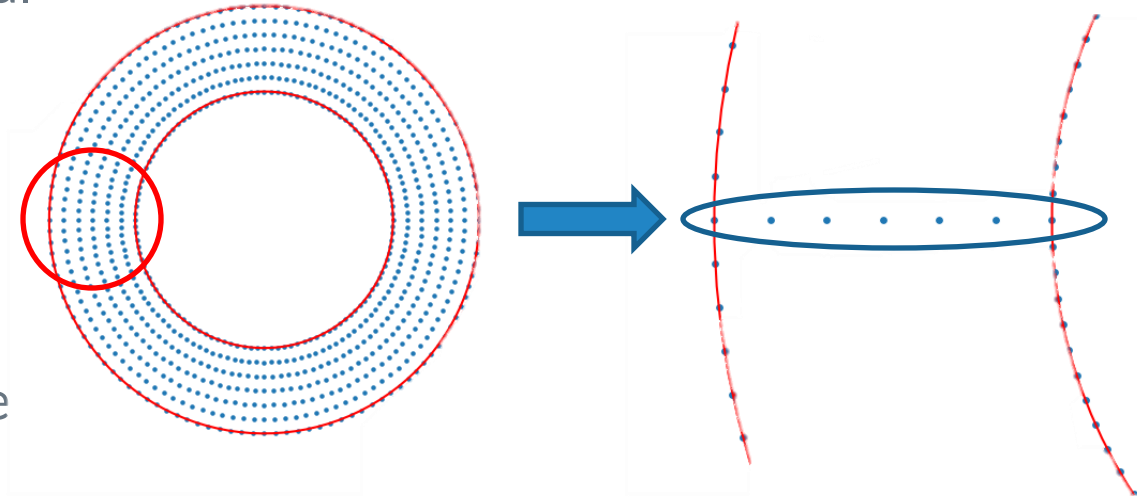
Géométrie et maillage de la bague



- ▷ Hypothèses : modèle 2D et contrainte plane
- ▷ Éléments quadrangulaires
- ▷ 120 éléments selon la direction angulaire et 6 éléments selon la direction radiale

Reduction modèle

- ▷ Réduire le temps de calcul qui est trop élevé
- ▷ Modèle et chargements axisymétriques
- ▷ Hypothèse : modèle 1D pour réduire le temps de calcul pour les champs de déformations et contraintes



Démarche d'analyse

Géométrie

Couplage thermo-
mécanique

Modèle complet

Modèle géométrique

Le cycle de la chaleur

Le cycle des contraintes

Le cycle du changement
phase



Le cycle de la chaleur

Méthodes numériques : Intégration spatiale

▷ Hypothèse : Modèle 2D

$$\iiint f(x, y, z) dx dy dz = e \iint f(x, y) dx dy$$

$$\iint f(x, y) dx dy = \iint \det J(\xi, \eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta$$

▷ Intégration spatiale numérique par une quadrature de Gauss pour la partie élément fini en espace

$$\iint \det J(\xi, \eta) f(\xi, \eta) d\xi d\eta = \sum_{i=1}^4 \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \det J(\xi_i, \eta_i) f(\xi_i, \eta_i)$$

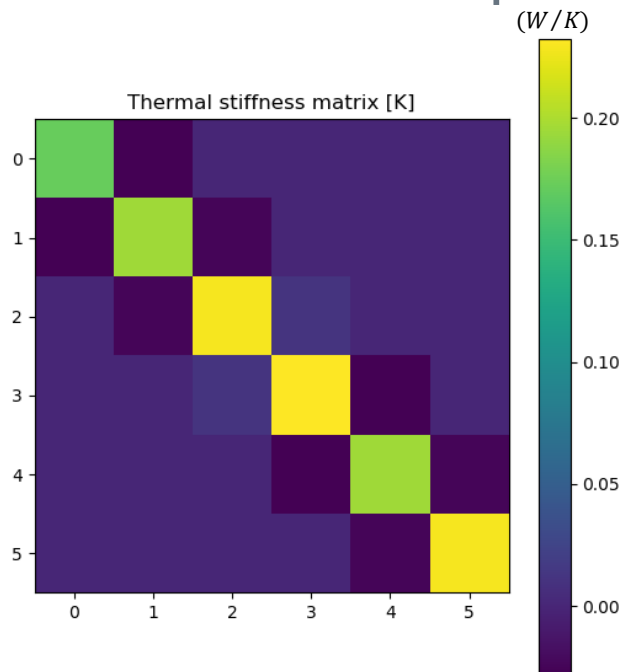
$$\omega_i = [1, 1, 1, 1]$$

$$\xi_i = \left\{ -\sqrt{1/3}, -\sqrt{1/3}, \sqrt{1/3}, \sqrt{1/3} \right\}$$

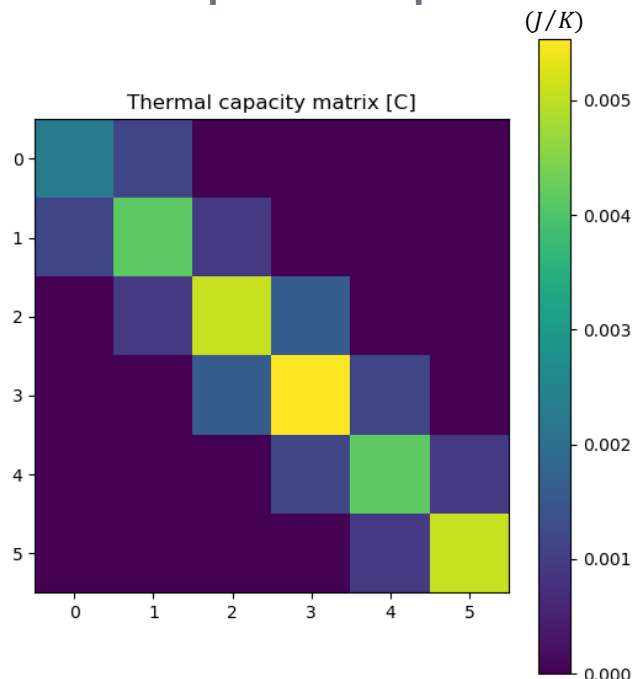
$$\eta_i = \left\{ -\sqrt{1/3}, \sqrt{1/3}, -\sqrt{1/3}, \sqrt{1/3} \right\}$$

Méthodes numériques : Résolution temporelle

▷ Résolution par récurrence pour la partie temporelle



$$\{T\}^{j+1} = \frac{1}{\Delta t} [\tilde{K}]^{-1} [C] \{T\}^j$$



$$[\tilde{K}] = \frac{[C]}{\Delta t} + [K]$$

$$\rho c_p \dot{T} - \text{div}(\lambda \cdot \overrightarrow{\text{grad}} T) - q = 0$$

$$[C] \{\dot{T}\} + [K] \{T\} - \{F\} = 0$$

$$[C] = \int_V \rho c_p [N]^T [N] dV$$

$$[K] = \int_V [B]^T \lambda [B] dV$$

$$\{F\} = \int_V [N]^T q dV = \{0\}$$

La modélisation de la source de chaleur

- ▷ Difficulté : Modélisation de la source de chaleur
- ▷ 1ère hypothèse : application d'une température constante sur le rayon extérieur → Variation de température et déformation thermique nuls sur le rayon extérieur de la bague
- ▷ 2eme hypothèse : Prise en compte de l'air autour de la bague



