HSNV140 - Thermo-plasticité avec restauration d'écrouissage : essai de dilatométrie bloquée

Résumé :

Ce test de thermo-mécanique quasi-statique non linéaire consiste à appliquer plusieurs cycles de chargement thermique sur une éprouvette en acier 316L. Deux extrémités de l'éprouvette sont bloquées en déplacement. Ce type d'essai est également connu sous le nom d'essai Satoh.
Dans cet essai, l'incompatibilité des déformations entraîne une plasticité cyclique en traction-compression et des contraintes résiduelles apparaissent. Le phénomène de restauration d'écrouissage, présent à haute température, doit être pris en compte sans quoi les contraintes résiduelle seront mal estimées.

L'objectif de ce cas test est de valider la prise en compte du phénomène de restauration d'écrouissage pour des lois de comportement élasto-plastiques à écrouissage isotrope, cinématique et mixte.

Un écrouissage isotrope linéaire est considéré dans les modélisation A, B et C, respectivement en 3D, 2D axi-symétrique et 2D contraintes planes.

La loi à écrouissage cinématique linéaire est appliquée dans la modélisation D, en 2D axi-symétrique.

La modélisation E teste l'écrouissage mixte linéaire en 2D contraintes planes.

Les modélisations F et G testent un écrouissage mixte (cinématique non-linéaire et isotrope) en 3D.

Dans les modélisations A, B, C, D, F et G, le coefficient de restauration d'écrouissage varie en fonction de la température.

Dans la modélisation E, le coefficient de restauration d'écrouissage est une fonction de la température et du temps.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

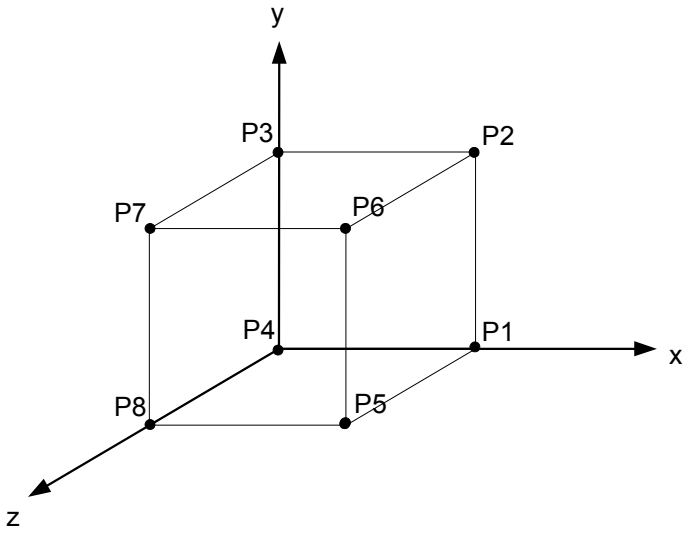
Les résultats numériques sont confrontés aux résultats expérimentaux.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Cylindre axi-symétrique (modélisations B et D) ou plaque rectangulaire (modélisations B et E) ou parallélépipède 3D (modélisation A)



1.2 Propriétés de matériaux

Les propriétés matériaux sont celles de l'acier 316L, décrites par les paramètres suivants :

Paramètres thermiques :

Capacité calorifique volumique $\rho C_p = 3.9 \times 10^6 \left(J.m^{-3.} \circ C^{-1} \right)$

Conductivité $\lambda \left(W.m^{-1} \circ C^{-1} \right)$:

T(°C)	λ
20.	14.
100.	15.2
200.	16.6
300.	17.9
400.	19.0
500.	20.6
600.	21.8
700.	23.1
800.	24.3
900.	26.
1000.	27.3
1200.	29.9
1450.	35.
1500.	70.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Paramètres thermo-mécaniques :

- Paramètres thermo-élastiques :

  Module d'Young $E(Pa)$
  Coefficient de Poisson : $\nu = 0.3$
  Coefficient de dilatation thermique α
  Température de définition du coefficient de dilatation : $T_{ref} = 20\,°C$
  Limite d'élasticité $\sigma_y(Pa)$

T(°C)	$E(\times 10^6)$
20.	195600.
100.	191200.
200.	185700.
300.	179600.
400.	172600.
500.	164500.
600.	155000.
700.	144100.
800.	131400.
900.	116800.
1000.	100000.
1100.	80000.
1200.	57000.
1300.	30000.
1400.	2000.
1500.	1000.

