

SSL101 - Tuyauterie : Problème de HOVGAARD

Résumé :

Il s'agit d'un test élastique linéaire, en statique, d'une tuyauterie tridimensionnelle non coplanaire comportant des coudes. Il existe un test en dynamique de la même structure (SDLX02) [V2.05.002].

On teste les éléments `POU_D_T`, `POU_C_T`, `TUYAU (SEG3 et SEG4)` et `TUYAU_6M (SEG3)` par l'intermédiaire de sept modélisations :

- modélisation A : 92 éléments `POU_D_T` (40 pour un coude), calcul avec `MECA_STATIQUE`,
- modélisation B : 10 éléments `POU_D_T`, 4 éléments `POU_C_T` (2 pour un coude), calcul avec `MECA_STATIQUE`,
- modélisation C : 28 éléments `TUYAU (SEG3)` (5 pour un coude), calcul avec `MECA_STATIQUE`,
- modélisation D : 28 éléments `TUYAU_6M (SEG3)` (5 pour un coude), calcul avec `MECA_STATIQUE`,
- modélisation E : 28 éléments `TUYAU (SEG4)` (5 pour un coude), calcul avec `MECA_STATIQUE`,
- modélisation F : 10 éléments `POU_D_T`, 4 éléments `POU_C_T` (2 pour un coude), calcul avec `STAT_NON_LINE/COMP_ELAS`,
- modélisation G : 10 éléments `POU_D_T`, 4 éléments `POU_C_T` (2 pour un coude) calcul avec `STAT_NON_LINE/COMP_INCR`.

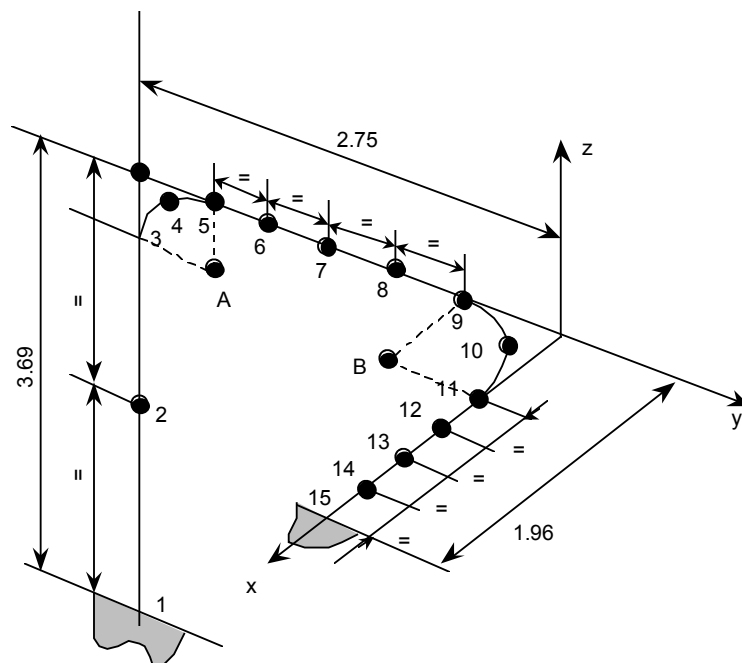
Les chargements sont de type :

- pesanteur,
- thermique,
- forces nodales.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

La géométrie, ainsi que les points de modélisation sont représentés sur la figure suivante :



$$\begin{array}{c|c} & 0. \\ \hline A & -1.828 \\ & -0.922 \\ \\ & 0.922 \\ \hline B & -0.922 \\ & 0. \end{array}$$

- diamètre extérieur du tuyau : 0.185 m
- épaisseur du tuyau : 6.12 mm
- rayon de courbure des coudes : 0.922 m
- tuyauterie pleine d'eau

1.2 Propriétés de matériaux

$$E=1.658 E+11 Pa$$

$\nu=0.3$

$$\rho = 13404.10 \text{ kg/m}^3$$

$$\alpha = 0.1288 E - 4 / C^{\circ}$$

1.3 Conditions aux limites et chargements

- Points 1 et 15 encastres,
- Chargement :
 1. Pesanteur selon $-z$,
 2. Elévation uniforme de température de $472.22\text{ }^{\circ}\text{C}$,
 3. Forces nodales.