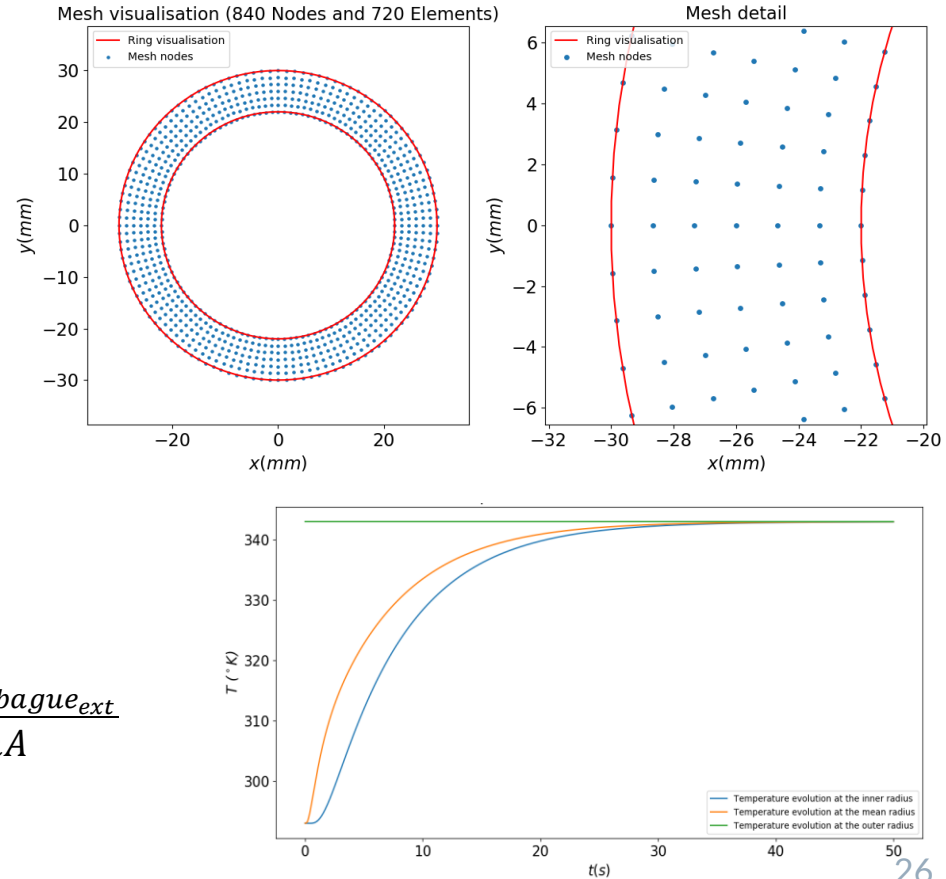
La modélisation de la source de chaleur

La solution par ajout de l'air :

- Modélisation d'une couche d'air autour de la bague et application d'une température constante de 343K sur le rayon extérieur de l'air
- Calcul d'une efficacité d'échange thermique avec une résistance équivalente pour la convection

$$\Phi = \rho_{air} c_p \pi (R_{ext_{air}}^2 - R_{int_{air}}^2) \Delta T_{max_{air}} = \frac{T_{\infty} - T_{bague_{ext}}}{hA}$$

$$\eta = \frac{T_{bague_{ext}}}{T_{air_{int}}} = 0,89$$



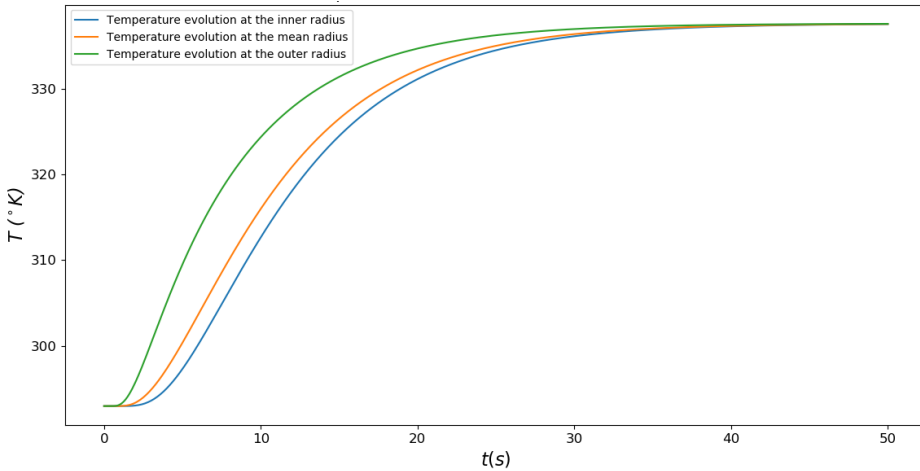
Propriétés du matériau et dimensions

- ▷ Dimensions de la bague et caractéristiques de l'air
- ▷ Propriétés intrinsèques du matériau qui sont des invariants selon la température par supposition

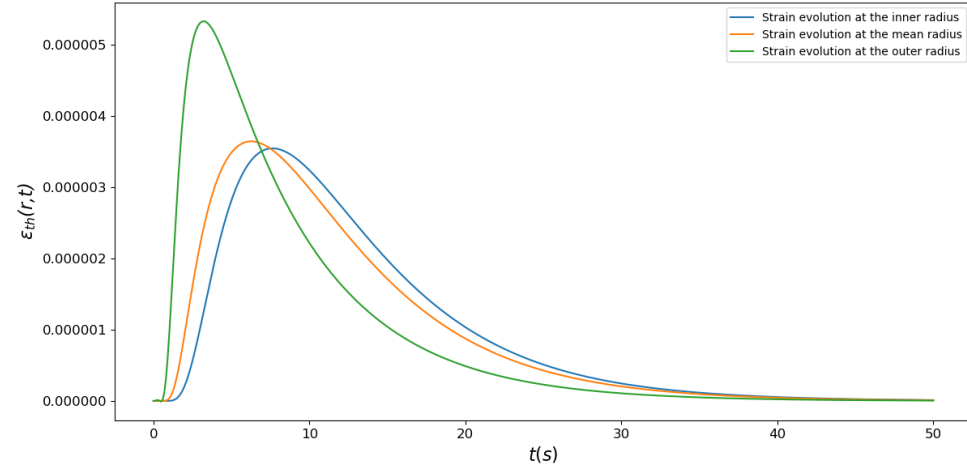
$D_{e \text{ air}}$	$D_{i \text{ air}} = D_{e \text{ SMA}}$	$D_{i \text{ SMA}}$
100 mm	60mm	44mm

Density ρ	6500 kg/m ³
Thermal conductivity λ	$1.8 \cdot 10^{-2} \text{ W/mmK}$
Poisson ratio ν	0,33
Specific heat capacity c_p	322 J/kgK

