RCCM15 - Validation de POST_RCCM en B3600

Résumé :

Ce test permet de valider l'option de calcul à la fatigue suivant le code RCC-M (B3600). Les contraintes ne sont pas calculées mais extraites de tables.

Ce test comporte deux modélisations, qui diffèrent par la prise en compte des transitoires thermiques :

- la première effectue le calcul des deux transitoires thermiques sur deux sections axisymétriques de mêmes diamètre et épaisseur que les tuyaux droits et le coude,
- la deuxième lit directement les valeurs issues d'un relevé des températures sur le calcul thermique du coude, modélisé auparavant en 3D par le département MMC.

La solution de référence est numérique (code SYSPIPE et note EDF/MMC).

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Ce test est extrait d'une étude, effectuée par le Département MMC, qui portait sur la modélisation d'une tuyauterie industrielle. Elle a donné lieu à un calcul de fatigue suivant le RCC-M B3600.

La ligne comporte 10 coudes. Elle est orientée depuis le nœud N1 jusqu'au nœud N2.

Caractéristiques des sections :

- Parties droites :
  - $R=406.4mm$, $EP=32.mm$
  - Tubulure 1, $R=410.mm$, $EP=38.mm$;
  - Tubulure 2 , $R=444.4mm$, $EP=70.mm$;
- Coudes :
  - Groupe de mailles $POUCT$: $R=406.4mm$; $EP=34.mm$;
  - Coefficient de flexibilité pour tous les coudes, $cflex=6.032$;
  - Rayons de cintrage des coudes : $1220mm$

De plus pour le calcul sismique, 6 éléments discrets (DIS_T) sont ajoutés en 3 points de la ligne (1vertical et un horizontal par point d'ancrage).

Pour le calcul thermique transitoire (qui permet d'estimer les gradients de température au travers de la paroi), on n'effectue pas un calcul sur un coude $3D$, mais seulement sur deux sections représentatives :

- de la section des tubes droits (épaisseur $32mm$),
- de la section des coudes (épaisseur $34mm$).

Ces calculs sont axisymétriques. La solution étant indépendante de l'axe, on modélise la portion de tuyauterie par un rectangle, maillé finement suivant le rayon, et comportant un seul élément suivant l'axe.

Deux transitoires sont modélisés.

1.2 Propriétés des matériaux

La ligne est en acier standard. Les calculs des efforts sont effectués à différentes valeurs de température. On considère donc les propriétés des matériaux en fonction de la température :

Température ($°C$)	Module d'Young (GPa)	Coefficient de dilatation moyen (à partir de $20°C$)
0.0	205	1.092e-05
20.0	204	1.092e-05
50.0	203	1.114e-05
100.0	200	1.15e-05
150.0	197	1.187e-05
200.0	193	1.224e-05
250.0	189	1.257e-05
300.0	185	1.289e-05
350.0	180	1.324e-05

Coefficient de Poisson : 0.3

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

La courbe de WOHLER est définie par :

Salt (MPa)	Nombre de cycles
0.01	1.E15
86	1000000
93	500000
114	200000
138	100000
160	50000
215	20000
260	10000
330	5000
440	2000
570	1000
725	500
1070	200
1410	100
1900	50
2830	20
4000	10

L'interpolation est logarithmique, et le prolongement à gauche est linéaire. A cause des faibles valeurs d'amplitudes de contraintes pour cette ligne, on ajoute artificiellement le premier point :

0.01 1.E15

Les caractéristiques utilisées pour l'analyse à la fatigue selon le RCC-M sont :

- $m=3$
- $n=0.2$
- $Sm=133.6\,MPa$

Les masses volumiques intègrent le calorifugeage.

