SDLL149 – Calcul sismique de la tuyauterie BM3 (test NRC)

Résumé :
Ce test permet principalement de valider l'implémentation de la méthode GUPTA (corrélation entre partie périodiques et rigide d'une réponse modale) sur un calcul sismique par méthode spectrale appliqué à une partie de tuyauterie (COMB_SISM_MODAL).

D'autres méthodes sont également évaluées sur la même configuration :

- SRSS,
- CQC,
- CQC avec pseudo-mode.

Ce test a été proposé par la NRC pour valider le dimensionnement sismique des installations nucléaires.

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

1 Problème de référence

1.1 Problématique

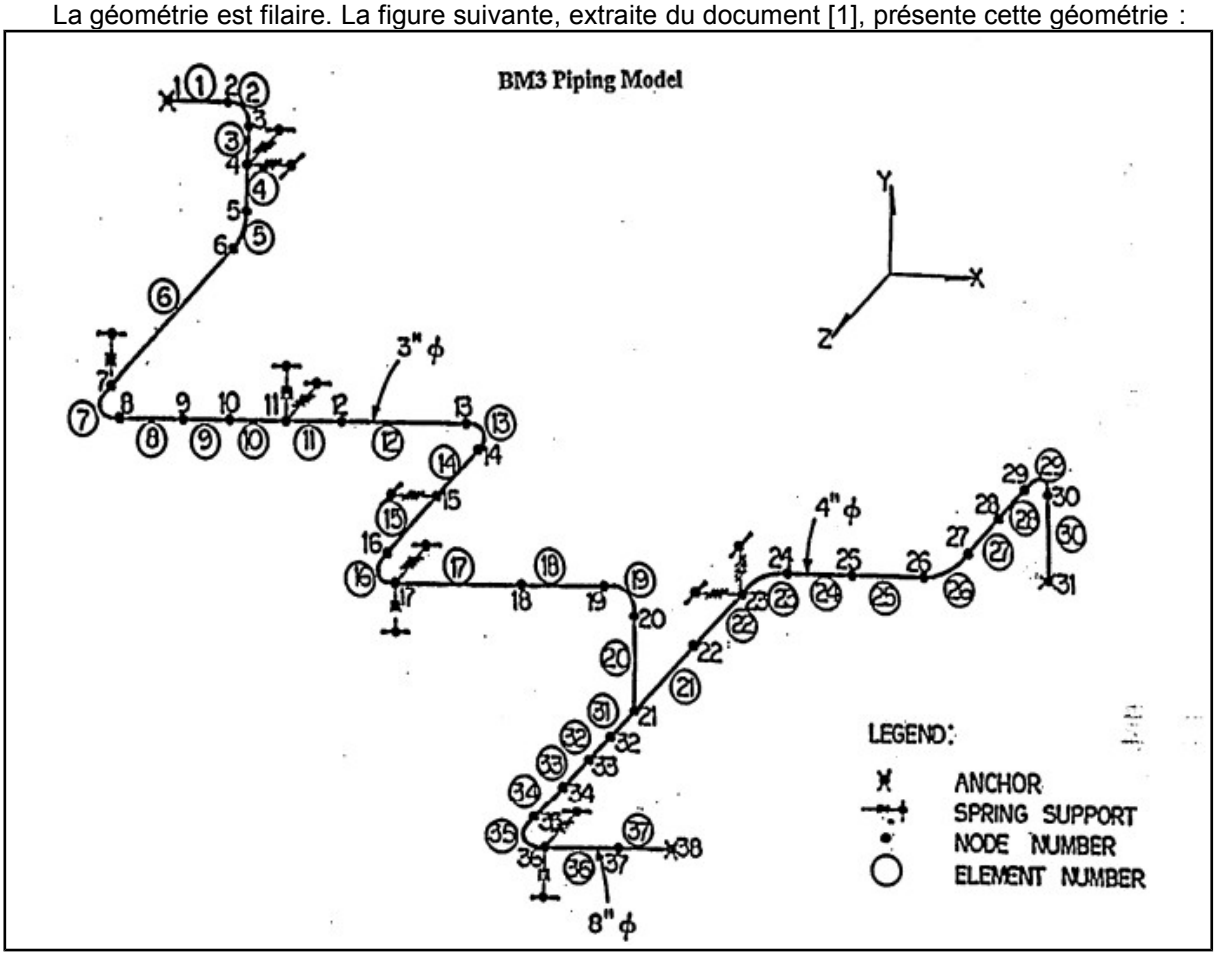
Ce test consiste à réaliser une analyse spectrale du réseau de canalisations BM3 utilisé dans une centrale nucléaire. Il permet de valider les différentes méthodes de combinaison utilisées, en autre la méthode de Gupta. Pour réaliser cette validation, les résultats d'une modélisation équivalente menée avec ANSYS sont extraits des deux documents suivants :