Nœuds	2	3	4 - 10	5 - 9	6 - 7 - 8	11	12/01/13	14
$F_z \text{ (N)}$	-624.897	-788.724	-327.654	-214.839	-102.5145	-222.687	-117.720	-176.580

2 Solution de référence

2.1 Méthode de calcul utilisée pour la solution de référence

Les solutions de référence retenues pour vérifier les modélisations *Code_Aster* sont les suivantes :

- pour les modélisations *POUTRE* : comparaison avec les codes : *POUX*, *ADL* et *TITUS-T* [bib1], utilisant une modélisation de type poutre,
- pour les modélisations *TUYAU* : comparaison avec le code *ABAQUS*, utilisant une modélisation de type tuyau. Le nombre de mode de Fourier (M) utilisé lors du calcul de la référence est identique à celui utilisé lors des calculs avec *Code_Aster*.

2.2 Résultats de référence

Cas de Chargement	Déplacement au point 3	Modélisation Poutre (<i>POUX</i> , <i>ADL</i> , <i>TITUS</i>)	Modélisation Tuyau: $M=3$ (<i>ABAQUS</i>)	Modélisation Tuyau: $M=6$ (<i>ABAQUS</i>)
Poids propre	DX	-0.1658E-3	-0.16517E-3	-0.16512E-3
	DY	-0.2040E-4	-0.13870E-4	-0.13946E-4
	DZ	-0.8010E-5	-0.80376E-5	-0.80369E-5
Force nodale	DX	-0.1651E-3	-0.16445E-3	-0.16441E-3
	DY	-0.2080E-4	-0.14245E-4	-0.14320E-4
	DZ	-0.9516E-5	-0.10047E-4	-0.10047E-4
Dilatation	DX	-6.1418E-3	-6.3277E-3	-6.3236E-3
	DY	-13.090E-3	-13.092E-3	-13.093E-3
	DZ	16.799E-3	16.798E-3	16.798E-3

2.3 Incertitude sur la solution

L'incertitude sur la solution de référence est fixée à 2% .

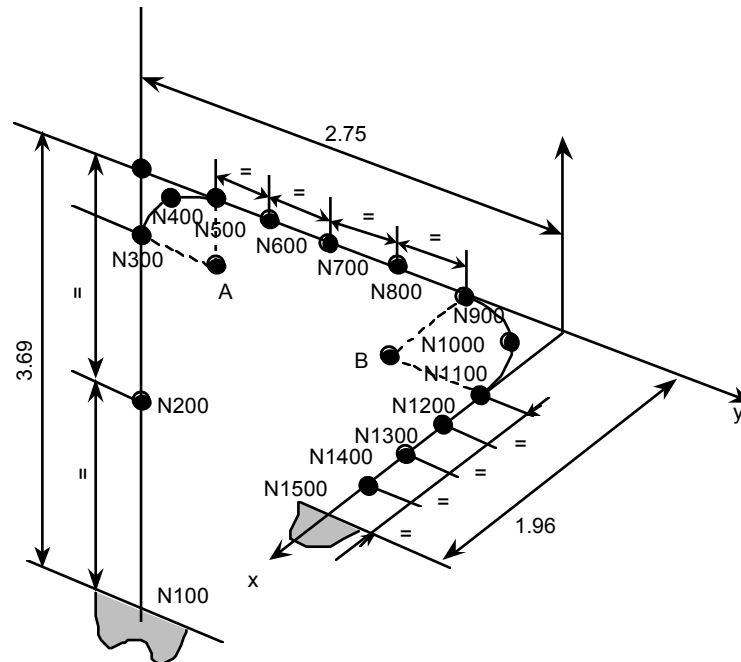
2.4 Références bibliographiques

1.M.W. KELLOG Co. Design of Piping Systems. New York, 1956 - Problème n°5.9

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

Les éléments courbes sont modélisés par des éléments droits.
Un demi élément courbe est modélisé par 20 éléments droits.



