HSNV125 - Élément de volume en traction / cisaillement et température variables

Résumé :

Ce test, proposé par l'IPSI pour la journée Phi2As du 30 Mars 2000 sur les comportements non linéaires permet de valider la bonne prise en compte de la variation des coefficients avec la température pour trois modèles de comportement élastoplastiques (plasticité parfaite, écrouissage cinématique linéaire, et écrouissage cinématique non linéaire) et un modèle élasto-visco-plastique en 3D, et de montrer la capacité de ces modèles à mettre en évidence un effet de rochet ou d'accommodation.

On teste également le modèle VMIS_CIN2_MEMO, permettant de prendre en compte l'effet de mémoire maximum d'écrouissage, avec des paramètres choisis pour correspondre à VMIS_CIN2_CHAB.

Cinq modélisations permettent de valider chacun de ces comportements. Deux modélisations supplémentaires permettent de tester d'une part l'optimisation du pas de temps en chargement thermique, et d'autre part le mot clé TEMP_DEF_ALPHA.

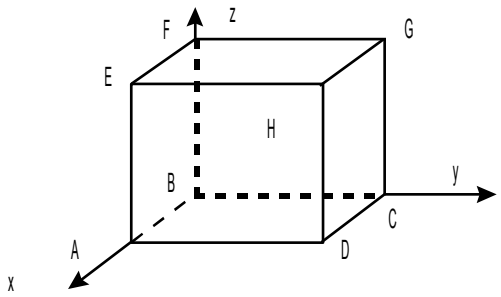
Les solutions de référence sont numériques. Elles sont obtenues avec le code Zébulon™.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Élément de volume matérialisé par un cube de côté unitaire ($1\,mm$) :



1.2 Propriétés des matériaux

Module d'Young : $E(T)=2.10^5-10^5\left(\frac{T-100}{960}\right)^2$ (en MPa) T en °celcius

Coefficient de Poisson : $n=0.3$,
Coefficient de dilatation thermique sécant défini à partir de $20\,°C$:

$$\alpha(T)=10^{-5}+10^{-5}\left(\frac{T-100}{960}\right)^4 \text{ (en } °C^{-1}\text{)}$$

Le matériau est élastoplastique avec différents types de comportement :

$C1$: Plasticité parfaite :

$$\sigma_y(T)=500-25\left(\frac{T-100}{96}\right) \text{ (en } MPa\text{)}$$

$C2$: Écrouissage cinématique linéaire : (expression uniaxiale)

$$(\sigma-X)_{eq}=\sigma_y(T)$$
$$X=\frac{2}{3}C(T)\varepsilon^P$$
$$\sigma_y(T)=100 \text{ (en } MPa\text{)}$$
$$C(T)=40000-3500\left(\frac{T-100}{96}\right) \text{ (en } MPa\text{)}$$

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

$C3$: Écrouissage cinématique non linéaire : (expression uniaxiale)

$$(\sigma - X)_{eq} = \sigma_y(T)$$
$$X = \frac{2}{3} C(T)\alpha$$
$$\dot{\alpha} = \dot{\varepsilon}^P - D(T)\alpha\,\dot{p}$$
$$\sigma_y(T) = 100 \quad \text{(en } MPa\text{)}$$
$$C(T) = 2.10^6 - 192500\left(\frac{T-100}{96}\right) \quad \text{(en } MPa\text{)}$$
$$D(T) = 5000 - 450\left(\frac{T-100}{96}\right)$$