[1] Reevaluation of Regulatory Guidance on Modal Response Combination Methods for Seismic Response Spectrum Analysis , NUREG/CR-6645 , BNL-NUREG-52576 , 1999.

[2] ANSYS Mechanical APDL Technology Demonstration Guide, 2010, Chapter 12 : Dynamic Simulation of a Nuclear Piping System Using RSA Methods .

1.2 Géométrie

La géométrie est filaire. La figure suivante, extraite du document [1], présente cette géométrie :



Afin de se comparer correctement aux études américaines [1] et [2], les unités choisies sont les unités impériales.

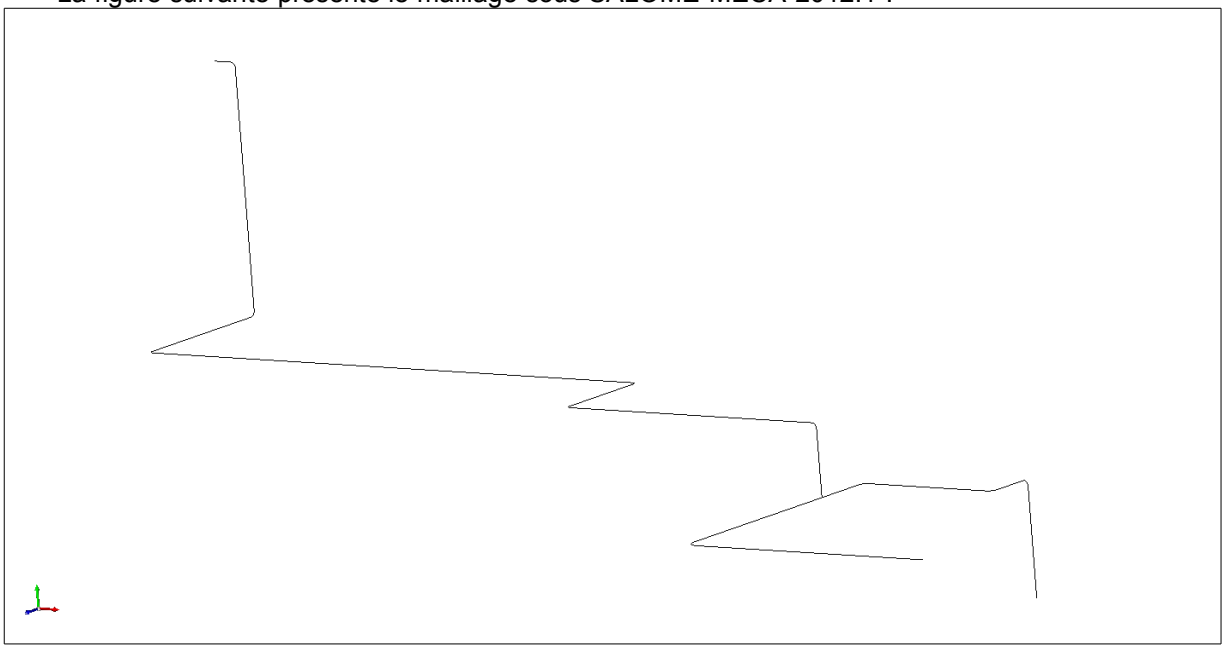
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

La structure est composée de trois parties à sections différentes. Le tableau suivant présente les caractéristiques des sections :

	Rayon (inch)	Epaisseur (inch)
section 1	1,75	0,216
section 2	2,25	0,237
section 3	4,31	0,322

1.3 Maillage

Le maillage de la structure est linéaire et composé de 37 éléments SEG2 pour 38 nœuds.
La figure suivante présente le maillage sous SALOME-MECA-2012.1 :



Le tableau suivant présente les coordonnées des nœuds du maillage :