Longueurs en mètres

3.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 93
Nombre de mailles et type : 92 POU_D_T

3.3 Grandeurs testées et résultats

Identification	Déplacement	Référence poutre	%
Poids propre	N300 DX	-0.1658E-3	0.0
	DY	-0.2040E-4	0.02
	DZ	-0.8010E-5	0.0
Force nodale	N300 DX	-0.1651E-3	0.04
	DY	-0.2080E-4	-0.01
	DZ	-0.9516E-5	0.004
Dilatation	N300 DX	-6.1418E-3	0.007
	DY	-13.090E-3	0.012
	DZ	16.799E-3	0.003

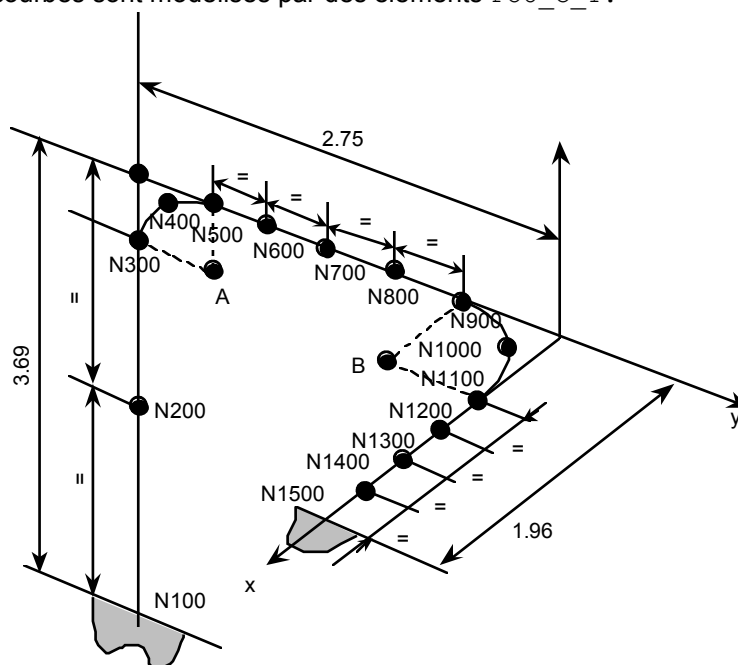
3.4 Remarque

Les différences entre les résultats *Aster* et la solution de référence poutre sont toutes inférieures à 0.04%

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

Les éléments courbes sont modélisés par des éléments POU_C_T.



Longueurs en mètres

4.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 15

Nombre de mailles et type : 10 POU_D_T
4 POU_C_T

4.3 Valeurs testées

Identification	Déplacement	Référence poutre	%
	N300 DX	-0.1658E-3	0.017
Poids propre	DY	-0.2040E-4	0.65
	DZ	-0.8010E-5	-0.006
	N300 DX	-0.1651E-3	0.04
Force nodale	DY	-0.2080E-4	0.02
	DZ	-0.9516E-5	0.002
	N300 DX	-6.1418E-3	-0.02
Dilatation	DY	-13.090E-3	0.005
	DZ	16.799E-3	0.003

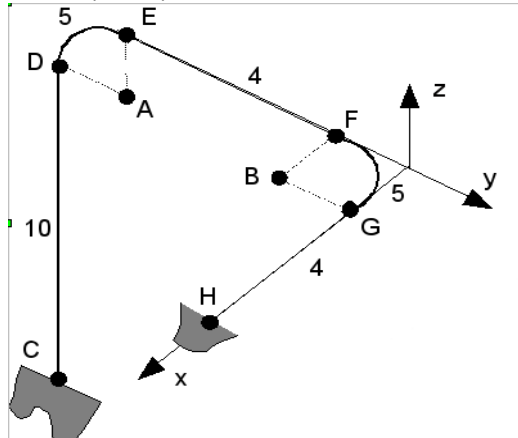
4.4 Remarque

Les différences entre les résultats Aster et les résultats de référence poutre sont toutes inférieures à 0.02% sauf pour DY en poids propre où l'écart est de 0.65%

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation TUYAU (SEG3)