Les caractéristiques thermiques sont fournies à la température moyenne du transitoire calculé :

Transitoire 2 : température moyenne = $273.5\,°C$,

Transitoire 6 : température moyenne = $281\,°C$,

Température ($°C$)	273.5	281
Conductivité thermique ($W/m.°C$)	46.595	46.37
Capacité calorifique ($J/m^3.°C$)	4.25 10^6	4.27 10^6

Les éléments discrets utilisés pour le calcul sismique ont pour raideur :

$K1=0.5\,10^8\,N/m$

$K2=1.0\,10^8\,N/m$

1.3 Conditions aux limites et chargements

Les différents chargements mécaniques élémentaires considérés constituent les états stabilisés correspondant aux situations de conception de la ligne :

Chargements de dilatation thermique :

On effectue un calcul par chargement, qui combine les efforts de dilatation thermique contrariée dans la ligne à la température prescrite, à ceux provoqués par déplacement du composant (la température de référence est égale à $20\,°C$ dans tous les cas) :

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

Numéro de chargement	Température ($°C$)	U_x (mm)	U_y (mm)	U_z (mm)
1	10	0	0	0
2	287	0.046466	–0.0304945	0.076
3	274.5	0.046466	–0.0304945	0.072
4	272.5	0.046466	–0.0304945	0.072
5	286	0.046466	–0.0304945	0.076
6	275	0.046466	–0.0304945	0.072
7	290	0.046466	–0.0304945	0.077
8	284	0.046466	–0.0304945	0.077
10	256	0.0360129	–0.0245167	0.067
12	257	0.0360129	–0.0245167	0.067
14 (épreuve hydraulique)	20	0	0	0

Conditions aux limites : pour tous les chargements précédents le nœud N2 est encastré.

Remarque :

Les déplacements du composant suivant x et y utilisés ne correspondent pas à ceux fournis dans la liste des situations de la note [2], car il sont exprimés dans un autre repère (repère lié à la ligne, tel que l'axe x local fasse un angle de 25° avec l'axe X global). On utilise ici les déplacements exprimés en repère global (celui qui est utilisé pour définir la géométrie de la ligne).

Épreuve hydraulique : elle est définie (en dehors de la pression d'épreuve définie dans la liste des situations) par le chargement 14 : extrémités N1 et N2 bloquées et efforts dus à la différence de poids entre la ligne pleine et la ligne vide. De plus des supports – poids sont ajoutés pour ce chargement : ils sont modélisés par une condition $DZ=0$, appliquée en 7 nœuds répartis sur la ligne.

Séisme : les spectres de plancher correspondant au SNA (séisme considéré pour l'analyse à la fatigue) sont :

Fréquence (Hz)	**Accélération(g) Spectre de plancher horizontal (SNA)**
1.0	0.18
2.2	1.56
3.0	1.56
10.0	0.513
20.0	0.281
25.0	0.245
50.0	0.245

Fréquence (Hz)	**Accélération (g) Spectre de plancher vertical**
1.0	0.11
2.0	0.21
3.0	0.265
4.0	0.31
6.4	0.31
9.0	0.21
10.0	0.17
25.0	0.1
50.0	0.1

Les déplacements d'ancrage associés sont :

- Nœud N2: $Dx=4\,mm$, $Dy=7\,mm$, $Dz=5\,mm$
- Nœud N1: $Dx=11.96\,mm$, $Dy=4.35\,mm$, $Dz=1\,mm$

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

Définition des situations :

Situation	Nombre d'occurrences	Pression (bar)	Numéro de chargement	Transitoire thermique
1	190	1 71.5	1 2	-
2	1300000	58.9 57.6	3 4	2
3	4000	70 59	5 6	6
4	100000	73.4 68.1	7 8	2
5	16080	71.5 44	9 10	6
6	790	74.5 44	11 12	6
7	10 390 sous-cycles	-	Séisme	-
11	13	112 1	14	-

Transitoires thermiques : deux transitoires sont calculés. Ils correspondent à une condition d'échange en peau interne du calcul axisymétrique définie par un coefficient d'échange $H=30000\,W/m^{2.}\,°C$ et deux histoires de températures fluide :

- transitoire 2 :

Temps (s)	Température fluide ($°C$)
0.0	274.5
10.0	274.5
310.0	272.5
610.0	274.5
910.0	272.5

- transitoire 6 :

Temps (s)	Température fluide ($°C$)
0.0	272.0
11.0	272.0
20.0	290.0
40.0	290.0

L'analyse en fatigue est effectuée sur le premier nœud situé immédiatement après la sortie du composant ($N80$ appartenant à la maille $M1$).

