

Manuel de Validation**Fascicule V7.22 : Thermo-mécanique statique non linéaire des structures volumiques****Document : V7.22.101**

HSNV101 - Thermo-plasticité et métallurgie découplées en traction simple

Résumé :

On traite la détermination de l'évolution mécanique d'un barreau cylindrique soumis à des évolutions thermiques $T(t)$ et métallurgiques $Z(t)$ connues et uniformes (la transformation métallurgique est de type bainitique).

Les éléments utilisés sont des éléments axisymétriques et la relation de comportement est la plasticité de von Mises avec écrouissage isotrope linéaire (pour la modélisation B, on tient également compte de la plasticité de transformation).

La limite élastique et la pente de la courbe de traction dépendent de la température et de la composition métallurgique.

Le coefficient de dilatation α dépend de la composition métallurgique.

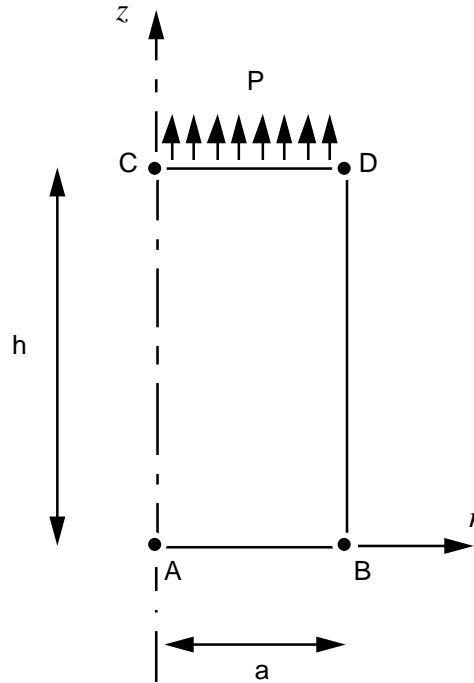
Les transformations métallurgiques ont lieu à $\dot{\varepsilon}^P = 0$ (c'est en ce sens que le test **découple** la plasticité de transformation de la plasticité classique).

Les résultats fournis par le *Code_Aster* sont très satisfaisants avec des erreurs inférieures à 2 %.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Rayon : $a = 0.05$ m.
Hauteur : $h = 0.2$ m.



1.2 Propriétés des matériaux

$$E = 200000 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\nu = 0.3$$

$$\alpha_{fbm} = 15 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\alpha_{aust} = 23.5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\varepsilon_{ref_{fbm}} = 2.52 \cdot 10^{-3}$$

$$T^{ref} = 900^\circ\text{C}$$

$$cp = 2\,000\,000 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\sigma_y^{aust} = \sigma_o^{aust} + s^{aust}(T - T^o) \quad \text{notons } H(t) = \frac{\alpha(t) \cdot E(t)}{E(t) - \alpha(t)}$$

$$\sigma_o^{aust} = 400 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$s^{aust} = 0.5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\sigma_y^{fbm} = \sigma_o^{fbm} + s^{fbm}(T - T^o)$$

$$\sigma_o^{fbm} = 530 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$s^{fbm} = 0.5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\lambda = 9999.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$\text{notons } H(t) = \frac{\alpha(t) \cdot E(t)}{E(t) - \alpha(t)}$$

$$H^{aust} = H_o^{aust} + \lambda^{aust}(T - T^o)$$

$$H_o^{aust} = 1250 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\lambda^{aust} = -5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$H^{fbm} = H_o^{fbm} + \lambda^{fbm}(T - T^o)$$

$$H_o^{fbm} = -50 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

$$\lambda^{fbm} = -5 \cdot 10^6 \text{ Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$k^m = 1 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$$

**aust* = caractéristiques relatives à la phase austénitique

**fbm* = caractéristiques relatives aux phases ferritique, bainitique et martensitique

α_{fbm} = coefficient de dilatation thermique des phases ferritique, bainitique et martensitique

α_{aust} = coefficient de dilatation de la phase austénitique

$\varepsilon_{ref_{fbm}}$ = déformation des phases ferritique, bainitique et martensitique à la température de référence, l'austénite étant considérée comme non déformée à cette température : traduit la différence de compacité entre les structures cristallographiques cubiques à faces centrées (austénite) et cubiques centrées (ferrite).