Longueurs en mètres

Conditions aux limites : points *C* et *H*

- DDL poutre : $DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0$
- DDL coque :
 - $UIm = VIm = WIm = 0 (m = 2, 3)$
 - $UOm = VOm = WOm = 0 (m = 2, 3)$
 - $WII = WOI = WO = 0$

5.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 57
Nombre de mailles et type : 28 SEG3

5.3 Valeurs testées

Identification	Déplacement	Référence tuyau ($M = 3$)	%
Point <i>D</i>	<i>DX</i>	-0.16517E-3	-0.93
Poids propre	<i>DY</i>	-0.13870E-4	-9.80
	<i>DZ</i>	-0.80376E-5	-0.24
Point <i>D</i>	<i>DX</i>	-0.16445E-3	-0.94
Force nodale	<i>DY</i>	-0.14245E-4	-9.61
	<i>DZ</i>	-0.10047E-4	-0.20
Point <i>D</i>	<i>DX</i>	-6.3277E-3	1.99
Dilatation	<i>DY</i>	-13.092E-3	0.08
	<i>DZ</i>	16.798E-3	-0.93

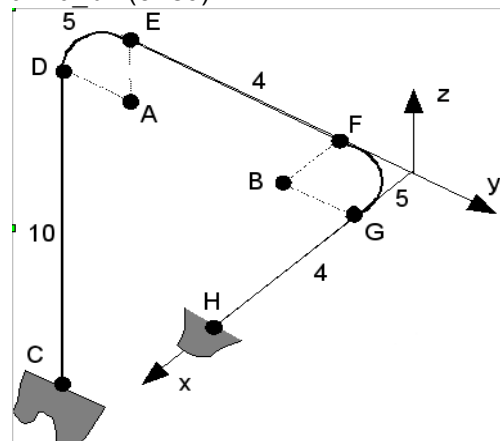
5.4 Remarque

Les résultats obtenus avec *Code_Aster* sont similaires à ceux d' *ABAQUS* par des éléments tuyaux sauf pour le déplacement *DY* (poids propre et force nodale) où l'écart est de l'ordre de 10%.

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation TUYAU 6M (SEG3)



Longueurs en mètres

Conditions aux limites : points *C* et *H*

- DDL poutre : $DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0$
- DDL coque :
 - $UIm = VIm = WIm = 0 (m = 2, 6)$
 - $UOm = VOm = WOm = 0 (m = 2, 6)$
 - $WI1 = WO1 = WO = 0$

6.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 57
Nombre de mailles et type : 28 SEG3

6.3 Grandeurs testées et résultats

Identification	Déplacement	Référence tuyau ($M = 6$)	%
Poids propre	Point <i>D</i> DX	-0.16512E-3	-0.93
	DY	-0.13946E-4	-9.78
	DZ	-0.80369E-5	-0.24
Force nodale	Point <i>D</i> DX	-0.16441E-3	-0.94
	DY	-0.14320E-4	-9.58
	DZ	-0.10047E-4	-0.21
Dilatation	Point <i>D</i> DX	-6.3236E-3	1.99
	DY	-13.093E-3	0.08
	DZ	16.798E-3	0.49

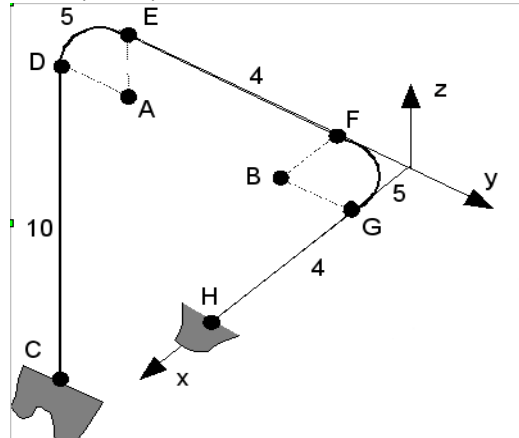
6.4 Remarque

Les résultats obtenus avec *Code_Aster* sont similaires à ceux d' *ABAQUS* pour des éléments tuyaux sauf pour le déplacement DY (poids propre et force nodale) où l'écart est de l'ordre de 10%.