T(°C)	$\alpha(\times 10^{-6})$
20.	14.56
100.	15.39
200.	16.21
300.	16.86
400.	17.37
500.	17.78
600.	18.12
700.	18.43
800.	18.72
900.	18.99
1000.	19.27
1100.	19.53
1200.	19.79
1300.	20.02
1600.	20.02

T(°C)	$\sigma_y(\times 10^6)$
20.	286.
200.	212.
400.	180.
600.	137.
800.	139.
1000.	70.
1100.	35.
1200.	16.
1300.	10.
1500.	10.

- Paramètres thermo-plastiques :
  - Lois à écrouissage linéaire :

    Module tangent $E_T(Pa)$
    Constante de Prager $C(Pa)$ (écrouissage mixte)

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

T(°C)	$E_T(\times 10^6)$
20.	2400.
700.	2400.
800.	2350.
900.	1500.
1000.	800.
1100.	725.
1200.	150.
1300.	10.

T(°C)	$C(\times 10^6)$
20.	1200.
700.	1200.
800.	1175.
900.	750.
1000.	400.
1100.	362.5
1200.	75.
1300.	5.

- Lois à écrouissage isotrope et cinématique non-linéaire :

  • Paramètres de la loi VMIS_CIN1_CHAB (une seule variable cinématique) :

T(°C)	R_0(×10⁶)	R_I(×10⁶)	B	C_I(×10⁶)	K	W	G_0	A_I
20.	138.	1154.	2.74	96063.	1.	0	727.6	0
275.	136.	966.	2.74	60000.	1.	0	727.6	0
550.	92.	818.	2.74	45453.	1.	0	727.6	0
750.	80.	800.	2.74	30000.	1.	0	727.6	0
900.	78.	712.	2.74	188528.	1.	0	727.6	0
1000.	67.	139.	2.74	95582.	1.	0	727.6	0

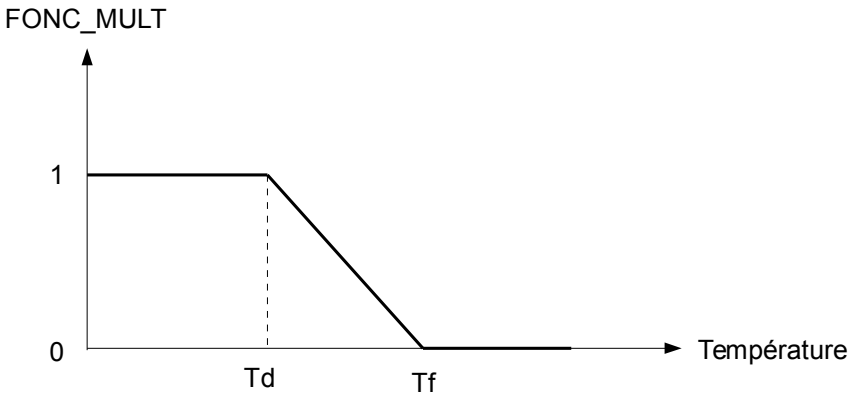
  • Paramètres de la loi VMIS_CIN2_CHAB (deux variables cinématiques) :

T(°C)	R_0(×10⁶)	R_I(×10⁶)	B	C1_I(×10⁶)	C2_I(×10⁶)	K	W	G1_0	G2_0	A_I
20.	125.6	153.4	6.9	156435.	6134.	1.	0	1410.9	47.19	0
275.	97.6	154.7	6.9	100631.	5568.	1.	0	1410.9	47.19	0
550.	90.9	150.6	6.9	64314.	5227.	1.	0	1410.9	47.19	0
750.	71.4	57.9	6.9	56232.	4108.	1.	0	1410.9	47.19	0
900.	67.4	57.9	6.9	48298.	1147.	1.	0	1410.9	47.19	0
1000.	59.6	57.9	6.9	30857.	1.1	1.	0	1410.9	47.19	0

• Paramètre de restauration d'écrouissage : fonction multiplicative FONC_MULT

Température de début de restauration : Td = 600°C
Température de fin de restauration : Tf = 1000°C

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)