TRC pour modéliser une évolution métallurgique de type bainitique, sur toute la structure, de la forme :

$$Z_{fbm} = \begin{cases} 0. & \text{si } t \leq \tau_1 & \tau_1 = 60 \text{ s} \\ \frac{t - \tau_1}{\tau_2 - \tau_1} & \text{si } \tau_1 \leq t < \tau_2 & \tau_2 = 112 \text{ s} \\ 1. & \text{si } t \geq \tau_2 \end{cases}$$

Loi de plasticité de transformation : $\dot{\varepsilon}^{pt} = K^{fbm} F(Z_{fbm}) \dot{Z}_{fbm}$

$$\text{avec } F(Z_{fbm}) = Z_{fbm} (2 - Z_{fbm})$$

1.3 Conditions aux limites et chargements

- $u_Z = 0$ sur le côté AB (condition de symétrie).
- traction imposée sur le côté CD, $p(t) = \begin{cases} p_o t & \text{pour } t \leq \tau_1 \\ 360 \cdot 10^6 \text{ Pa} & \text{pour } t \geq \tau_1 \end{cases}$ $p_o = 6 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ $\tau_1 = 60 \text{ s}$.
- $T = T^o + \mu t$, $\mu = -5^\circ\text{C.s}^{-1}$ sur toute la structure.

1.4 Conditions initiales

$$T^o = 900^\circ\text{C} = T^{ref}$$

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Avant transformation, solution élastique pour $t < \tau_1$.

$$\sigma(t) = p_o t \quad \varepsilon_{zz}(t) = \varepsilon_{zz}^e(t) + \varepsilon_{zz}^{th}(t) = \frac{\sigma(t)}{E} + \alpha_{aust}(T - T^o)$$

La limite élastique est atteinte pour $\tau_1' = \frac{\sigma_o^{aust}}{p_o - s^{aust} \times \mu} = 47.06 \text{ s.}$

Avant transformation, solution thermo-élasto-plastique, $\tau_1' \leq t \leq \tau_1$, $\tau_1 = 60 \text{ s.}$

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= p_o t & \varepsilon_{zz}(t) &= \varepsilon_{zz}^e(t) + \varepsilon_{zz}^{th}(t) + \varepsilon_{zz}^p(t) \\ \varepsilon_{zz}^e(t) &= \frac{\sigma(t)}{E} & \varepsilon_{zz}^{th}(t) &= Z_{aust} \times \alpha_{aust}(T - T^o) \\ \varepsilon_{zz}^p(t) &= \frac{\sigma(t) - (\sigma_y^{aust} + s^{aust} \mu t)}{H_o^{aust} + \lambda^{aust} \mu t} \end{aligned}$$

Pendant la transformation, solution thermo-élasto-métallurgique, $\tau_1 < t < \tau_2$, $\tau_2 = 112 \text{ s.}$

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= 360 \cdot 10^6 \text{ Pa} & \varepsilon_{zz}(t) &= \varepsilon_{zz}^e(t) + \varepsilon_{zz}^{th}(t) + \varepsilon_{zz}^{pt}(t) + \varepsilon_{zz}^p(60) \\ \varepsilon_{zz}^{th}(t) &= Z_{aust} \times \alpha_{aust}(T - T^o) + Z_{fbm} \times \alpha_{fbm}(T - T^o) + Z_{fbm} \times \varepsilon_{ref_{fbm}} \\ \varepsilon_{zz}^p(t) &= k^{fbm} F(Z_{fbm}) p_o \tau_1 \end{aligned}$$

Après la transformation, solution thermo-élasto-plastique, $\tau_2 < t < \tau_3$, $\tau_3 = 176 \text{ s.}$