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation TUYAU (SEG4)



Longueurs en mètres

Conditions aux limites : points *C* et *H*

- DDL poutre : $DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0$
- DDL coque :
 - $UIm = VIm = WIm = 0 (m=2,3)$
 - $UOm = VOm = WOm = 0 (m=2,3)$
 - $WI1 = WO1 = WO = 0$

7.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 85
Nombre de mailles et type : 28 SEG4

7.3 Grandeurs testées et résultats

Identification	Déplacement	Référence tuyau ($M = 3$)	%
Poids propre	Point <i>D</i> DX	-0.16517E-3	-0.22
	DY	-0.13870E-4	-4.73
	DZ	-0.80376E-5	-0.18
Force nodale	Point <i>D</i> DX	-0.16445E-3	-0.37
	DY	-0.14245E-4	-1.74
	DZ	-0.10047E-4	-0.50
Dilatation	Point <i>D</i> DX	-6.3277E-3	0.02
	DY	-13.092E-3	0.10
	DZ	16.798E-3	0.27

7.4 Remarques

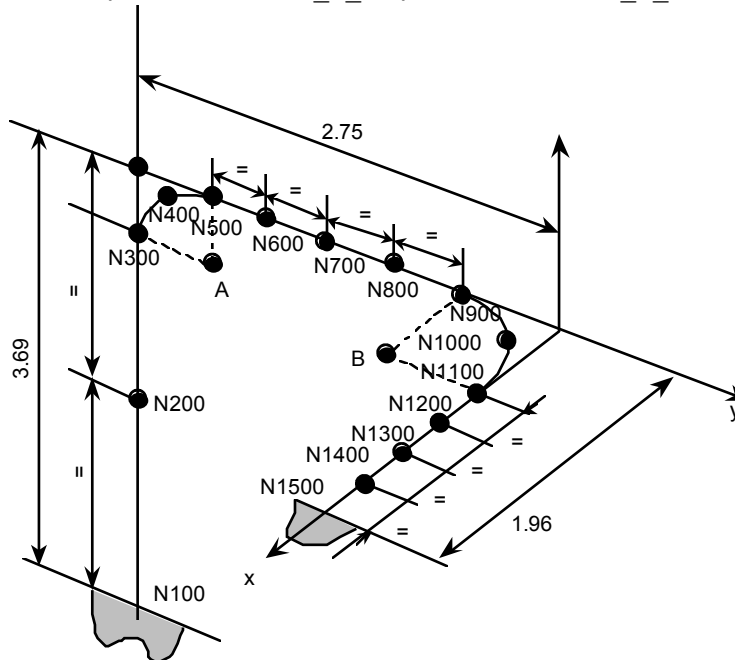
Le maillage en SEG4 est obtenu à partir d'un maillage SEG3 avec la commande CREA_MAILLAGE, MODI_MAILLE avec l'option 'SEG3_4'. Il est important que le nœud milieu du SEG3 soit bien au milieu, le Code_Aster vérifie cette condition avec une tolérance.

Les résultats obtenus avec Code_Aster sont similaires à ceux d'ABAQUS avec des éléments tuyaux sauf pour le déplacement DY (poids propre et force nodale) où l'écart est de l'ordre de 5% et 2%.

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation poutre droite `POU_D_T`, poutre courbe `POU_C_T`.



Longueurs en mètres

Conditions aux limites : points *C* et *H*

- DDL poutre : $DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0$

8.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 15
Nombre de mailles et type : 10 `POU_D_T`
4 `POU_C_T`, 2 par coude

8.3 Grandeurs testées et résultats

Les déplacements sont testés en plusieurs nœuds, par rapport aux références obtenues par les différents codes *POUX*, *ADL* et *TITUS*.