Influence de la température

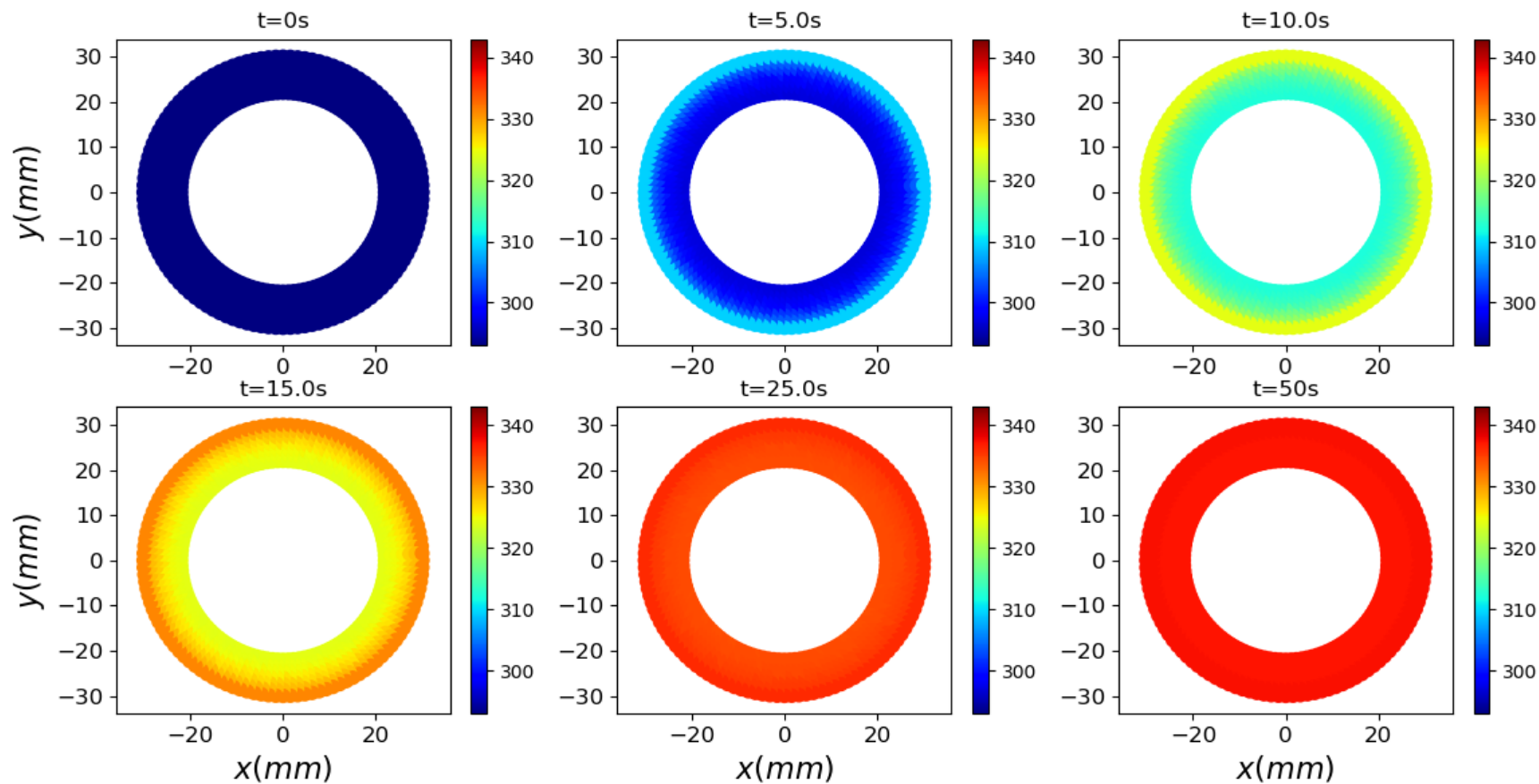


$$[C]\{\dot{T}\} + [K]\{T\} = 0$$



$$\epsilon_{th}(r, t) = \alpha(T(r, t) - T_{air})$$

Temperature field at different time steps (K)



Champ de température dans la bague en fonction du temps

Démarche d'analyse

Géométrie

Couplage thermo-
mécanique

Modèle complet

Modèle géométrique

Le cycle de la chaleur

Le cycle des contraintes

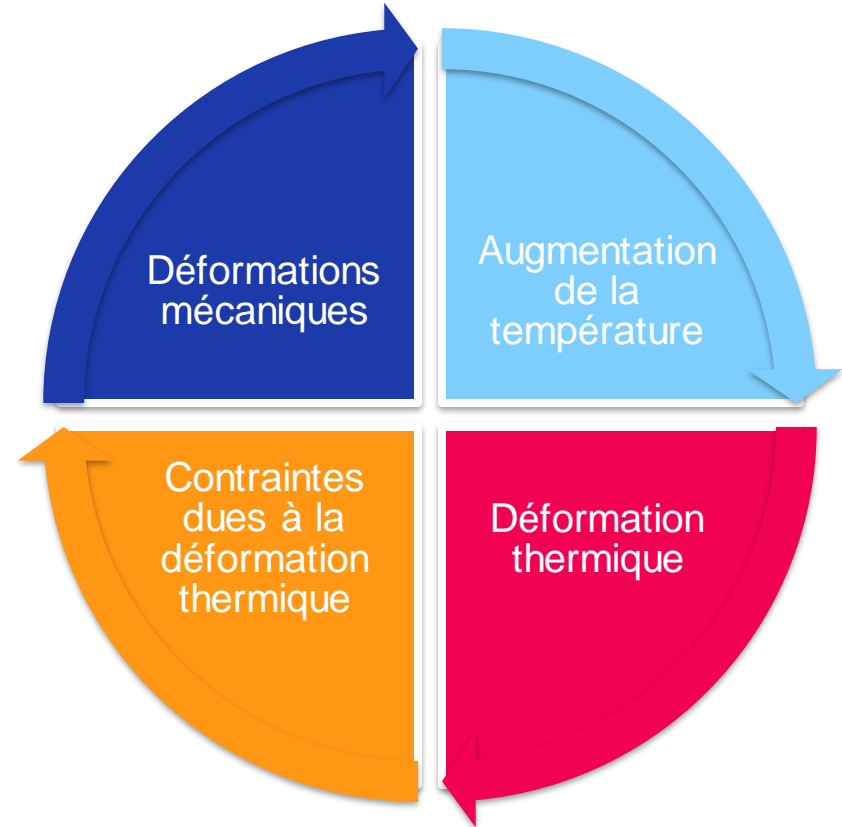
Le cycle du changement
phase



Le cycle des contraintes

Couplage faible vs couplage fort

- ▷ Pour le couplage faible, la déformation issue de la variation en température sera évaluée à chaque pas de temps afin de trouver la contrainte sur l'élément 1D
- ▷ Pour le couplage fort, la variation de contrainte provoque encore une variation en température qui est pris en compte à chaque pas de temps



Ajout de la contrainte : couplage faible

- ▷ Dans cette première partie la déformation thermique alimente la contrainte mécanique
- ▷ Plus la température augmente plus la contrainte augmente

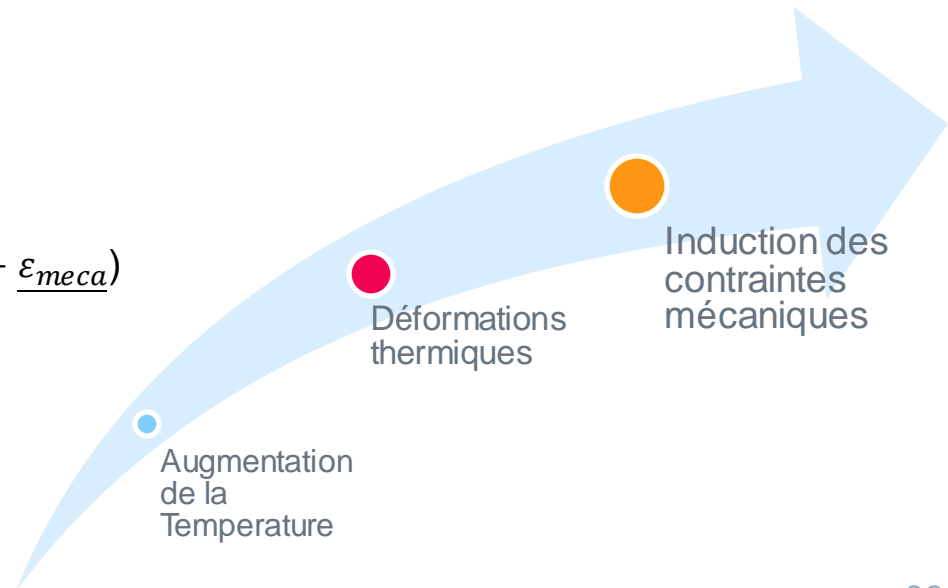
$$\mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad \lambda = \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$$

$$\underline{\sigma}(r,t) = (2\mu + \lambda)\underline{\varepsilon}_{tot} \quad \underline{\sigma}(r,t) = (2\mu + \lambda)(\underline{\varepsilon}_{th} + \underline{\varepsilon}_{meca})$$