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= 360 \cdot 10^6 \text{ Pa} & \varepsilon_{zz}(t) &= \varepsilon_{zz}^e(t) + \varepsilon_{zz}^{th}(t) + \varepsilon_{zz}^p(t) + \varepsilon_{zz}^{pt}(112) \\ \varepsilon_{zz}^p(t) &= \frac{\sigma(t) - (\sigma_o^{fbm} + s^{fbm} \mu t)}{H_o^{fbm} + \lambda^{fbm} \mu t} \end{aligned}$$

2.2 Résultats de référence

ε_{zz}^p , χ , σ et ε_{zz} pour $t = 47, 48, 64$ et 114 secondes.

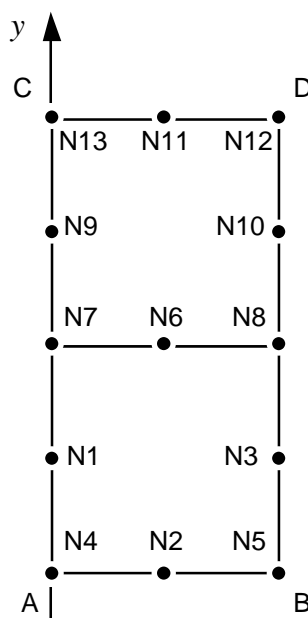
ε_{zz}^p pour $t = 60$ et 176 secondes.

2.3 Bibliographie

- [1] DONORE A.M. - WAECKEL F. : Influence des transformations structurales dans les lois de comportement élasto-plastiques Note HI-74/93/024.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation



A = N4, B = N5, C = N13, D = N12.

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de noeuds : 13

Nombre de mailles et types : 2 mailles QUAD8, 6 mailles SEG3

3.3 Fonctionnalités testées

Commandes				Clés
DEFI_MATERIAU	META_THER			[U4.23.01]
THER_LINEAIRE	OPTION	META_ELGA_TEMP		[U4.23.05]
DEFI_MATERIAU	META_MECA_FO			[U4.23.01]
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	META_EP	[U4.32.01]
CALC_ELEM	OPTION	EPSI_ELNO_DEPL		[U4.61.01]
RECU_CHAMP	NOM_CHAM	VARI_ELNO_ELGA		[U4.62.01]

4 Résultats de la modélisation A

4.1 Valeurs testées

Identification	Référence	Aster	% différence
ε_{zz}^p t = 47 s	0	0	0
χ t = 47 s	0	0	0
σ t = 47 s	282. 10 ⁶	282. 10 ⁶	0
ε_{zz} t = 47 s	-4.1125 10 ⁻³	-4.1125 10 ⁻³	0
ε_{zz}^p t = 48 s	3.2653 10 ⁻³	3.26537 10 ⁻³	0.011
χ t = 48 s	1	1	0
σ t = 48 s	288. 10 ⁶	288. 10 ⁶	0
ε_{zz} t = 48 s	-9.3469 10 ⁻⁴	-9.34645 10 ⁻⁴	0.005
ε_{zz}^p t = 60 s	0.04	0.04	0
ε_{zz}^p t = 64 s	0.040	4.0 10 ⁻²	0
χ t = 64 s	0	0	0
σ t = 64 s	360. 10 ⁶	360. 10 ⁶	0
ε_{zz} t = 64 s	3.4683 10 ⁻²	3.46908 10 ⁻²	0.023
ε_{zz}^p t = 114 s	0.04107	4.10688 10 ⁻²	+0.004
χ t = 114 s	1	1	0
σ t = 114 s	360. 10 ⁶	360. 10 ⁶	0
ε_{zz} t = 114 s	0.03684	3.68407 10 ⁻²	0
ε_{zz}^p t = 176 s	0.06206	6.20680 10 ⁻²	0.000