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Poids propre	DX	N300	-1.65800E-04	0.10%
	DY	N300	-2.04000E-05	0.80%
	DZ	N300	-8.01000E-06	0.10%
	DX	N500	-2.39700E-04	0.10%
	DY	N500	1.77700E-04	0.10%
	DZ	N500	-2.68100E-04	0.10%
	DX	N700	-1.85500E-04	0.10%
	DY	N700	1.77500E-04	0.10%
	DZ	N700	-3.94000E-04	0.10%
	DX	N900	-1.27800E-04	0.10%
	DY	N900	1.77400E-04	0.10%
	DZ	N900	-4.97700E-04	0.10%
	DX	N1100	0.00000E+00	1.00E-03
	DY	N1100	5.68200E-05	0.10%
	DZ	N1100	-2.20700E-04	0.10%

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Dilatation	DX	N300	-6.14180E-03	0.10%
	DY	N300	-1.30900E-02	0.10%
	DZ	N300	1.67990E-02	0.10%
	DX	N500	-1.03020E-02	0.10%
	DY	N500	-8.13200E-03	0.10%
	DZ	N500	1.97230E-02	0.10%
	DX	N700	-1.13700E-02	0.10%
	DY	N700	-5.38300E-03	0.10%
	DZ	N700	1.61350E-02	0.10%
	DX	N900	-1.22380E-02	0.10%
	DY	N900	-2.63300E-03	0.10%
	DZ	N900	1.22620E-02	0.10%
	DX	N1100	-6.30800E-03	0.10%
	DY	N1100	1.54200E-03	0.10%
	DZ	N1100	1.93100E-03	0.10%

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Force nodale	DX	N300	-1.65100E-04	0.10%
	DY	N300	-2.08000E-05	0.10%
	DZ	N300	-9.51600E-06	0.10%
	DX	N500	-2.38600E-04	0.10%
	DY	N500	1.77300E-04	0.10%
	DZ	N500	-2.69700E-04	0.10%
	DX	N700	-1.84800E-04	0.10%
	DY	N700	1.77100E-04	0.10%
	DZ	N700	-3.94800E-04	0.10%
	DX	N900	-1.27400E-04	0.10%
	DY	N900	1.77000E-04	0.10%
	DZ	N900	-4.96400E-04	0.10%
	DX	N1100	0.00000E+00	1.00E-03
	DY	N1100	5.67400E-05	0.10%
	DZ	N1100	-2.18600E-04	0.10%

Les efforts sont testés en plusieurs nœuds, par rapport aux références obtenues par les différents codes *POUX*, *ADL* et *TITUS*.

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Poids propre	N	N100	-2.27600E+03	0.50%
	VY	N100	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N100	-1.00950E+01	0.50%
	MT	N100	-5.34000E+01	0.10%
	MFY	N100	-8.96600E+01	0.10%
	MFZ	N100	-1.58500E+02	0.10%
	N	N1500	1.00950E+01	0.50%
	VY	N1500	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N1500	1.16500E+03	0.50%
	MT	N1500	1.56000E+01	0.50%
	MFY	N1500	1.26050E+03	0.50%
	MFZ	N1500	2.90100E+02	0.10%

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Dilatation	N	N100	-7.43100E+03	0.10%
	VY	N100	-7.61300E+03	0.10%
	VZ	N100	2.79100E+03	0.10%
	MT	N100	1.61500E+03	0.10%
	MFY	N100	-6.19300E+03	0.10%
	MFZ	N100	-1.47120E+04	0.10%
	N	N1500	-2.79100E+03	0.10%
	VY	N1500	-7.61300E+03	0.10%
	VZ	N1500	-7.43300E+03	0.10%
	MT	N1500	7.05200E+03	0.10%
	MFY	N1500	-1.04600E+04	0.10%
	MFZ	N1500	8.86200E+03	0.10%

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Force nodale	N	N100	-2.27300E+03	0.10%
	VY	N100	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N100	-9.81000E+00	0.10%
	MT	N100	-5.30200E+01	0.10%
	MFY	N100	-8.95300E+01	0.10%
	MFZ	N100	-1.58630E+02	0.10%
	N	N1500	9.81000E+00	0.10%
	VY	N1500	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N1500	1.16800E+03	0.10%
	MT	N1500	1.19000E+01	0.50%
	MFY	N1500	1.26100E+03	0.10%
	MFZ	N1500	2.89700E+02	0.10%