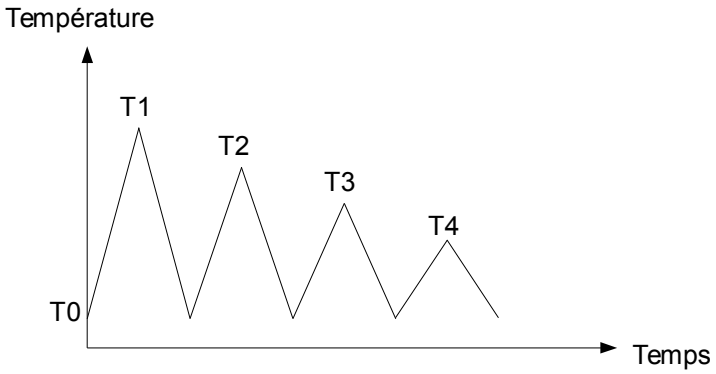
1.3 Conditions aux limites et chargements

- Modélisation A :
  uy = 0 sur les faces (P1P4P8P5) et (P2P3P7P6)
  ux = 0 et uz =0 en P4
  ux = 0 en P3

- Modélisations B et D :
  uy = 0 en P1, P2, P3 et P4

- Modélisations C et E :
  uy = 0 aux points P1, P2, P3 et P4
  ux = 0 en P3

Pour les 7 modélisations A-G, le chargement thermique suivant est appliqué sur tout le maillage :



T0	20°C
T1	1125°C
T2	932°C
T3	685°C
T4	473°C

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2 Solution de référence

2.1 Nature de la solution de référence

La solution de référence est extraite d'essais expérimentaux décrits dans [1].

2.2 Résultats de référence

On s'intéressera aux valeurs de la contrainte σ_{yy} en fin de chaque cycle thermique, et aux valeurs de la déformation plastique cumulée p et de la composante X_{11} du tenseur d'écrouissage cinématique X en fin de restauration d'écrouissage.

2.3 Incertitude sur la solution

Valeurs expérimentales pour σ_{yy} .
Test informatique pour p et X_{11} .

2.4 Références bibliographiques

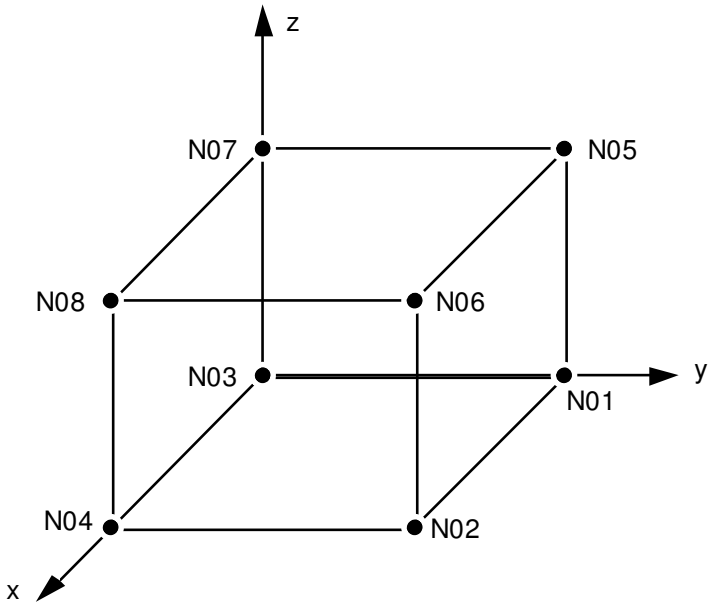
[1] L. DEPRADEUX, Simulation numérique du soudage en vue de la prédiction des distorsions et contraintes résiduelles – validation expérimentale sur cas tests de référence – Acier 316L, Thèse de Doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur le noeud N07, DX=DY=0
Sur le noeud N03, DX=DY=DZ=0
Sur les noeuds (N01, N02, N04, N05, N06, N08), DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de VonMises avec écrouissage isotrope linéaire (mot clé 'RELATION = VMIS_ISOT_LINE').