	Coordonnées (inch)		
Nœuds	*X*	*Y*	*Z*
1	0	0	0
2	15	0	0
3	19,5	-4,5	0
4	19,5	-180	0
5	19,5	-199,5	0
6	19,5	-204	4,5
7	19,5	-204	139,5
8	24	-204	144
9	96	-204	144
10	254	-204	144
11	333	-204	144
12	411	-204	144
13	483	-204	144
14	487,5	-204	148,5
15	487,5	-204	192

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

	Coordonnées (inch)		
16	487,5	-204	235,5
17	492	-204	240
18	575	-204	240
19	723	-204	240
20	727,5	-208,5	240
21	727,5	-264	240
22	727,5	-264	205
23	727,5	-264	190
24	733,5	-264	184
25	753,5	-264	184
26	845,5	-264	184
27	851,5	-264	178
28	851,5	-264	160
29	851,5	-264	142
30	851,5	-270	136
31	851,5	-360	136
32	727,5	-264	255
33	727,5	-264	270
34	727,5	-264	306
35	727,5	-264	414
36	739,5	-264	426
37	847,5	-264	426
38	955,5	-264	426

Les appuis de cette structure sont modélisés par des raideurs. Pour pouvoir récupérer les réactions nodales aux appuis, un nœud supplémentaire « doublon », est créé pour chaque appui. Il est décalé de $1,\text{E-}3\,inch$ (tolérance de Code_Aster) suivant l'axe X par rapport au point d'appui. Tous ses degrés de liberté sont bloqués et un élément SEG2 est créé entre le nœud de l'appui et le « doublon ». C'est sur cet élément que les valeurs de raideur des appuis seront appliquées. Ainsi, les réactions nodales seront rélevées aux nœuds « doublons ».

1.4 Matériaux

Les propriétés matériaux de la structure sont les suivantes :

$E = 2,9\text{E+}7\ pound/inch^2$

$\nu = 0,3$

Les masses volumiques de la structure sont les suivantes :

	Rayon (inch)	Épaisseur (inch)	Section (inch²)	Masse linéique (pound/inch)	Masse volumique (pound/inch3)
section 1	1,7500	0,216	2,2273	2,3240E-003	**1,0434E-003**
section 2	2,2500	0,237	3,1724	3,5145E-003	**1,1078E-003**
section 3	4,3125	0,322	8,3950	1,0836E-002	**1,2908E-003**

Remarque : Dans le document [2] de 2010, la masse volumique de la section 3 est de $1.253\text{E}-3\ pound/inch^3$. Afin de garder la cohérence dans toutes les modélisations, c'est la valeur du document [1] de 1999 qui est utilisée.

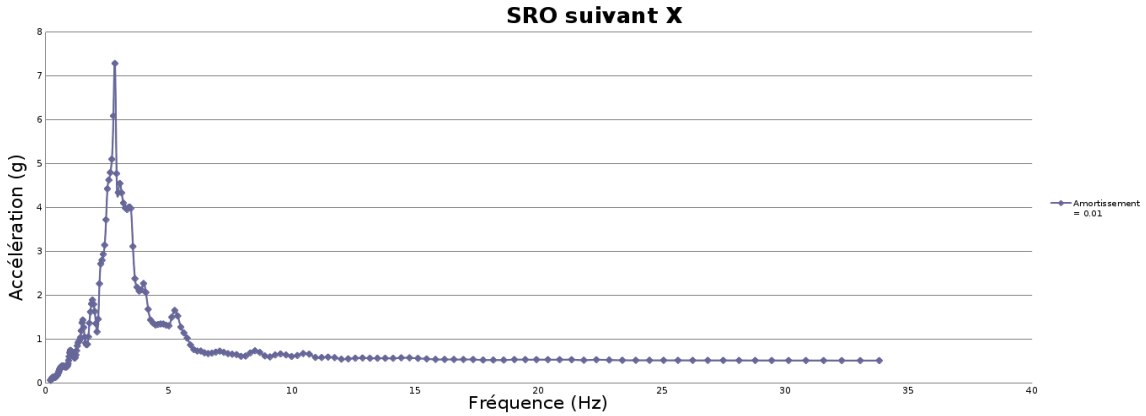
Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.5 Conditions aux limites et chargements

Les conditions aux limites correspondent aux appuis de la structure. Ils sont modélisés par des raideurs aux nœuds correspondants du maillage. Les raideurs sont les suivantes :