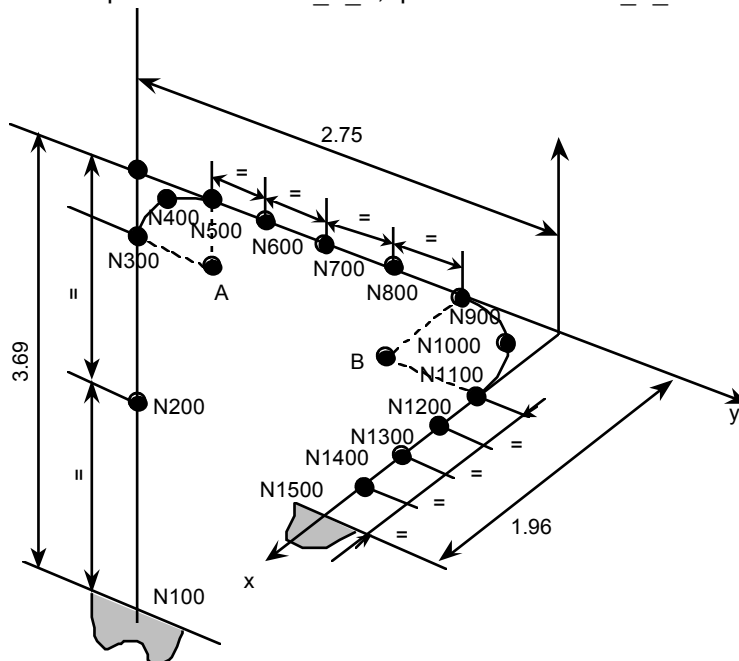
8.4 Remarques

Les résultats obtenus avec *Code_Aster* sont similaires à ceux des autres codes avec des poutres droites et des poutres courbes. L'erreur maximale est inférieure à 1% aussi bien pour les déplacements que pour les efforts.

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Modélisation poutre droite POU_D_T, poutre courbe POU_C_T.



Longueurs en mètres

Conditions aux limites : points C et H

- DDL poutre : $DX = DY = DZ = DRX = DRY = DRZ = 0$

9.2 Caractéristiques du maillage

Nombre de nœuds : 15
Nombre de mailles et type : 10 POU_D_T
4 POU_C_T, 2 par coude

9.3 Grandeur testées et résultats

Les déplacements sont testés en plusieurs nœuds, par rapport aux références obtenues par les différents codes *POUX*, *ADL* et *TITUS*.

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Poids propre	DX	N300	-1.65800E-04	0.10%
	DY	N300	-2.04000E-05	0.80%
	DZ	N300	-8.01000E-06	0.10%
	DX	N500	-2.39700E-04	0.10%
	DY	N500	1.77700E-04	0.10%
	DZ	N500	-2.68100E-04	0.10%
	DX	N700	-1.85500E-04	0.10%
	DY	N700	1.77500E-04	0.10%
	DZ	N700	-3.94000E-04	0.10%
	DX	N900	-1.27800E-04	0.10%
	DY	N900	1.77400E-04	0.10%
	DZ	N900	-4.97700E-04	0.10%
	DX	N1100	0.00000E+00	0.10%
	DY	N1100	5.68200E-05	0.10%
	DZ	N1100	-2.20700E-04	0.10%

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Dilatation	DX	N300	-6.14180E-03	0.10%
	DY	N300	-1.30900E-02	0.10%
	DZ	N300	1.67990E-02	0.10%
	DX	N500	-1.03020E-02	0.10%
	DY	N500	-8.13200E-03	0.10%
	DZ	N500	1.97230E-02	0.10%
	DX	N700	-1.13700E-02	0.10%
	DY	N700	-5.38300E-03	0.10%
	DZ	N700	1.61350E-02	0.10%
	DX	N900	-1.22380E-02	0.10%
	DY	N900	-2.63300E-03	0.10%
	DZ	N900	1.22620E-02	0.10%
	DX	N1100	-6.30800E-03	0.10%
	DY	N1100	1.54200E-03	0.10%
	DZ	N1100	1.93100E-03	0.10%