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

Ce test est extrait d'une étude, effectuée par le Département MMC, qui portait sur la modélisation d'une tuyauterie industrielle. Elle a donné lieu à des comparaisons entre *code_aster* et le code SYSPIPE de FRAMATOME. La solution de référence est numérique (comparaison entre les résultats de conception et les résultats de *code_aster* pour les chargements mécaniques) et les résultats de fatigue obtenus par une procédure EXCEL.

2.2 Résultats de référence

Le résultat final du calcul de fatigue, sur le nœud à l'entrée du premier coude après la sortie du composant, fournit un facteur d'usage global : $u = 0.00648$.

Ce résultat s'appuie sur les résultats des calculs mécaniques et thermiques effectués sur la ligne. Afin de valider l'ensemble de la chaîne de calcul, on s'assure que les résultats des calculs mécaniques sont identiques à ceux de référence. Ceux-ci sont résumés ici :

Fréquences propres de la ligne vide (encastrée aux deux extrémités) avec ressorts et à la température de $20\,°C$:

NUMERO	FREQUENCE (Hz) calcul Circus / Aster
1	5.059
2	6.023
3	6.866
4	8.204
5	9.733
6	9.987
7	16.535
8	17.329
9	18.282
10	19.004
11	20.271

Moments de torsion et de flexion pour chaque chargement mécanique :

Cas de charge	Mx ($N.m$)	My ($N.m$)	Mz ($N.m$)	$\|\|Mx^2+My^2\|\|$
1	5947	4412,5	–5526	
2	–41084	–25691	91767,3	
3	–34253	–20695,4	83346,2	
5	–32752	–19577	81995,4	
5	–40330	–25129	91089,6	
6	–34565	–20927,8	83624,6	
7	–42718	–26884	93803,2	
8	–38457	–23711	89984,4	
10	–43556	–28408,2	86848,7	
12	–44175	–28868,5	87403,1	
14	1381	5671	5671	
séisme	240269	–107195	16785	108501

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

Calculs thermiques :

Les résultats disponibles dans la note ont été effectués sur une modélisation 3D du coude situé après la sortie du composant Les résultats sont fournis pour des segments d'analyse situés dans la partie droite et dans le coude :

$T_{moy}(i,j) = \frac{1}{e}\int_{e/2}^{e/2} T(i,j)(y).dy = \frac{1}{e}\int_{e/2}^{e/2} T(i)(y).dy - \frac{1}{e}\int_{e/2}^{e/2} T(j)(y).dy = T_{moy}(i) - T_{moy}(j)$: valeur moyenne de $T(i)-T(j)$ sur le ligament

$\Delta T_1(i,j) = \frac{12}{e^2}\int_{e/2}^{e/2} y.T(i,j)(y).dy = \frac{12}{e^2}\int_{e/2}^{e/2} y.T(i)(y).dy - \frac{12}{e^2}\int_{e/2}^{e/2} y.T(j)(y).dy = \Delta T_1(i) - \Delta T_1(j)$: variation d'une distribution linéaire de T(i,j).

$$\Delta T_2(i,j) = \max \begin{vmatrix} |T_{\max}(i,j) - T_{moy}(i,j)| - |1/2\,\Delta T_1(i,j)| \\ |T_{\min}(i,j) - T_{moy}(i,j)| - |1/2\,\Delta T_1(i,j)| \\ 0 \end{vmatrix}$$

Ces quantités sont maximisées pour l'ensemble des couples d'instants i et j :

Transitoire thermique	$\Delta T_1(i,j)$ °C	$\Delta T_2(i,j)$ °C	$T_{moy}(i,j)$ partie droite	$T_{moy}(i,j)$ coude
2	0.741	0.125	1.043	1.445
6	15.48	2.84	5.99	5.69

2.3 Incertitude sur la solution

Solution numérique, obtenue avec des données identiques et des éléments comparables. On peut donc estimer la précision à 1% pour la solution mécanique.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

439 POU_D_T

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 440
Nombre de mailles et type : 339 SEG2 et 6 SEG2 (DIS_T)

Remarque :
Il faut prendre garde à ordonner correctement les groupes de nœuds sur lesquels sont effectués les relevés de températures et les calculs de moyennes.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Afin de valider correctement le calcul de fatigue, on s'assure que les résultats des calculs mécaniques sont suffisamment proches de la référence.