4.2 Remarques

Dans cette modélisation :

$$\varepsilon_{zz}^{pt}(T, Z) = 0$$

4.3 Paramètres d'exécution

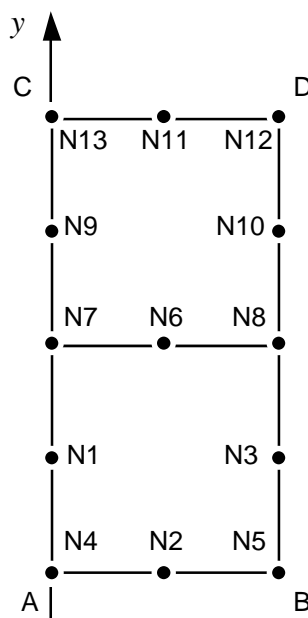
Version : 4.02.14

Machine : CRAY C90

Encombrement mémoire : 8 mégamots Temps CPU User : 109.3 secondes

5 Modélisation B

5.1 Caractéristiques de la modélisation



A = N4, B = N5, C = N13, D = N12.

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de noeuds : 13

Nombre de mailles et types : 2 mailles QUAD8, 6 mailles SEG3

5.3 Fonctionnalités testées

Commandes				Clés
DEFI_MATERIAU	META_THER			[U4.23.01]
THER_LINEAIRE	OPTION	META_ELGA_TEMP		[U4.23.05]
DEFI_MATERIAU	META_MECA_FO			[U4.23.01]
	META_PT			
STAT_NON_LINE	COMP_INCR	RELATION	META_EP_PT	[U4.32.01]
CALC_ELEM	OPTION	EPSI_ELNO_DEPL		[U4.61.01]
RECU_CHAMP	NOM_CHAM	VARI_ELNO_ELGA		[U4.62.01]

6 Résultats de la modélisation B

6.1 Valeurs testées

Identification	Référence	Aster	% différence
ε_{zz}^p t = 47 s	0	0	0
χ t = 47 s	0	0	0
σ t = 47 s	$282. \cdot 10^6$	$282. \cdot 10^6$	0
ε_{zz} t = 47 s	$-4.1125 \cdot 10^{-3}$	$-4.1125 \cdot 10^{-3}$	0
ε_{zz}^p t = 48 s	$3.2653 \cdot 10^{-3}$	$3.26535 \cdot 10^{-3}$	0.011
χ t = 48 s	1	1	0
σ t = 48 s	$288. \cdot 10^6$	$288. \cdot 10^6$	0
ε_{zz} t = 48 s	$-9.3469 \cdot 10^{-4}$	$-9.34644 \cdot 10^{-4}$	-0.005
ε_{zz}^p t = 60 s	0.04	0.04	0
ε_{zz}^p t = 64 s	0.04	$4.0 \cdot 10^{-2}$	0
χ t = 64 s	0	0	0
σ t = 64 s	$360. \cdot 10^6$	$359.99 \cdot 10^6$	-0.004
ε_{zz} t = 64 s	$4.00085 \cdot 10^{-2}$	$4.000268 \cdot 10^{-2}$	-0.015
ε_{zz}^p t = 114 s	0.041071	$4.10751 \cdot 10^{-2}$	+0.004
χ t = 114 s	1	1	0
σ t = 114 s	$360. \cdot 10^6$	$360.01 \cdot 10^6$	0.000
ε_{zz} t = 114 s	0.072841	$7.144112 \cdot 10^{-2}$	-1.915
ε_{zz}^p t = 176 s	0.06206	$6.2066 \cdot 10^{-2}$	0.000

6.2 Remarques

Dans cette modélisation, on prend en compte le terme dû à la plasticité de transformation :

$$\dot{\varepsilon}^{pt}(T, Z) \neq 0 \quad \text{lorsque } \dot{Z} \neq 0$$

6.3 Paramètres d'exécution

Version : 4.02.14

Machine : CRAY C90

Encombrement mémoire : 8 mégamots Temps CPU User : 114.11 secondes

7 Synthèse des résultats

Les résultats trouvés avec le Code_Aster sont très satisfaisants, avec des pourcentages d'erreur inférieurs à 0.025% sauf pour la déformation à l'instant 114 s où l'erreur atteint 2% pour la modélisation B.