SSNL117 - Coude en flexion en élastoplasticité

Résumé :
Ce test valide la modélisation des phénomènes d'ovalisation dans les tuyauteries dans le domaine élastoplastique avec les éléments TUYAU : un coude, prolongé par des tuyaux droits est soumis à une flexion dans son plan. La tuyauterie est épaisse (de dimensions semblables aux coudes des circuits primaires). La solution de référence est numérique : elle est obtenue avec *Code_Aster* à l'aide d'un maillage $3D$ du coude (modélisation C).

Les deux premières modélisations permettent de valider les éléments TUYAU (avec des éléments droits et coudés à 3 nœuds pour la modélisation A et des éléments droits et coudés à 4 nœuds pour la modélisation B) en élastoplasticité.

Dans les modélisations B et C, un terme de rotation « globale », développé par EDF, CEA et FRAMATOME [bib2], pour les tuyauteries sous séisme, est introduit par l'intermédiaire d'une macro-commande Python.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Tuyauterie coudée dans le plan XY. Les parties droites ont pour longueur $L=1\,m$.
Le coude a pour rayon de courbure : $R_c=1.25\,m$

La section tubulaire a pour rayon moyen $r_{moy}=395.5\,mm$ et pour épaisseur $e=77\text{mm}$.

1.2 Propriétés des matériaux

Le matériau est élastoplastique avec écrouissage linéaire isotrope.

$E=2.\text{E11}\,Pa$

$\nu=0.3$

Limite d'élasticité $SIGY=200.10^6\,Pa$

Module d'écrouissage $\text{D_SIGM_EPSI}=2.10^{10}\,Pa$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Encastrement en A (degrés de liberté de poutre bloqués, mais degrés de liberté d'ovalisation libres).

Moment MZ imposé en D croissant :

Incrément 1 $Mz=3086702.1520853\,Nm$

10 incréments égaux jusqu'à :

Incrément 11 $Mz=7091146.5935484\,Nm$

1.4 Conditions initiales

Sans objet.

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

Comparaison à d'autres résultats numériques obtenus avec *Code_Aster* (version 14.2 [bib1]) avec un maillage $3D$ du coude et des parties droites, reliées aux extrémités à des poutres droites (modélisation C). Ce maillage $3D$ comporte 1500 mailles HEXA20. Une modélisation du coude en éléments COQUE_3D a donné des résultats comparables au calcul $3D$ (voir [§2.2]).
La modélisation B utilise le comportement MFront de type ***Plasticity*** à la place du comportement VMIS_ISOT_LINE de code_aster (référence calcul 3D).

On calcule également des quantités utiles pour la tenue sismique à l'aide des formules suivantes :

$$EN = \varepsilon_{xx} \tag{1}$$

$$ET = \frac{r_{moy} \times \gamma_{torsion}}{2} \tag{2}$$

$$EFY = r_{moy} \times \kappa_y \text{ et } EFZ = r_{moy} \times \kappa_z \tag{3}$$

$$ESTAR = \sqrt{EN^2 + ET^2 + \left(\frac{\pi \times EFY}{4}\right)^2 + \left(\frac{\pi \times EFZ}{4}\right)^2} \tag{4}$$

Calcul du deuxième type de quantités pour le séisme :

$$\lambda = \frac{e \times R_c}{r_{moy}^2} \tag{5}$$

et

$$k2 = max\left(1, \frac{1{,}65}{\lambda}\right) \text{ et } \gamma_c = \frac{8}{9}\lambda^{-\frac{2}{3}} \text{ et } \gamma = max\left(1, \gamma_c\right) \tag{6}$$

Avec :

$$EFY_2 = \frac{r_{moy} \times \kappa_y}{k2} \text{ et } EFZ_2 = \frac{r_{moy} \times \kappa_z}{k2} \tag{7}$$

Et :

$$ESTAR_2 = \sqrt{EN^2 + ET^2 + \left(\frac{\pi \times \gamma \times EFY}{4}\right)^2 + \left(\frac{\pi \times \gamma \times EFZ}{4}\right)^2} \tag{8}$$

2.2 Résultats de référence

Pour un moment appliqué Mz en D, le déplacement DY du même point D vaut [bib1] :

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

Moment	Dy point D (m) (3D)	Dy point D (m) (COQUE_3D)
0.	0.	0.
3.08670D+06	1.09257D–02	1.08875D–02
3.48715D+06	1.23431D–02	
3.88759D+06	1.37775D–02	1.37381D–02
4.28804D+06	1.52557D–02	
4.68848D+06	1.67908D–02	
5.08892D+06	1.83836D–02	
5.48937D+06	2.00903D–02	
5.88981D+06	2.20209D–02	
6.29026D+06	2.42545D–02	
6.69070D+06	2.68829D–02	
7.09115D+06	3.01030D–02	

2.3 Précision sur les résultats de référence

Du fait que la solution de référence est numérique, on peut évaluer la précision d'après [§2.2] à 2% par comparaison des solutions 3D et COQUE_3D.