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8
Nombre de mailles et type : 1 HEXA8

3.3 Grandeurs testées et résultats

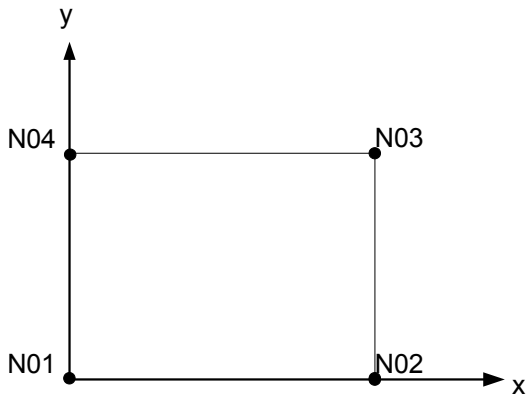
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D axi-symétrique.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur les noeuds (N01, N02, N03, N04), DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Von Mises avec écrouissage isotrope linéaire (mot clé 'RELATION = VMIS_ISOT_LINE').

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4
Nombre de mailles et type : 1 QUAD4

4.3 Grandeurs testées et résultats

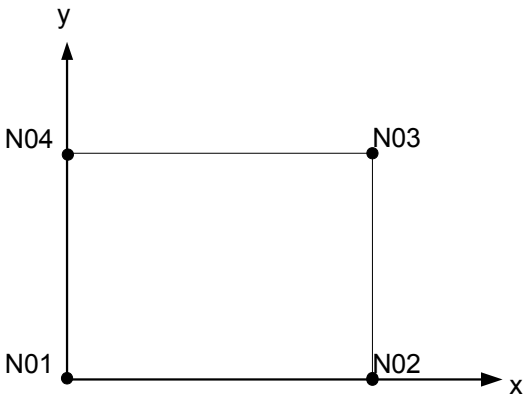
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D contraintes planes.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur les noeuds (N01, N02, N03), DY=0.
Sur le noeud N04, DX=DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Von Mises avec écrouissage isotrope linéaire (mot clé 'RELATION = VMIS_ISOT_LINE').

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4
Nombre de mailles et type : 1 QUAD4

5.3 Grandeurs testées et résultats

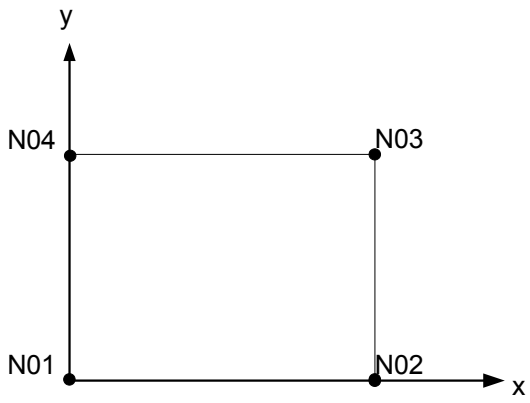
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D axi-symétrique.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur les noeuds (N01, N02, N03, N04), DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Von Mises avec écrouissage cinématique linéaire (mot clé 'RELATION = VMIS_CINE_LINE').

6.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4
Nombre de mailles et type : 1 QUAD4

6.3 Grandeurs testées et résultats

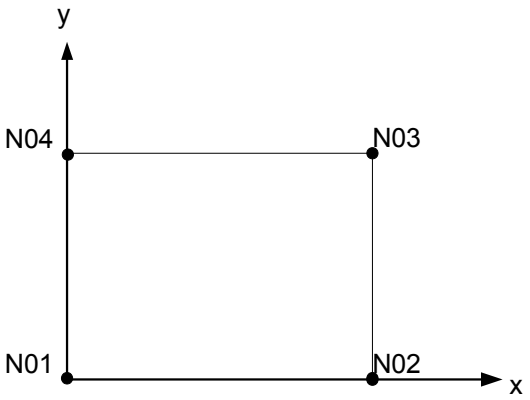
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
X_{11}	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 2D contraintes planes.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur les noeuds (N01, N02, N03), DY=0.
Sur le noeud N04, DX=DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Von Mises avec écrouissage mixte linéaire (mot clé 'RELATION = VMIS_ECMI_LINE').