Noeuds	Raideur UX (pound / inch)	Raideur UY (pound / inch)	Raideur UZ (pound / inch)	Raideur RX (pound / inch)	Raideur RY (pound / inch)	Raideur RZ (pound / inch)
1	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+020	1,00E+020	1,00E+020
4	1,00E+008	0,00E+000	1,00E+008	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
7	0,00E+000	1,00E+008	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
11	0,00E+000	1,00E+008	1,00E+005	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
15	1,00E+005	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
17	0,00E+000	1,00E+008	1,00E+005	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
23	1,00E+005	1,00E+008	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000	0,00E+000
31	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+020	1,00E+020	1,00E+020
36	0,00E+000	1,00E+008	1,00E+005	0,00E+000	0,00E+000	0,0E+0
38	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+011	1,00E+020	1,00E+020	1,00E+020

Le chargement de l'analyse spectrale correspond à un Spectre de Réponse d'Oscillateur appliqué dans la direction X. Le spectre est présenté dans le graphique suivant :



1.6 Modélisation

Élément POUTRE (2 modélisations):

- modélisation POU_D_T pour les sections droites et pour les sections courbes
- modélisation DIS_TR pour les appuis

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

2 Modélisation A

2.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation cherche à se rapprocher du document [2] de 2010. Pour cela, la matrice de masse calculée est pleine.

L'analyse modale relève les 14 premiers modes et cinq analyses spectrales sont réalisées :

1) Combinaison SRSS
2) Combinaison CQC
3) Combinaison CQC avec correction statique
4) Combinaison de type Gupta avec $f1 = 2{,}80\ Hz$ et $f2 = 11{,}90\ Hz$ avec correction statique
5) Combinaison de type Gupta avec $f1 = 2{,}80\ Hz$ et $f2 = 6\text{Hz}$ avec correction statique

2.2 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées sont les fréquences propres des 14 premiers modes et les réactions aux appuis de la structure. Les tests utilisent comme références les valeurs issues d'ANSYS. Ils sont doublés de tests de non-regression avec une tolérance de $1{,}E\text{-}6$.

Mode propres	Référence Fréquences (Hz)	Tolérance Code_Aster (%)
1	2,91	1
2	4,44	2
3	4,86	1
4	5,02	1
5	6,95	1
6	7,58	2
7	7,82	1
8	10,94	2
9	11,65	3
10	11,78	2
11	12,8	2
12	14,32	3
13	15,17	8
14	15,79	6

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

Nœuds	Efforts	Référence calcul 1 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance Code_Aster calcul 1 (%)	Référence calcul 2 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance Code_Aster calcul 2 (%)	Référence calcul 3 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance Code_Aster calcul 3 (%)
1	*FX*	30,69	13	30,81	13	43,85	3
1	*FY*	15,34	10	12,59	9	15,21	8
1	*FZ*	49,04	9	24,91	5	24,91	5
1	*MX*	1515,03	6	764,29	7	766,72	7
1	*MY*	1219,62	6	932,32	0,15	934,03	1
1	*MZ*	1100,66	12	1096,58	12	1108,78	11
4	*FX*	45,19	5	45,02	5	77,36	3
4	*FZ*	82,15	2	55,61	1	56,12	1
7	*FY*	27,87	2	15,78	11	15,99	9
11	*FY*	21,54	20	19,57	20	19,59	20
11	*FZ*	42,91	4	42,35	2	43,43	3
15	*FX*	368,83	2	388,99	3	389,64	3
17	*FY*	44,28	0,3	45,83	2	45,95	2
17	*FZ*	53,12	2	55,06	1	55,31	0,1
36	*FY*	162,84	3	169,14	1	171,57	3
36	*FZ*	80,96	8	81,34	6	90,69	10
38	*FX*	116,92	4	135,99	5	566,65	12
38	*FY*	52,46	2	54,26	1	54,29	1
38	*FZ*	39,12	7	44,55	6	50,45	5,5
38	*MX*	2543,44	1	2606,69	3	2606,69	3
38	*MY*	2533,41	65	2894,27	5	3142,75	4,5
38	*MZ*	3650,45	2	3763,01	1	3764,97	1
23	*FX*	177,23	5	193,92	5	245,05	4
23	*FY*	145,37	4	151,53	1	151,99	1
31	*FX*	9,41	2	11,09	2	54,42	6
31	*FY*	22,08	6	24,77	5	27,73	4
31	*FZ*	31,36	8	32,11	7	32,26	7
31	*MX*	1971,58	16	2068	14	2072,03	14
31	*MY*	267,63	23	304,18	23	567,6	28
31	*MZ*	603,06	6	706,86	3	1912,58	4