$$\sigma_{i+1} = \sigma_i + (2\mu + \lambda)\alpha(T_{i+1} - T_i)$$

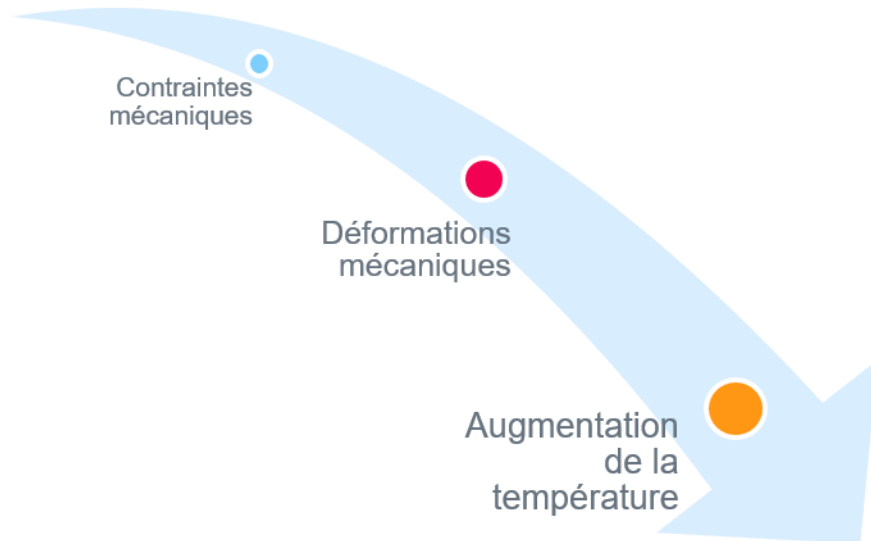
Avec

$$\sigma_0 = \sigma_{montage}$$



Le couplage fort thermo-mécanique

- ▶ Plus la contrainte augmente plus la température augmente
- ▶ Dans cette deuxième partie la contrainte alimente vient modifier la température

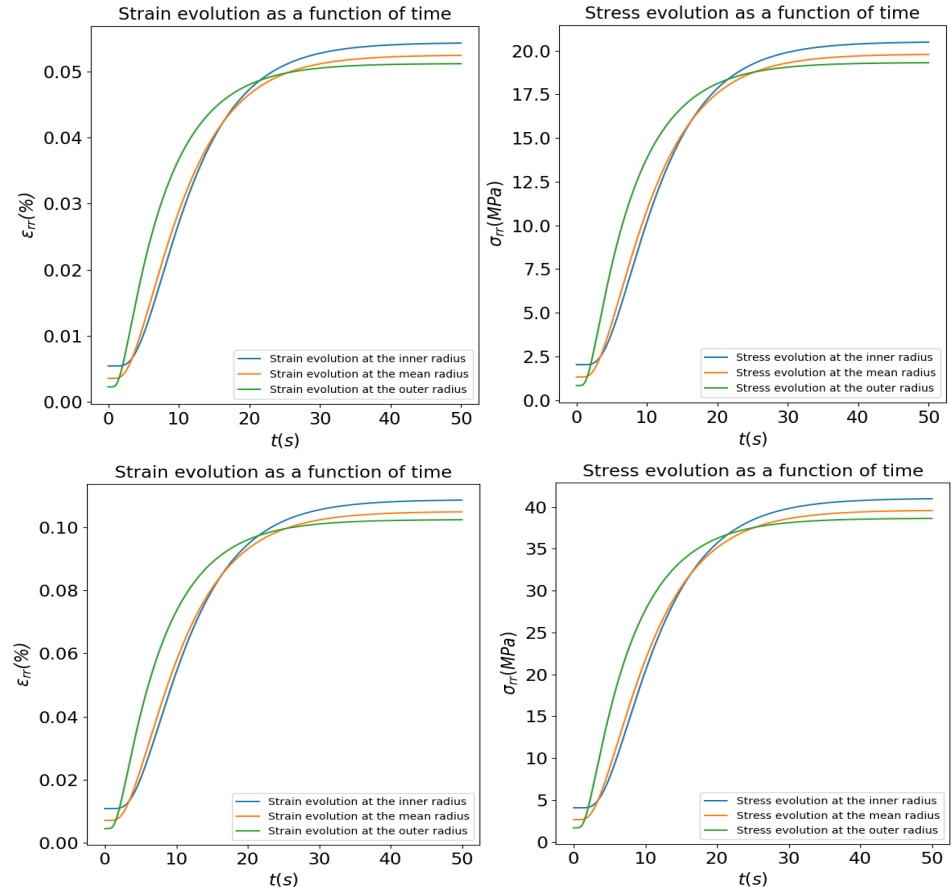


$$\Delta T_i' = \frac{\sigma_i}{(2\mu + \lambda)\alpha} - (2\mu + \lambda) \frac{\sigma_i}{E}$$

$$\sigma_i' = \sigma_i + (2\mu + \lambda)\alpha \Delta T_i'$$

Champ de contrainte et déformation en fonction du temps – comparaison couplage faible/fort

- ▶ Couplage faible: contrainte maximale d'environ 20MPa
- ▶ Couplage fort: contrainte maximale de environ 40MPa



Démarche d'analyse

Géométrie

Couplage thermo-
mécanique

Modèle complet

Modèle géométrique

Le cycle de la chaleur

Le cycle des contraintes

Le cycle du changement
phase

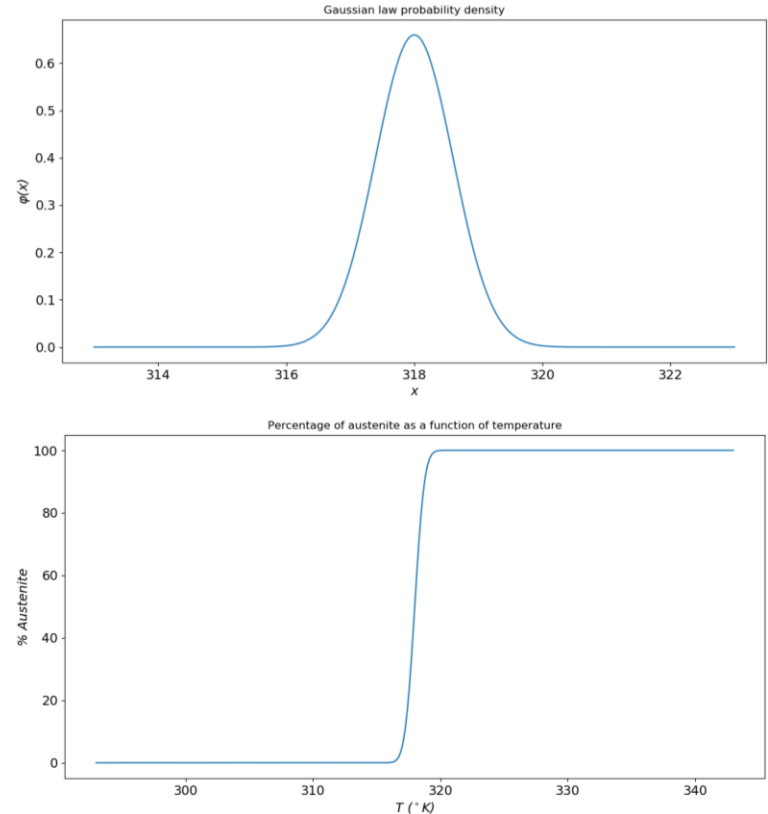


Le cycle du changement phase

La température : un facteur qui déclenche le changement de phase

Loi Normale : Une loi probabiliste qui caractérise l'évolution des propriétés mécaniques et thermiques du matériau

$$\varphi_{\mu,\sigma}(T) = \int_{-\infty}^T \varphi(x) dx = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx$$