$C4$: Viscoplasticité à écrouissage cinématique non linéaire : (expression uniaxiale)

$$(\sigma - X)_{eq} = R(T, p) + \sigma_v(T)$$
$$X = \frac{2}{3} C(T)\alpha$$
$$\dot{\alpha} = \dot{\varepsilon}^P - D(T)\alpha\,\dot{p}$$
$$\dot{p} = \left\langle \frac{(\sigma - X)_{eq} - R(T, p)}{K} \right\rangle^n$$
$$R(p, T) = Q(t)\left(1 - e^{-b(t)\,p}\right) + \sigma_y(T)$$
$$\sigma_y(T) = 200 \quad \text{(en } MPa\text{)},\ Q(t) = -100,\ b(t) = 20$$
$$C(T) = 1.10^6 - 98500\left(\frac{T-100}{96}\right)$$
$$K(T) = 300 - 300\left(\frac{T-700}{700}\right) \quad \text{(en } MPa\text{)}$$
$$n(T) = 7 - \left(\frac{T-100}{160}\right)$$
$$D(T) = 5000 - 5(T-100)$$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Tels que les états de contraintes et de déformation soient uniformes dans l'élément de volume :

- Point B bloqué en x, y et z. Point A bloqué en z, $Dx = 0$ sur la face $ADHE$
- Déplacement imposé sur la face $BCFG$: Dx

Forces tangentielles réparties Fc produisant un état de cisaillement constant dans le cube SIXY :

- Fy sur les faces $ADHE$ et $BCFG$
- Fx sur les faces $DCHG$ et $ABEF$.

Température uniforme $T(t)$ sur le cube. La température de référence vaut $20\,°C$.
Dx, Fc et T varient en fonction du temps de la façon suivante :

instant $t(s)$	0	1	61	121	181	241	301	361	421	481
$Fc(t)$ (Mpa)	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
$Dx(t)$ (mm)	0	0	–0.02	0	–0.02	0	–0.02	0	–0.02	0
$T(t)$ ($°C$)	1060	1060	100	1060	100	1060	100	1060	100	1060

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

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Résultats numériques obtenus avec le code Zébulon™ et proposés comme solutions de référence pour la journée ϕ^2As [bib1].

2.2 Résultats de référence

Évolution de la contrainte axiale SIXX, de la déformation axiale EPXX et de la déformation de cisaillement EPXY (en un point quelconque du volume car les champs y sont homogènes) en fonction du temps pour le dernier cycle.

Remarque :

La déformation EPXX indiquée en référence est la déformation à partir de l'instant 0. Dans Code_Aster, on effectue un calcul préliminaire à partir d'un instant où la température est égale à la température de référence. On ajoute donc la déformation correspondante (0.0208) à EPXX.

plasticité parfaite	**Instant (s)**	**SIXX (Mpa)**	**EPXX**	**EPXX tot**	**EPXY**
	421	–469.15	$-2\ 10^{-2}$	$8\ 10^{-4}$	$1.4658\ 10^{-2}$
maximum local de SIXX	447.4	349.52			$1.4832\ 10^{-2}$
	461.8	281			$1.5527\ 10^{-2}$
	478.6	–195.84			$1.6161\ 10^{-2}$
fin du cycle	481	–180.52	0	$2.08\ 10^{-2}$	$1.7483\ 10^{-2}$
écr. ciné. linéaire	**Instant (s)**	**SIXX (Mpa)**	**EPXX**	**EPXX tot**	**EPXY**
	421	–72.91	$-2\ 10^{-2}$	$8\ 10^{-4}$	$5.4288\ 10^{-3}$
maximum local de SIXX	453.4	200.68			$5.5542\ 10^{-3}$
	461.8	188.66			$5.7411\ 10^{-3}$
	471.4	5.84			$5.9022\ 10^{-3}$
fin du cycle	481	–75.29	0	$2.08\ 10^{-2}$	$8.2185\ 10^{-3}$
écr. ciné. non linéaire	**Instant (s)**	**SIXX (Mpa)**	**EPXX**	**EPXX tot**	**EPXY**
	421	–414.63	$-2\ 10^{-2}$	$8\ 10^{-4}$	$1.1528\ 10^{-2}$
maximum local de SIXX	454.6	369.6			$1.2022\ 10^{-2}$
	465.4	284.24			$1.2302\ 10^{-2}$
	472.6	79.88			$1.2471\ 10^{-2}$
fin du cycle	481	–118.65	0	$2.08\ 10^{-2}$	$1.5157\ 10^{-2}$
écr. ciné. non linéaire	**Instant (s)**	**SIXX (Mpa)**	**EPXX**	**EPXX tot**	**EPXY**
	421	–337.04	$-2\ 10^{-2}$	$8\ 10^{-4}$	$1.4608\ 10^{-2}$
maximum local de SIXX	449.8	320.54			$1.5251\ 10^{-2}$
	465.4	211.13			$1.5917\ 10^{-2}$
	473.8	-31.97			$1.6086\ 10^{-2}$
fin du cycle	481	–89.69	0	$2.08\ 10^{-2}$	$1.9981\ 10^{-2}$