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

Nœuds	Efforts	Référence calcul 4 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance calcul 4 (%)	Référence calcul 5 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance calcul 5 (%)
1	*FX*	54,42	1	52,05	1
1	*FY*	3,43	8	2,73	16
1	*FZ*	6,61	4	4,93	25
1	*MX*	190,18	13	135,39	11
1	*MY*	858,44	2	877,81	4
1	*MZ*	966,87	3	864,96	2
4	*FX*	105,14	1	114,06	1
4	*FZ*	42,48	6	34,9	6
7	*FY*	8,77	21	6,77	39
11	*FY*	16,71	33	12,44	37
11	*FZ*	49,19	2	61,99	3
15	*FX*	547,38	2	641,84	1
17	*FY*	35,92	1	26,39	2
17	*FZ*	56,34	2	46,86	3
36	*FY*	81,01	5	61,16	21
36	*FZ*	60,87	3	42,38	20
38	*FX*	750,45	10	739,29	10
38	*FY*	46,02	2	42,92	1
38	*FZ*	45,53	8	41,67	6,5
38	*MX*	914,22	9	369,64	3
38	*MY*	3191,39	7	2909,01	6
38	*MZ*	3248,59	2	3036,62	1
23	*FX*	347,2	4	304,8	5
23	*FY*	49,61	11	16,75	12
31	*FX*	63,82	3	61,95	3
31	*FY*	16,89	4	13,34	6
31	*FZ*	19,53	11	12,96	4,2
31	*MX*	1235,04	19	695,41	19
31	*MY*	818,08	31	757,2	32
31	*MZ*	2460,9	2	2319,49	3

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

3 Modélisation B

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation chercher à se rapprocher du document [1] de 1999. Pour cela, la matrice de masse calculée est diagonalisée.

L'analyse modale relève les 14 premiers modes et trois analyses spectrales sont réalisées :

6) 1. Combinaison SRSS
7) 2. Combinaison CQC
8) 3. Combinaison de type Gupta avec $f1 = 2{,}80\ Hz$ et $f2 = 11{,}90\ Hz$

3.2 Grandeurs testées et résultats

Les grandeurs testées sont les fréquences propres des 14 premiers modes les réactions aux appuis de la structure. Les tests utilisent comme références les valeurs issues d'ANSYS. Ils sont doublés de tests de non-regression avec une tolérance de $1{,}E\text{-}6$.

Mode propres	Référence Fréquences (Hz)	Tolérance Code_Aster (%)
1	2,91	0,12
2	4,39	0,12
3	5,52	0,1
4	5,7	0,1
5	6,98	0,23
6	7,34	0,1
7	7,88	0,1
8	10,3	0,1
9	11,06	0,1
10	11,23	0,1
11	11,5	0,2
12	12,43	0,21
13	13,88	0,3
14	16,12	0,55

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

Nœuds	Efforts	Référence calcul 1 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance calcul 1 (%)	Référence calcul 2 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance calcul 2 (%)	Référence calcul 3 (F:lbs, M:lbs-inch)	Tolérance calcul 3 (%)
1	*FX*	3,13	2	3,13	1	3,25	2
1	*FY*	5,44	2	5,05	2,2	3,4	7
1	*FZ*	7,48	1	6,76	1	2,47	7
1	*MX*	275,37	1	246,84	1	64,41	15
1	*MY*	690,81	1	682,86	1	690,81	0.3
1	*MZ*	209,33	2	202,85	1,1	185,59	3
4	*FX*	24,27	1,2	23,98	2	23,98	0.34
4	*FZ*	75,18	2	67,72	2	25,43	6
7	*FY*	15,53	4	15,26	5	14,42	5
11	*FY*	19,61	1	19,08	1	15,63	2
11	*FZ*	79,99	1	77,2	2	74,41	2
15	*FX*	437,58	2	437,85	1	550,84	1
17	*FY*	48,82	1	48,05	1	39,11	1
17	*FZ*	79,11	2	79,73	2	62,91	1
36	*FY*	90,5	2	90,03	2	59,08	2
36	*FZ*	78,39	3	79,08	3	75,67	4
38	*FX*	119,47	4,3	121,91	2,3	163,36	4
38	*FY*	52,78	1	52,78	1	48,38	2
38	*FZ*	38,38	4	40,09	4,2	56,3	4,3
38	*MX*	1404,67	2	1397,54	2	762,94	4
38	*MY*	2588,19	4,3	2699,51	4,4	3701,39	4,3
38	*MZ*	3710,18	1	3710,18	1	3429,58	1
23	*FX*	214,93	2	219,71	2	238,81	3
23	*FY*	105,28	3	104,16	3	40,04	6
31	*FX*	10,13	4	10,2	3,3	9,86	3
31	*FY*	24,83	2	24,97	1,1	17,72	1
31	*FZ*	31,62	4	30,69	3,4	23,56	2,5
31	*MX*	2436,08	5	2358,92	4,8	1763,68	3,6
31	*MY*	282,8	4,1	287,99	4,2	306,15	3
31	*MZ*	796,48	4,3	802,56	4,2	772,16	3