Fréquences propres de la ligne vide :

Num. mode	Référence	*Aster*	% différence
1	5,059	5,05799	0,02
2	6,023	5,98255	0,67
3	6,866	6,86007	0,09
4	8,204	8,20337	0,01
5	9,733	9,73339	0,00
6	9,987	9,95736	0,30
7	16,535	16,4647	0,43
8	17,329	17,326	0,02
9	18,282	18,2823	0,00
10	19,004	18,996	0,04
11	20,271	20,2708	0,00

Efforts (moments) au nœud N1

N1	Référence			*Aster*			% différence		
Cas de charge	Mx ($N.m$)	My ($N.m$)	Mz ($N.m$)	Mx ($N.m$)	My ($N.m$)	Mz ($N.m$)	Mx	My	Mz
1	5947	4412,5	–5526	5985,5	4440,76	–5561,92	–0,65	–0,64	–0,65
2	–41084	–25691	91767,3	–41041,6	–25659,6	91727,2	0,10	0,12	0,04
3	–34253	–20695,4	83346,2	–34212,8	–20665,9	83307,7	0,12	0,14	0,05
5	–32752	–19577	81995,4	–32802,8	–19615,8	82041,5	–0,16	–0,20	–0,06
5	–40330	–25129	91089,6	–40335,5	–25133,6	91094,1	–0,01	–0,02	0,00
6	–34565	–20927,8	83624,6	–34565,3	–20928,5	83624,3	0,00	0,00	0,00
7	–42718	–26884	93803,2	–42664,3	–26845,2	93752,5	0,13	0,14	0,05
8	–38457	–23711	89984,4	–38426,1	–23688,3	89954	0,08	0,10	0,03
10	–43556	–28408,2	86848,7	–43537,4	–28394,9	86830	0,04	0,05	0,02
12	–44175	–28868,5	87403,1	–44232,3	–28912,1	87456,1	–0,13	–0,15	–0,06
14	1381	5671	–3179	1370	5700	–3320	0,59	–0,54	–4,45

Référence		N1	*Aster*		% différence	
Mx ($N.m$)	$\|\|Mx^2+My^2\|\|$	Cas de charge	Mx ($N.m$)	$\|\|Mx^2+My^2\|\|$	Diff Mx	Diff $\|\|Mx^2+My^2\|\|$
240269	108501	seisme	239009	108167	0,52	0,31

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

Calculs thermiques :

	Référence	Aster	% différence
Transitoire thermique	$\Delta T_1(i,j)$ °C	$\Delta T_1(i,j)$ °C côté droit	
2	0.741	0.719	3
6	15.48	15.38	3

	Référence	Aster	% différence
Transitoire thermique	$T_{moy}(i,j)$ côté droit	$T_{moy}(i,j)$ côté droit	
2	1.043	1.8	73
6	5.99	9.34	56

	Référence	Aster	% différence
Transitoire thermique	$T_{moy}(i,j)$ côté coude	$T_{moy}(i,j)$ côté coude	
2	1.445	2.4	65
6	5.69	8.8	54

Remarque :

Les températures moyennes sont relativement différentes de la référence. Ceci peut être dû à la modélisation (ici axisymétrique, et 3D dans [bib2]). En pratique, seule la différence de température moyenne entre le coude et le tuyau droit intervient dans le calculs des contraintes.

Finalement, le facteur d'usage total cumulé vaut :

	Référence	Aster	% différence
Nœud / Maille	Facteur d'usage	Facteur d'usage	
N80 , M1	0.00648	0.0079	22

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

4 Synthèse des résultats

Les résultats en terme de facteur d'usage peuvent être considérés comme assez proches de ceux de référence.

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