La température : un facteur qui déclenche le changement de phase

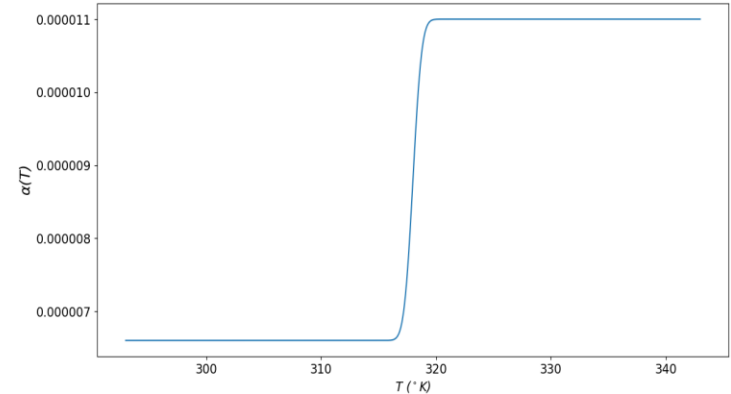
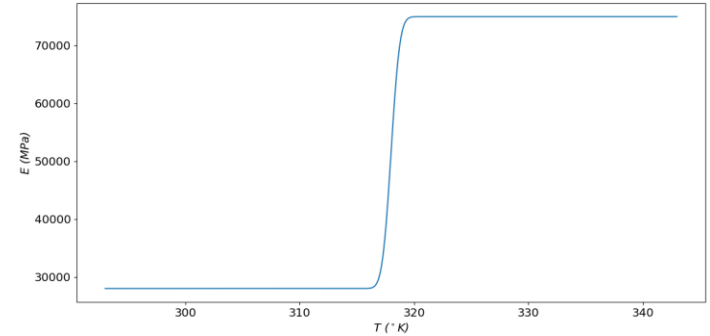
Evolution du Module d'Young (E) et du coefficient de dilation thermique (α) en fonction de la température

$$E(T) = E_{mart}\bar{\varphi}_{\mu,\sigma}(T) + E_{aust}\varphi_{\mu,\sigma}(T)$$

$$\alpha(T) = \alpha_{mart}\bar{\varphi}_{\mu,\sigma}(T) + \alpha_{aust}\varphi_{\mu,\sigma}(T)$$


$$\varphi_{\mu,\sigma}(T) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^T e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx \quad \bar{\varphi}_{\mu,\sigma}(T) = 1 - \varphi_{\mu,\sigma}(T)$$

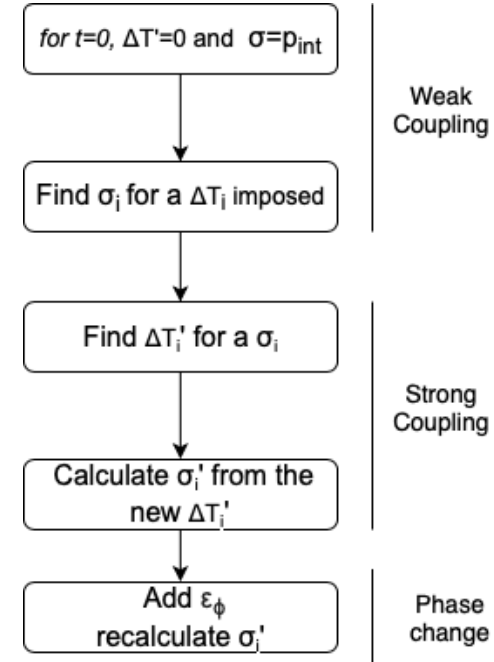
$$\mu = 318 \text{ K et } \sigma^2 = 0,366$$



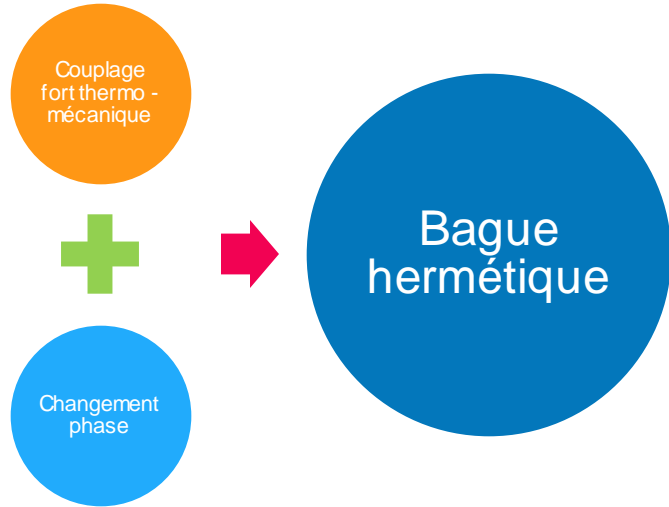
L'analyse par élément fini

Le changement de phase est pris en compte en injectant la déformation ε_ϕ dans l'équation contrainte-déformation pour chaque pas de temps


$$\sigma = E(\varepsilon_{th} + \varepsilon_{meca})$$
$$\sigma = E(T)[\alpha(T)\Delta T + \varepsilon_{meca} + \varepsilon_\phi(T)]$$