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

4 Modélisation C

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Cette modélisation valide l'utilisation de la sous-structuration dynamique pour le calcul sismique spectral. Elle compare un calcul par sous-structuration dynamique avec un calcul "direct" (sans sous-structuration dynamique).

4.2 Grandeurs testées et résultats

4.2.1 Calcul modal : fréquences de la ligne de tuyauterie

On teste les 14 premières fréquences propres de la tuyauterie et on compare les résultats du calcul par sous-structuration dynamique avec ceux de la référence [1].

Mode propres	Référence Fréquences (Hz)	Tolérance Code_Aster (%)
1	2,91	1
2	4,44	2
3	4,86	1
4	5,02	1
5	6,95	1
6	7,58	2
7	7,82	1
8	10,94	1
9	11,65	2
10	11,78	2
11	12,80	2
12	14,32	2
13	15,17	6
14	15,79	4

4.2.2 Réponse sismique par calcul spectral

On compare les déplacements selon la direction DX aux nœuds $N10$ de coordonnées $(254.0,-204.0,144.0)$, $N20$ de coordonnées $(727.5,-208.5,240.0)$ et $N30$ de coordonnées $(851.5,-270.0,136.0)$ le calcul de réponse sismique spectrale avec la base issue de la sous-structuration avec ceux calculés avec la base issue du calcul « direct ».

Noeud	Déplacement max en DX (calcul « direct »)	Tolérance (%)
$N10$	0,274320 inches	0,2
$N20$	0,179173 inches	0,2
$N30$	0,00825 inches	5,0

On crée le même tableau pour les accélérations absolues :

Noeud	Accélération absolue max en DX (calcul « direct »)	Tolérance (%)
$N10$	227,616 inches/s²	0,2
$N20$	285,906 inches/s²	3,0
$N30$	177,284 inches/s²	4,0

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

5 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus sont globalement satisfaisants. Que ce soit avec une matrice de masse complète ou avec une matrice de masse diagonale, on retrouve les fréquences des publications.

Les résultats sur les réactions nodales issues du calcul par méthode sismique spectrale sont pour la plupart proches des résultats de référence à moins de 5 %. Toutefois, on remarque que sur quelques points d'appui les écarts sur les réactions nodales entre *Code_Aster* et ANSYS s'élèvent à plus de 30% (modélisation A). Ils s'expliquent par des différences sur les déformées modales calculées par les deux logiciels (jusqu'à 2% sur la modélisation B), de même que sur les réactions aux appuis des modes (jusqu'à 5% d'écart dans la modélisation B). On peut faire remonter ces différences à des implémentations distinctes sur les éléments finis de poutre entres les deux codes. En particulier pour la modélisation A, ANSYS emploie une interpolation « éléments finis » pour les éléments de poutre alors que *Code_Aster* utilise une intégration « exacte » [R3.08.01 – éléments « exacts » de poutre].

On constate néanmoins qu'ils restent largement en deçà des différences résultants du choix de la méthode ou de l'effet de « masse manquante » (effet des modes haute fréquence).

En ce qui concerne la méthode dite de Gupta, elle apparaît bien validée par cette référence externe.

La modélisation C a pour intérêt de valider l'emploi pour une réponse sismique spectrale d'une base modale issue d'un calcul par sous-structuration dynamique.

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