On teste aussi le maximum en élasticité de $SIXX = 884.234\,MPa$ pour une température de $668.2\,°C$.

2.3 Précision sur les résultats de référence

Les résultats dépendant fortement de la discrétisation temporelle, on peut estimer la précision de la solution, obtenue pour une discrétisation fine, à 1%.

2.4 Références bibliographique

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

[1] IPSI : journée d'étude ϕ^2As du 30 mars 2000 : comportements non linéaires des matériaux.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Comportement CI : plasticité parfaite, en 3D. 1 pas de temps entre $t=-1$ et $t=0$, 10 pas de temps entre $t=0$ et $t=1$ et 1 pas de temps par seconde ensuite.

3.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8

3.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)	Référence
SIXX NŒUD 1	421	–469.15
SIXX NŒUD 1	447.4	349.52
SIXX NŒUD 1	461.8	281
SIXX NŒUD 1	478.6	–195.84
SIXX NŒUD 1	481	–180.52

Déformation EPXX	Instant(s)	Référence
EPXX NŒUD 1	421	$8\ 10^{-4}$
EPXX NŒUD 1	481	$2.08\ 10^{-2}$

Déformation EPXY	Instant(s)	Référence
EPXY NŒUD 1	421	$1.4658\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	447.4	$1.4832\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	461.8	$1.5527\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	478.6	$1.6161\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	481	$1.7483\ 10^{-2}$

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Comportement $C2$: écrouissage cinématique linéaire, en 3D (comportement VMIS_CINE_LINE). 972 pas de temps au total (1 pas correspond à 0.5 seconde). On simule aussi ce comportement avec VMIS_CIN1_CHAB. Les résultats sont identiques.

4.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8.

4.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)	Référence
SIXX NŒUD 1	421	–72.91
SIXX NŒUD 1	453.4	200.68
SIXX NŒUD 1	461.8	188.66
SIXX NŒUD 1	471.4	5.84
SIXX NŒUD 1	481	–75.29

Déformation EPXX	Instant(s)	Référence
EPXX NŒUD 1	421	$8\ 10^{-4}$
EPXX NŒUD 1	481	$2.08\ 10^{-2}$

Déformation EPXY	Instant(s)	Référence
EPXY NŒUD 1	421	$5.4288\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	453.4	$5.5542\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	461.8	$5.7411\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	471.4	$5.9022\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	481	$8.2185\ 10^{-3}$

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Comportement $C3$: écrouissage cinématique non linéaire en 3D. Il est modélisé avec les comportements VMIS_CIN1_CHAB et VMIS_CIN2_CHAB, qui donnent le même résultat.