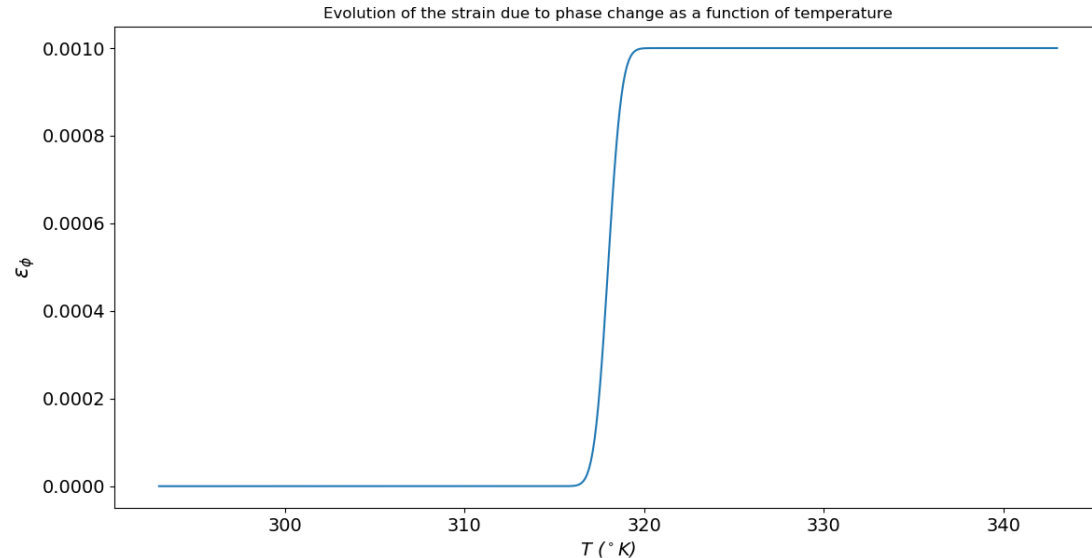


Calcul du champ de contrainte



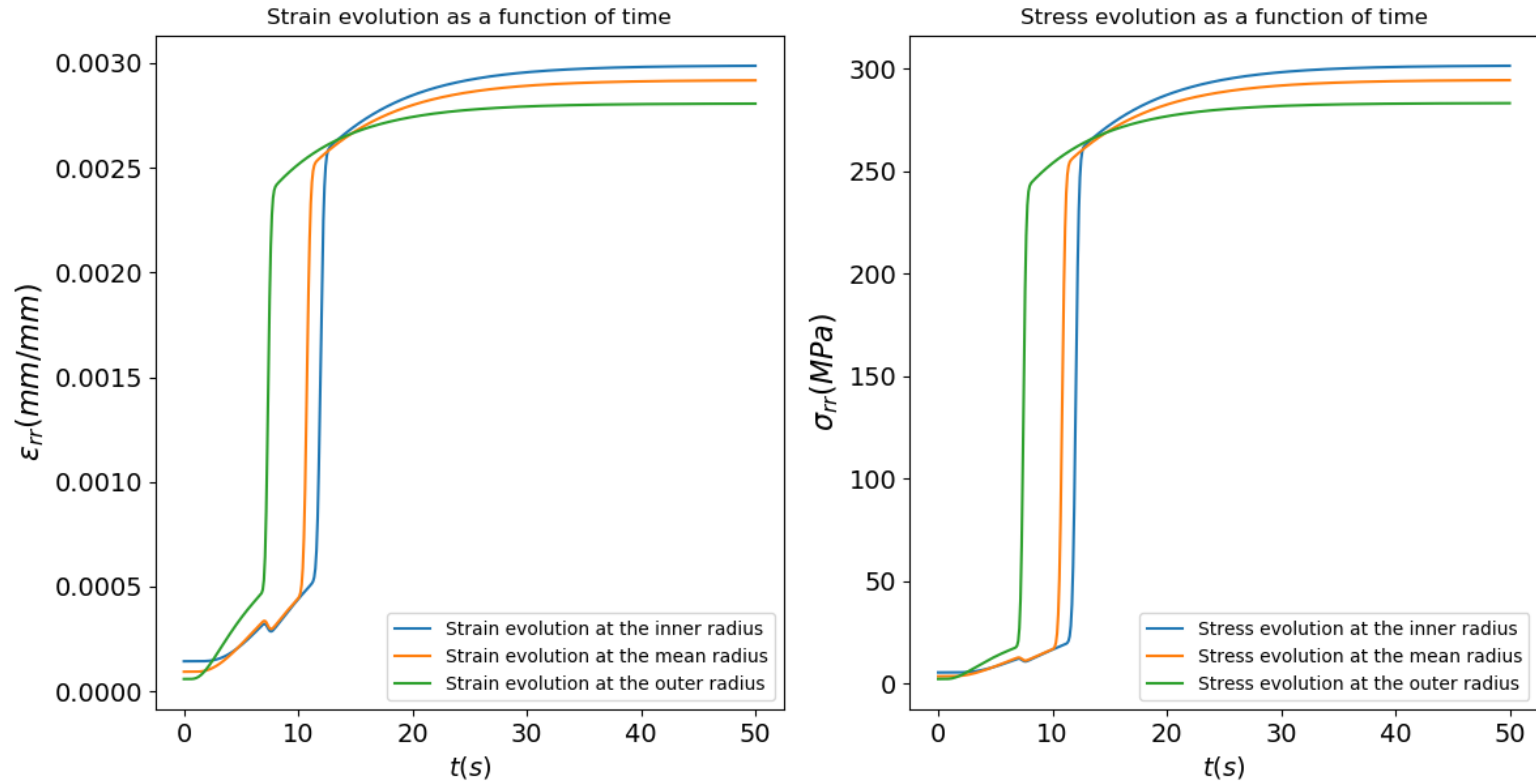
$$\varepsilon_{\phi}(T) = \varepsilon_{\phi_{\text{mart}}} \bar{\varphi}_{\mu,\sigma}(T) + \varepsilon_{\phi_{\text{aust}}} \varphi_{\mu,\sigma}(T)$$

$$\varepsilon(r,t) = \varepsilon_{\text{el}}(r,t) + \varepsilon_{\text{th}}(r,t) + \varepsilon_{\phi}(r,t)$$



Champs déformations et contraintes après changement de phase

Deformation evolution (left) and stress (right) for a strong coupling with phase change

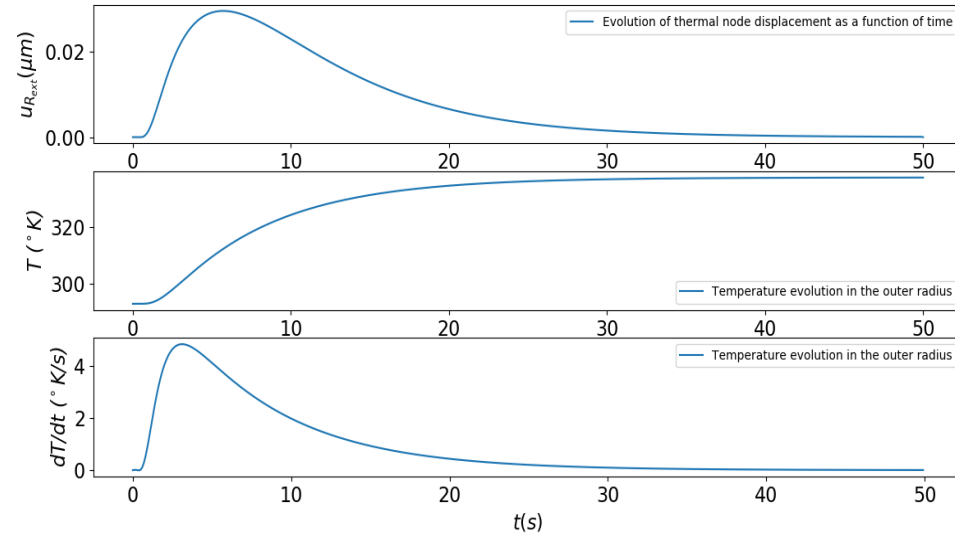


4.

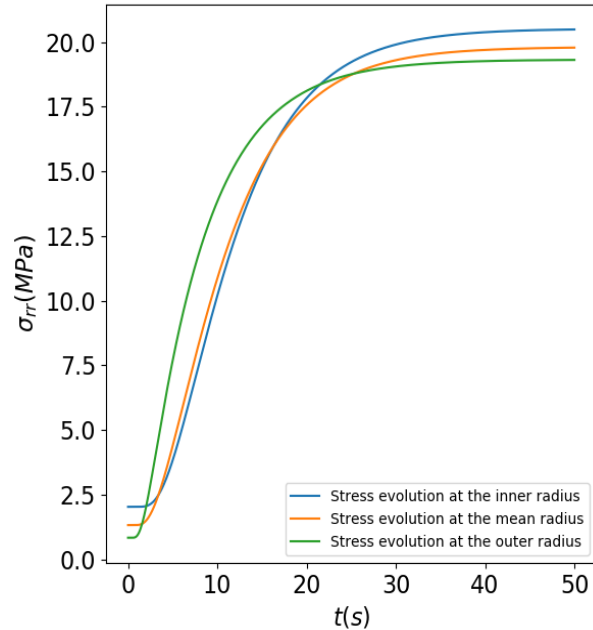
... pour analyser et
comprendre le couplage

Synthèse des résultats

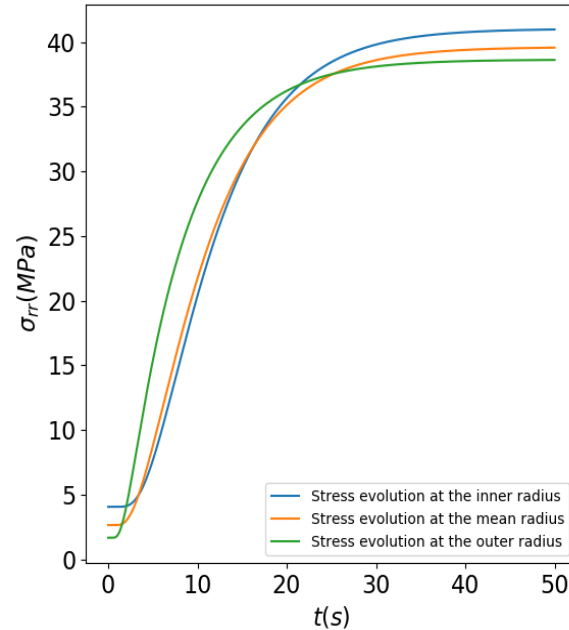
- ▷ Déplacement nodal sur le rayon extérieur
- ▷ Variation de la température du rayon extérieur : stabilisation après 15s environ