2.4 Références bibliographique

[1] J.M. PROIX, A. BEN HAJ YEDDER : « Projet CACIP : étude d'une tuyauterie coudée en flexion ». Note EDF/DER HI-75/98/001/0
[2] C. BARATTE (SEPTEN), MN. BERTON, N. BLAY (CEA), F. LE BRETON (FRAMATOME-ANP) : « Projet de nouvelle codification des critères de dimensionnement sismique des tuyauteries ». Note EDF/SEPTEN E-N-ES-MS/01-01004-A.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La structure est maillée en éléments tuyaux (mailles SEG3, modélisation TUYAU).

3.2 Caractéristiques du maillage

20 mailles SEG3 (Le maillage est régulier : 10 éléments dans le coude, 5 dans chaque tuyau droit)

3.3 Grandeurs testées et résultats

Instant	Identification	Type de référence	Valeur de Référence	% Tolérance
1	Point D , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	1.09257D–02	3.
8	Point D , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	2.20209D–02	3.2
1	Point D , MZ (Nm)	'ANALYTIQUE'	3.086702E6	0.1
8	Point D , MZ (Nm)	'ANALYTIQUE'	5.889813E6	0.1
1	Point A , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	3.08670D+06	0.1
8	Point A , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	5.88981D+06	0.1

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

La structure est maillée en éléments tuyaux à 4 nœuds (mailles SEG4, modélisation TUYAU).

4.2 Caractéristiques du maillage

11 mailles SEG4 (5 éléments dans le coude, 3 dans chaque tuyau droit)

4.3 Calcul du terme de Rotation « Globale »

Ce terme de rotation « globale » a été développé dans le cadre d'une action tripartite EDF-CEA-FRAMATOME [bib2], en vue d'une intégration future dans le code de dimensionnement RCC-M.
Il s'exprime à partir des rotations de deux points représentatifs du coude (entrée et sortie), par :

$$R_G = \sqrt{\Delta R_x^2 + \Delta R_y^2 + \Delta R_z^2}$$

où

$$\Delta R_x = DRX_{sortiecoude} - DRX_{entréecoude}$$
$$\Delta R_y = DRY_{sortiecoude} - DRY_{entréecoude}$$
$$\Delta R_z = DRZ_{sortiecoude} - DRZ_{entréecoude}$$

Ce terme est calculé par la macro-commande Python MACR_ROTA_GLOBALE qui est intégrée dans le corps du fichier de commande. Le résultat de cette macro-commande est une fonction Aster de la rotation globale en fonction de l'instant. Un test de non-régression vient valider cette fonction.

4.4 Grandeurs testées et résultats

Tests par rapport au calcul 3D pour la rotation globale :

Instant	*Référence*	*Tolérance*
8	9.39907E–03	1,5 %

Instant	Identification	Type de référence	Valeur de Référence	% Tolérance
1	Point D , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	1.09257D–02	3.
8	Point D , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	2.20209D–02	3.2
1	Point D , MZ (Nm)	'ANALYTIQUE'	3.086702E6	0.1
8	Point D , MZ (Nm)	'ANALYTIQUE'	5.889813E6	0.1
1	Point A , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	3.08670D+06	0.1
8	Point A , DY (m)	'AUTRE_ASTER'	5.88981D+06	0.1

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

Tests de non régression pour les options de CALC_CHAMP ou POST_CHAMP :

Option	Composante	Maille	Point	Sous-point	Numéro d'ordre	Type de Référence	Précision
SIEQ_ELGA	VMIS	M1	2	61	1	NON_REGRESSION	-
SIEQ_ELGA	VMIS	M1	3	55	3	NON_REGRESSION	-
SIEQ_ELGA	VMIS_SG	M1	2	98	8	NON_REGRESSION	-
SIEQ_ELGA	VMIS_SG	M1	3	42	8	NON_REGRESSION	-
EPEQ_ELGA	INVA_2	M1	1	77	4	NON_REGRESSION	-
EPEQ_ELGA	INVA_2	M1	1	8	5	NON_REGRESSION	-
EPEQ_ELGA	INVA_2SG	M1	1	61	8	NON_REGRESSION	-
EPEQ_ELGA	INVA_2SG	M1	3	9	8	NON_REGRESSION	-

Tests des quantités spéciales pour le séisme au point D :

Incrément de charge		Type de Référence
$Mz=3.08670\,D+06\,Nm$	EN	NON_REGRESSION
$Mz=3.48715\,D+06\,Nm$	ET	NON_REGRESSION
$Mz=4.288041\,D+06\,Nm$	EFY	NON_REGRESSION
$Mz=5.489370\,D+06\,Nm$	EFZ	NON_REGRESSION
$Mz=5.889810\,D+06\,Nm$	$ESTAR$	NON_REGRESSION