5.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)		Référence
SIXX NŒUD 1	421	–414.63	
SIXX NŒUD 1	454.6	369.6	
SIXX NŒUD 1	465.4	284.24	
SIXX NŒUD 1	472.6	79.88	
SIXX NŒUD 1	473		-
SIXX NŒUD 1	481	–118.65	
Déformation EPXX	**Instant(s)**		**Référence**
EPXX NŒUD 1	421	$8\ 10^{-4}$	
EPXX NŒUD 1	481	$2.08\ 10^{-2}$	
Déformation EPXY	**Instant(s)**		**Référence**
EPXY NŒUD 1	421	$1.1528\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	454.6	$1.2022\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	465.4	$1.2302\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	472.6	$1.2471\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	481	$1.5157\ 10^{-2}$	

Comportement	Valeur testée	Instant(s)	Référence
VMIS_CIN1_CHAB	SIXX	24	581.5
	SIXX	61	–273.45
	SIXX	91	404.2
	SIXX	121	–117.1
	EPXY	61	$2.232\ 10^{-3}$
	EPXY	121	$6.017\ 10^{-3}$
VMIS_CIN2_CHAB	SIXX	24	581.5
	SIXX	61	–273.45
	SIXX	91	404.2
	SIXX	121	–117.1
	EPXY	61	$2.232\ 10^{-3}$
	EPXY	121	$6.017\ 10^{-3}$

Tableau 5.3-1: Valeurs de non régression au premier cycle

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Comportement $C4$: viscoplasticité à écrouissage cinématique non linéaire en 3D. Il est modélisé avec le comportement viscochab.

6.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8.

6.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)		Référence
SIXX NŒUD 1	481	-337.04	
SIXX NŒUD 1	510	320.54	
SIXX NŒUD 1	525	211.13	
SIXX NŒUD 1	534	-31.97	
SIXX NŒUD 1	579	-89.79	

Déformation EPXX	Instant(s)		Référence
EPXX NŒUD 1	481	$8\ 10^{-4}$	
EPXX NŒUD 1	579	$2.08\ 10^{-2}$	

Déformation EPXY	Instant(s)		Référence
EPXY NŒUD 1	481	$1.4608\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	510	$1.5251\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	525	$1.5917\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	534	$1.6086\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	579	$1.9981\ 10^{-2}$	

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Comportement VMIS_CIN2_MEMO : écrouissage cinématique non linéaire, pouvant prendre en compte l'effet de mémoire maxi d'écrouissage. Il est comparé avec les comportements VMIS_CIN1_CHAB et VMIS_CIN2_CHAB.
Les paramètres gérant l'effet de mémoire sont :

- $ETA=0.5$
- $Q0=Qm=0$
- $Mu=0$

Ce qui conduit à effectuer tous les calculs relatifs à l'effet de mémoire sans modifier les résultats en comparaison de VMIS_CIN2_CHAB.

7.2 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)	Référence	*Code_Aster*	% diff
SIXX NŒUD 1	421	–414.63	–415.03	0.1
SIXX NŒUD 1	454.6	369.6	369.52	-0.02
SIXX NŒUD 1	465.4	284.24	290.9 (t=465)	2.3
SIXX NŒUD 1	472.6	79.88	Pas de résultat à cet instant	-
SIXX NŒUD 1	473	-	65.45	non régression
SIXX NŒUD 1	481	–118.65	–118.98	0.3

Déformation EPXX	Instant(s)	Référence
EPXX NŒUD 1	421	$8\ 10^{-4}$
EPXX NŒUD 1	481	$2.08\ 10^{-2}$

Déformation EPXY	Instant(s)	Référence
EPXY NŒUD 1	421	$1.1528\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	454.6	$1.2022\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	465.4	$1.2302\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	472.6	$1.2471\ 10^{-2}$
EPXY NŒUD 1	481	$1.5157\ 10^{-2}$

Comportement	Valeur testée	Instant(s)	Référence
VMIS_CIN2_MEMO	SIXX	24	581.5
	SIXX	61	–273.45
	SIXX	91	404.2
	SIXX	121	–117.1
	EPXY	61	$2.232\ 10^{-3}$
	EPXY	121	$6.017\ 10^{-3}$