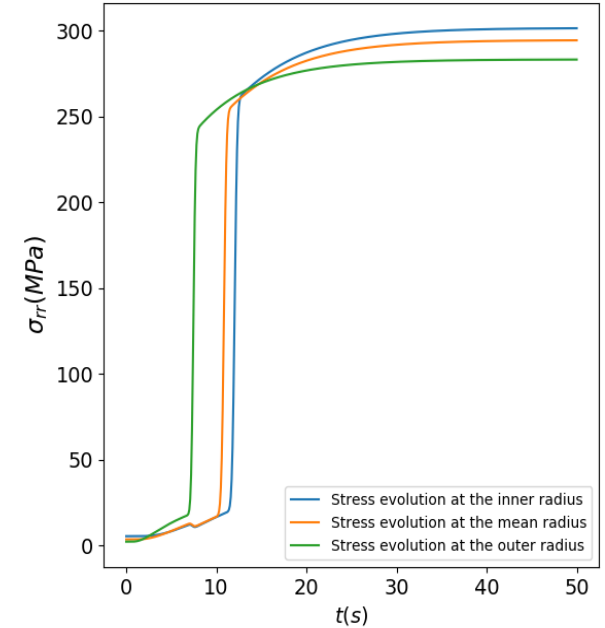
Comparaisons des champ de contrainte : Couplage Faible-Fort-Changement de phase



Faible

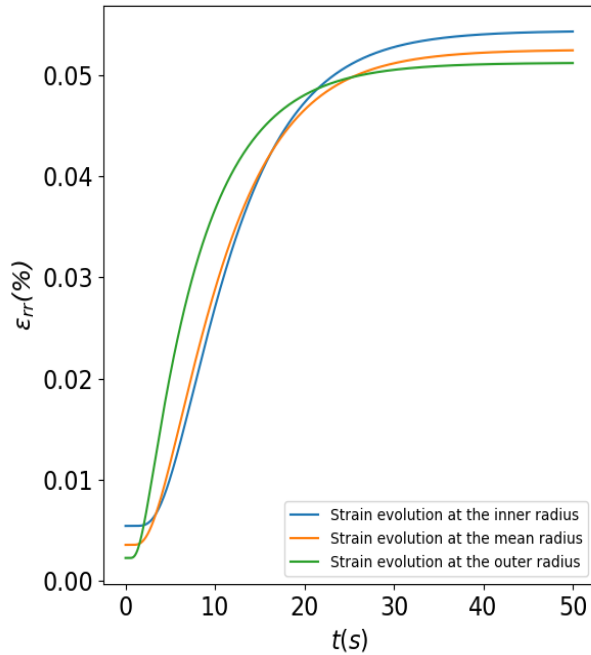


Fort

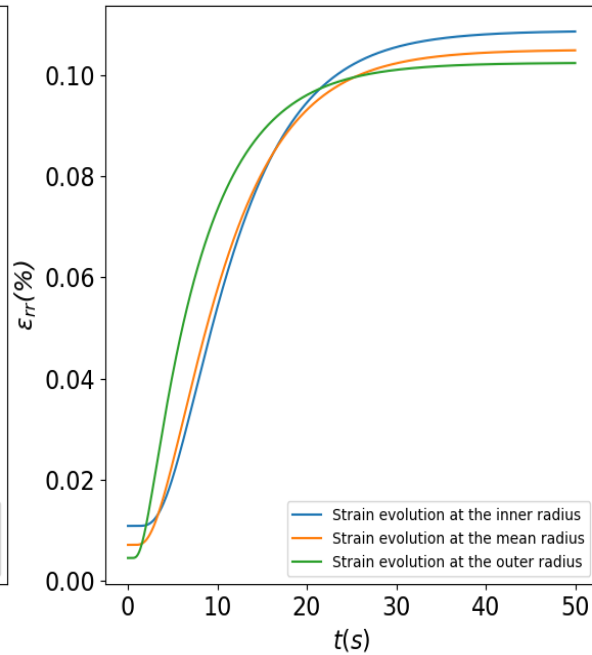


Changement
de phase

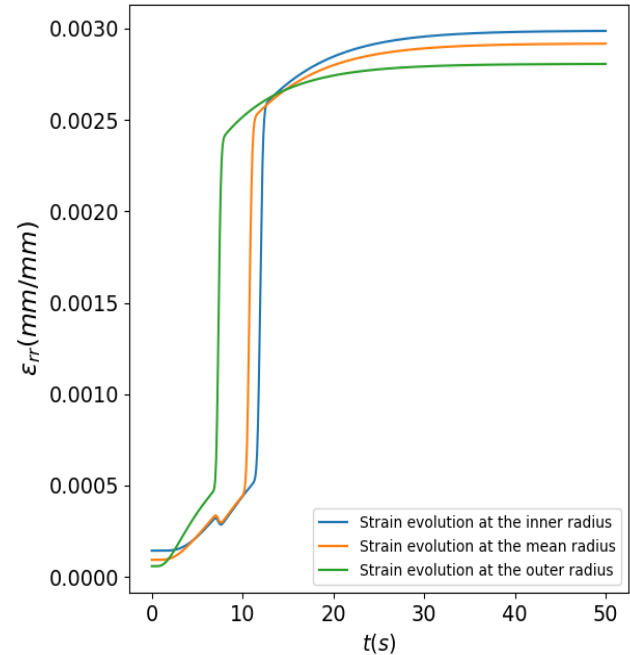
Comparaisons des champs de déformation : Couplage Faible-Fort-Changement de phase



Faible



Fort

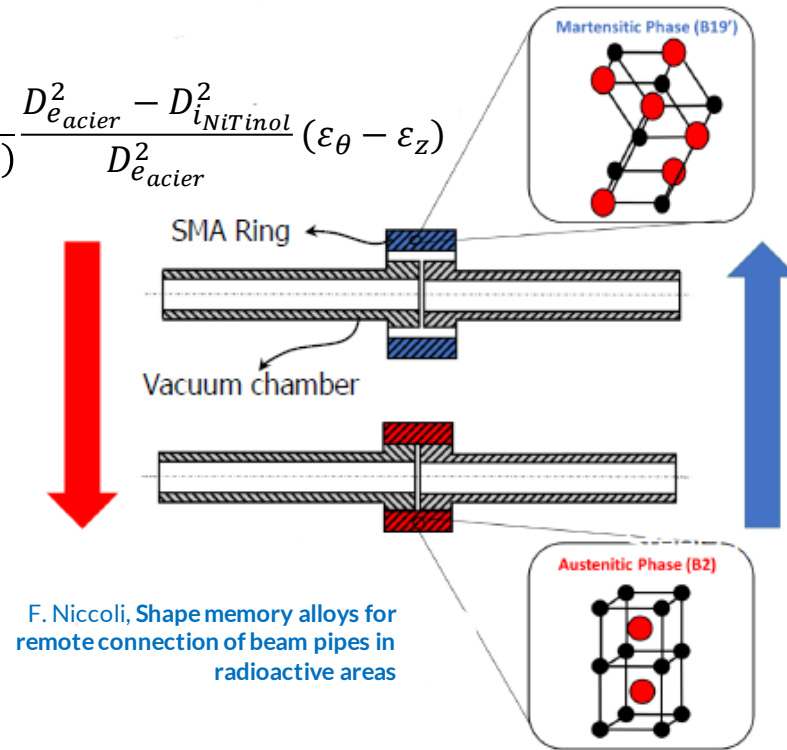


Changement
de phase

L'étanchéité

- Les hypothèses simplificatrices ne permettent pas de calculer la pression de montage et la pression de contact
- Pas d'interférence numérique dans notre cas
- Etat de contrainte 1D par hypothèse

$$p_c = -\frac{E}{2(1+\nu)} \frac{D_{e_{acier}}^2 - D_{i_{NiTiInol}}^2}{D_{e_{acier}}^2} (\varepsilon_\theta - \varepsilon_z)$$



$$p_m = -\frac{i}{\delta_{acier} D_{e_{acier}} + \delta_{NiTiInol} D_{e_{NiTiInol}}}$$