7.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 4
Nombre de mailles et type : 1 QUAD4

7.3 Grandeurs testées et résultats

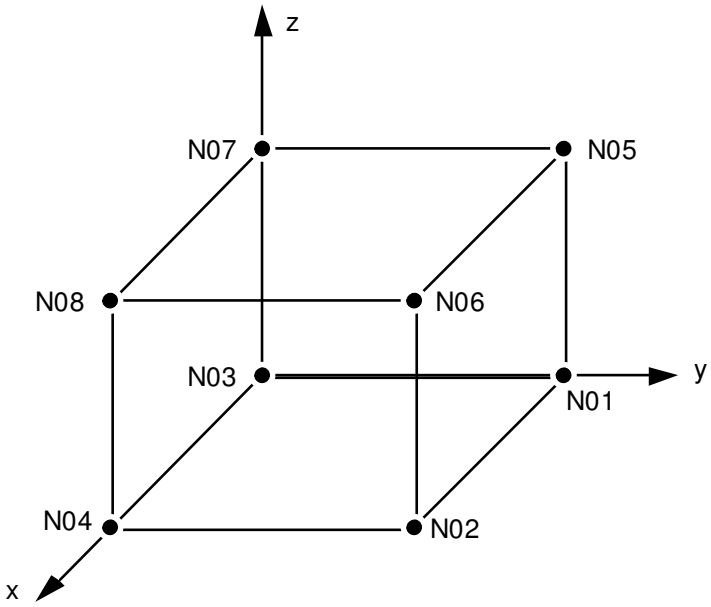
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur le noeud N07, DX=DY=0
Sur le noeud N03, DX=DY=DZ=0
Sur les noeuds (N01, N02, N04, N05, N06, N08), DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Chaboche à écrouissage cinématique non linéaire et isotrope, à une variable cinématique (mot clé 'RELATION = VMIS_CIN1_CHAB').

8.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8
Nombre de mailles et type : 1 HEXA8

8.3 Grandeurs testées et résultats

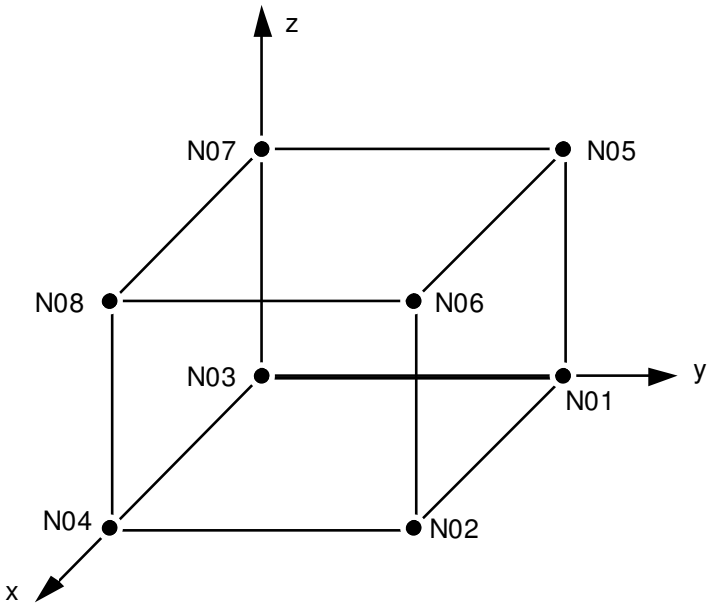
Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	10.

9 Modélisation G

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation 3D.



Les conditions aux limites sont modélisés par :

Sur le noeud N07, DX=DY=0
Sur le noeud N03, DX=DY=DZ=0
Sur les noeuds (N01, N02, N04, N05, N06, N08), DY=0.

Le calcul mécanique est réalisé avec la loi de comportement élasto-plastique de Chaboche à écrouissage cinématique non linéaire et isotrope, à deux variables cinématiques (mot clé 'RELATION = VMIS_CIN2_CHAB').

9.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 8
Nombre de mailles et type : 1 HEXA8

9.3 Grandeurs testées et résultats

Variables	Instants (s)	Type de Référence	Référence	% tolérance
p	89	SOURCE_EXTERNE	0	$1.E^{-4}$
σ_{yy}	200	SOURCE_EXTERNE	303.0E+06	10.
σ_{yy}	400	SOURCE_EXTERNE	316.0E+06	10.
σ_{yy}	600	SOURCE_EXTERNE	325.0E+06	10.
σ_{yy}	800	SOURCE_EXTERNE	327.0E+06	12.

10 Synthèse des résultats

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Les résultats sont satisfaisants : la prise en compte de la restauration d'écrouissage permet d'obtenir une bonne approximation des contraintes dans le cas d'un essai de dilatométrie bloquée.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)