Tableau 7.2-1: Valeurs de non régression au premier cycle

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

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation est identique à la modélisation B : Comportement C2 : écrouissage cinématique linéaire, en 3D (comportement VMIS_CINE_LINE). 972 pas de temps au total (1 pas correspond à 0.5 seconde).
La modélisation sert à tester le mot clé TEMP_DEF_ALPHA : le coefficient de dilatation sécant est transformé de façon à être défini à partir de TEMP_DEF_ALPHA= $Tdef = -100\,°C$: au lieu d'utiliser $\alpha(T)$ défini auparavant : $\alpha(T) = 10^{-5} + 10^{-5}\left(\frac{T-100}{960}\right)^4$ (en $°C^{-1}$)

on utilise $\alpha_{tdef}(T)$ avec :

$$\alpha_{tdef}(T) = \frac{\alpha(T)(T - T_{ref}) + \alpha(T_{Def})(T_{ref} - T_{Def})}{(T - T_{Def})} = \frac{\alpha(T)(T-20) + \alpha(-100)(20-(-100))}{(T-(-100))}$$

Cette transformation ne doit pas changer les résultats, qui doivent rester identiques à la modélisation B.

8.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8.

8.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	Instant(s)	Référence
SIXX NŒUD 1	421	–72.91
SIXX NŒUD 1	453.4	200.68
SIXX NŒUD 1	461.8	188.66
SIXX NŒUD 1	471.4	5.84
SIXX NŒUD 1	481	–75.29

Déformation EPXX	Instant(s)	Référence
EPXX NŒUD 1	421	$8\ 10^{-4}$
EPXX NŒUD 1	481	$2.08\ 10^{-2}$

Déformation EPXY	Instant(s)	Référence
EPXY NŒUD 1	421	$5.4288\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	453.4	$5.5542\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	461.8	$5.7411\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	471.4	$5.9022\ 10^{-3}$
EPXY NŒUD 1	481	$8.2185\ 10^{-3}$

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

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Les données de cette modélisation est identique à la modélisation D : Comportement $C4$: écrouissage cinématique non linéaire, viscosité, en 3D, mais avec le comportement VISC_CIN1_CHAB. 579 pas de temps au total (60 pas par cycle).

9.2 Caractéristiques du maillage

Le maillage comporte une maille HEXA8.

9.3 Grandeurs testées et résultats

Contrainte SIXX (MPa)	**Instant(s)**		**Référence**
SIXX NŒUD 1	481	-337.04	
SIXX NŒUD 1	510	320.54	
SIXX NŒUD 1	525	211.13	
SIXX NŒUD 1	534	-31.97	
SIXX NŒUD 1	579	-89.79	
Déformation EPXX	**Instant(s)**		**Référence**
EPXX NŒUD 1	481	$8\ 10^{-4}$	
EPXX NŒUD 1	579	$2.08\ 10^{-2}$	
Déformation EPXY	**Instant(s)**		**Référence**
EPXY NŒUD 1	481	$1.4608\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	510	$1.5251\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	525	$1.5917\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	534	$1.6086\ 10^{-2}$	
EPXY NŒUD 1	579	$1.9981\ 10^{-2}$	

Les écarts relativement importants sont dus à la discrétisation en temps (relativement grossière ici, permettant le calcul complet en $60s$ environ). En raffinant le pas de temps, la convergence est bonne.

Les tests sont doublés dans le fichier de commandes de tests de non régression.

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

10 Synthèse des résultats

Ce test permet de mettre en évidence les effets de chargements cycliques (accommodation ou rochet) avec variation des coefficients des comportements élastoplastiques avec la température.

Ce test permet donc de valider l'intégration des comportements VMIS_ISOT_LINE, VMIS_CINE_LINE, VMIS_CIN1_CHAB, VMIS_CIN2_CHAB, VISC_CIN1_CHAB, VMIS_CIN2_MEMO et VISCOCHAB par rapport à la variation des coefficients avec la température et la prise en compte des chargements cycliques.

Il permet de plus de valider la bonne prise en compte d'une température de définition du coefficient de dilatation sécant différente de la température de référence.

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