T. Berruti, E. Brusa, *Costruzione di Macchine*

5. Conclusions

Bilan

- ▷ Des résultats importants ont été trouvés et on a vu comment un matériau par intégration du changement de phase peut être contrôlé à distance en modifiant sa température
- ▷ Des hypothèses ont été faites :
 - Contrainte plane
 - 2D
 - $\varepsilon_{\phi} = 0.1\%$
 - Rayon intérieur fixe
- ▷ Le modèle peut être amélioré
- ▷ Des résultats plus proches de la réalité peuvent alors être observés par utilisation de notre modèle

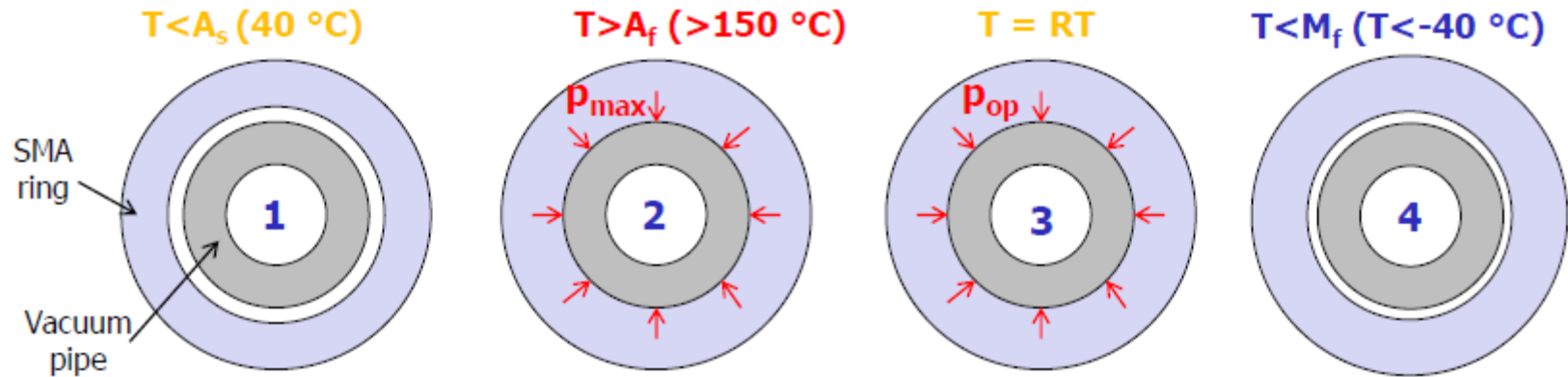


Perspectives

La simulation du montage avec jeu

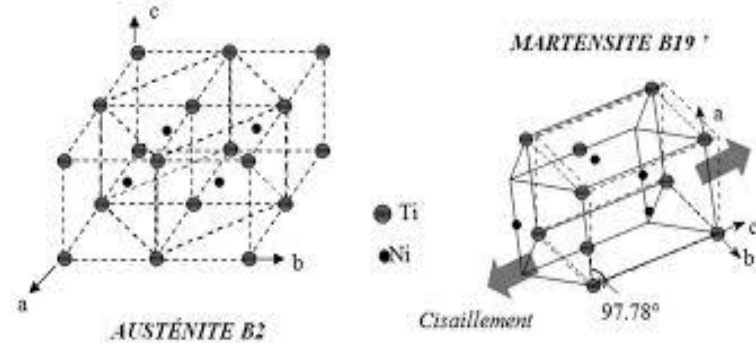
Le montage, au fin de la modélisation, a été considéré sous pression. Dans la réalité epsilon du au changement phase est assez importante → il suffit d'avoir un jeu initial.

▷ Possibilité de montage et démontage



Loi de changement de phase plus réelle

- ▶ Modélisation du changement de phase avec la fonction de répartition de la loi Normale
- ▶ Dans la réalité c'est proche mais pas totalement vrai : il y a beaucoup plus des paramètres à considérer
- ▶ Le changement de phase génère un état de contrainte 3D



Côté expérimental

- ▷ Il est important d'avoir une approche expérimentale pour valider les résultats obtenus
- ▷ Test à une température réelle et contrainte appliquée pour la déformation dû au changement phase

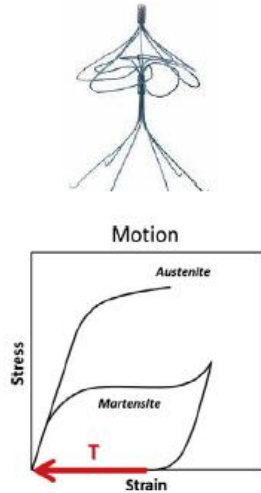




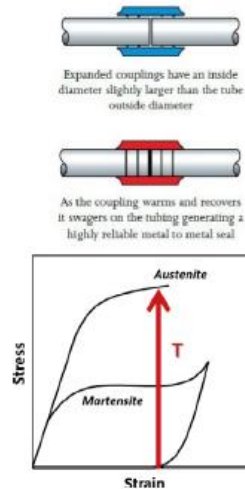
Axes de recherche

Alliages a mémoire de forme : applications

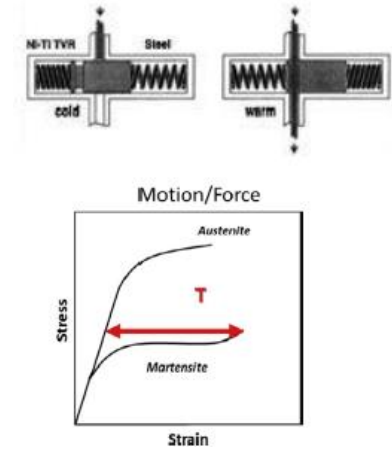
Récupération libre



Récupération retenue



Actionneurs



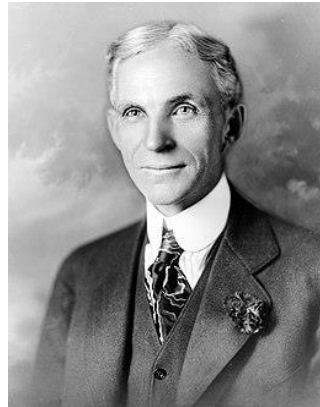
Remerciements

Nos remerciements vont à Madame Auclair ainsi que Monsieur Zaccardi qui nous ont donné la chance d'avoir eu un échange international d'exception.

Par ailleurs nous remercions une fois de plus Chiraz Belhadj qui nous a encouragé tout au long du projet ainsi que Naman Recho qui a conforté nos hypothèses faites en début de projet.

« Se réunir est un début, rester ensemble est un progrès, travailler ensemble est la réussite »

Henry Ford



Merci pour votre attention!

Contacts:

Federico Cardile

federico.cardile@studenti.polito.it

+39 327 9890999

Gerald Feugueur

gerald.feugueur@epfedu.fr

+33 06 45835777

Simona Gurri

simona.gurri@studenti.polito.it

+39 331 7679164