Chargement	Composante du déplacement	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Force nodale	DX	N300	-1.65100E-04	0.10%
	DY	N300	-2.08000E-05	0.10%
	DZ	N300	-9.51600E-06	0.10%
	DX	N500	-2.38600E-04	0.10%
	DY	N500	1.77300E-04	0.10%
	DZ	N500	-2.69700E-04	0.10%
	DX	N700	-1.84800E-04	0.10%
	DY	N700	1.77100E-04	0.10%
	DZ	N700	-3.94800E-04	0.10%
	DX	N900	-1.27400E-04	0.10%
	DY	N900	1.77000E-04	0.10%
	DZ	N900	-4.96400E-04	0.10%
	DX	N1100	0.00000E+00	0.10%
	DY	N1100	5.67400E-05	0.10%
	DZ	N1100	-2.18600E-04	0.10%

Les efforts sont testés en plusieurs nœuds, par rapport aux références obtenues par les différents codes *POUX*, *ADL* et *TITUS*.

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Poids propre	N	N100	-2.27600E+03	0.50%
	VY	N100	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N100	-1.00950E+01	0.50%
	MT	N100	-5.34000E+01	0.10%
	MFY	N100	-8.96600E+01	0.10%
	MFZ	N100	-1.58500E+02	0.10%
	N	N1500	1.00950E+01	0.50%
	VY	N1500	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N1500	1.16500E+03	0.50%
	MT	N1500	1.56000E+01	0.50%
	MFY	N1500	1.26050E+03	0.50%
	MFZ	N1500	2.90100E+02	0.10%

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Dilatation	N	N100	-7.43100E+03	0.10%
	VY	N100	-7.61300E+03	0.10%
	VZ	N100	2.79100E+03	0.10%
	MT	N100	1.61500E+03	0.10%
	MFY	N100	-6.19300E+03	0.10%
	MFZ	N100	-1.47120E+04	0.10%
	N	N1500	-2.79100E+03	0.10%
	VY	N1500	-7.61300E+03	0.10%
	VZ	N1500	-7.43300E+03	0.10%
	MT	N1500	7.05200E+03	0.10%
	MFY	N1500	-1.04600E+04	0.10%
	MFZ	N1500	8.86200E+03	0.10%

Chargement	Composante de l'effort	Nœud	Valeur de référence	Tolérance
Force nodale	N	N100	-2.27300E+03	0.10%
	VY	N100	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N100	-9.81000E+00	0.10%
	MT	N100	-5.30200E+01	0.10%
	MFY	N100	-8.95300E+01	0.10%
	MFZ	N100	-1.58630E+02	0.10%
	N	N1500	9.81000E+00	0.10%
	VY	N1500	-1.61100E+02	0.10%
	VZ	N1500	1.16800E+03	0.10%
	MT	N1500	1.19000E+01	0.50%
	MFY	N1500	1.26100E+03	0.10%
	MFZ	N1500	2.89700E+02	0.10%

9.4 Remarques

Les résultats obtenus avec *Code_Aster* sont similaires à ceux des autres codes avec des poutres droites et des poutres courbes. L'erreur maximale est inférieure à 1% aussi bien pour les déplacements que pour les efforts.

10 Synthèse des résultats

Modélisation poutre :

Les résultats sont similaires à la solution de référence (modélisation poutre : moyenne de résultats de 3 codes) aussi bien pour la modélisation A, où chaque coude est discrétisé par 20 éléments droits, `POU_D_T`, que pour la modélisation B, où l'on utilise les éléments courbe `POU_C_T`. On note simplement, dans ce cas, un écart un peu plus important en une valeur de déplacement (0.65%).

Modélisation tuyau :

Les résultats *Code_Aster* sont similaires à ceux d' ABAQUS (pour des éléments tuyaux), sauf pour le déplacement *DY* et pour les chargements poids propre et forces nodales où l'écart avec la solution de référence est plus important avec les mailles `SEG3` (10%) qu'avec les mailles `SEG4` (5%).

Le chargement de dilatation thermique donne des résultats similaires.
Ce cas-test permet de tester une tuyauterie non coplanaire.