Tests des quantités spéciales pour le séisme au point C :

Incrément de charge		Type de Référence
$Mz=3.08670\,D+06\,Nm$	EN	NON_REGRESSION
$Mz=3.48715\,D+06\,Nm$	ET	NON_REGRESSION
$Mz=4.288041\,D+06\,Nm$	EFY_2	NON_REGRESSION
$Mz=5.489370\,D+06\,Nm$	EFZ_2	NON_REGRESSION
$Mz=5.889810\,D+06\,Nm$	$ESTAR_2$	NON_REGRESSION

Validation de POST_CHAMP/MIN_MAX_SP sur l'option SIEQ_ELGA . Le type de référence est AUTRE_ASTER , pas par rapport au calcul 3D, mais au calcul de l'option SIEQ_ELGA par CALC_CHAMP .

Composante	Composante	Maille	Point	Numéro d'ordre	Valeur de référence	Tolérance
VMIS/MAXI	VALE	M3	1	1	1.0700867E8	2E-6
VMIS/MINI	VALE	M3	1	1	8.3875662E6	2E-6
VMIS/MAXI_ABS	VALE	M3	2	1	8.3938035E7	2E-6
VMIS/MINI_ABS	VALE	M3	2	1	70047.61	2E-6
VMIS/MAXI	NUCOU	M3	1	1	1.0	2E-6
VMIS/MAXI	NUSECT	M3	1	1	1.0	2E-6
VMIS/MAXI	POSIC	M3	1	1	-1.0	2E-6
VMIS/MAXI	POSIS	M3	1	1	-1.0	2E-6
VMIS/MAXI	VALE	M1	1	1	8.8409900E7	2E-6
VMIS/MINI	VALE	M1	1	1	5.883180E6	2E-6
VMIS/MAXI	NUCOU	M2	2	1	1.0	2E-6
VMIS/MINI	NUCOU	M3	3	1	1.0	2E-6
VMIS/MAXI	NUSECT	M4	1	1	12.0	2E-6
VMIS/MINI	NUSECT	M5	2	1	16.0	2E-6
VMIS/MAXI	POSIC	M6	3	1	-1.0	2E-6
VMIS/MINI	POSIC	M7	1	1	0	2E-6

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

VMIS/MAXI	POSIS	M8	2	1	1.0	2E-6
VMIS/MINI	POSIS	M9	3	1	1.0	2E-6
VMIS/MAXI	VALE	M1	2	4	1.27695000E8	2E-6
VMIS/MINI	VALE	M5	3	5	2.2075500E7	1E-5

Validation de CREA_CHAMP/ELGA_SPMX_R. Référence NON_REGRESSION.

VMIS/MAXI	VALE	M1	1	-	-	-
VMIS/MINI	INST	M5	3	-	-	-

Validation de POST_CHAMP/VARI_ELNO/ MAXI , Composante V5 .

Composante	Maille	Noeud	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance
VALE	M5	N13	NON_REGRESSION	-	-
NUCOU	M5	N13	AUTRE_ASTER	1	2E-6
NUSECT	M5	N13	AUTRE_ASTER	12.0	2E-6
POSIC	M5	N13	AUTRE_ASTER	-1.0	2E-6
POSIS	M5	N13	AUTRE_ASTER	1.0	2E-6

Le fait d'utiliser le comportement Mfront ne change pas la précision des solutions testées par rapport au 3D.

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

La structure est maillée en éléments 3D (mailles HEXA20, modélisation 3D).

5.2 Caractéristiques du maillage

1500 mailles HEXA20 et deux éléments de poutre POU_D_T.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Ce test fournit les valeurs de référence AUTRE_ASTER pour les modélisation A et B. Il s'agit donc ici de test de non-régression.

Calcul 3D pour la rotation globale entre B et C :

Instant	*Référence*	*Tolérance*
8	-	-

Instant	Identification	Type de référence	Valeur de Référence	% Tolérance
1	Point D , DY (m)	'NON_REGRESSION'	-	-
8	Point D , DY (m)	'NON_REGRESSION'	-	-
1	Point A , DY (m)	'NON_REGRESSION'	-	-
8	Point A , DY (m)	'NON_REGRESSION'	-	-

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

6 Synthèse des résultats

La solution de référence n'étant pas analytique, mais numérique (obtenue par une modélisation 3D), les écarts constatés (de 1% à 3%) peuvent être considérés comme raisonnables. Pour obtenir une meilleure correspondance des solutions 3D et TUYAU, il conviendrait de modéliser les parties droites sur une plus grande longueur, et d'adopter un maillage plus fin pour chacune des modélisations. Ceci n'a pas été fait dans le cadre de ce test, pour garder des temps d'exécution raisonnables.

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