SSLL102 - Poutre droite soumise à des efforts unitaires

Résumé : Ce test permet une vérification simple des calculs de poutres droites et poutres-tuyaux en mécanique des structures statique linéaire. Le modèle est linéique.

Les modélisations A, B, C, D, F, G, I et J permettent de tester les différents types d'éléments de poutres droites dans *Code_Aster*. Pour chaque modélisation, on calcule simultanément 3 poutres de sections différentes : rectangle, circulaire, cornière.

La modélisation A permet de plus de tester le changement de repère : la poutre est orientée suivant la trisectrice au repère global, avec la modélisation POU_D_E. La modélisation B utilise la modélisation POU_D_T.
Les modélisations C et D utilisent la modélisation avec gauchissement POU_D_TG.
La modélisation E teste le chargement réparti sur des arêtes d'éléments volumiques sur mailles HEXA20.
La modélisation F correspond à un chargement réparti variant linéairement avec la modélisation POU_D_E.
La modélisation G correspond à un chargement réparti variant linéairement avec la modélisation POU_D_TG.
La modélisation H permet de tester un chargement transversal réparti variant linéairement avec la modélisation TUYAU_3M, sur mailles SEG4, que l'on compare avec la modélisation POU_D_T, sur mailles SEG2, pour une section circulaire creuse.
La modélisation I reprend le chargement de la modélisation A pour la modélisation POU_D_EM.
La modélisation J correspond a un chargement réparti variant linéairement avec la modélisation POU_D_EM.

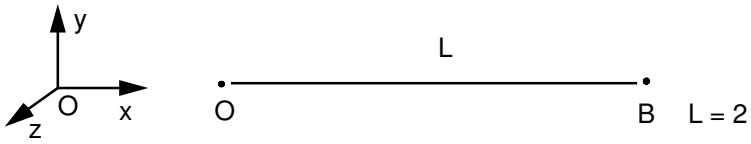
Les valeurs testées sont les déplacements, les efforts généralisés, les réactions aux appuis et les contraintes.

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

1 Problème de référence

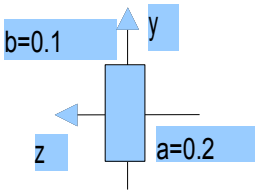
1.1 Géométrie

Poutre droite de longueur L , de direction x . Les dimensions sont exprimées en mètres, $[\mathrm{m}]$.

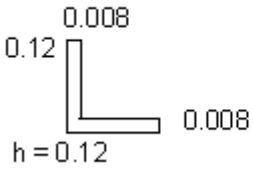


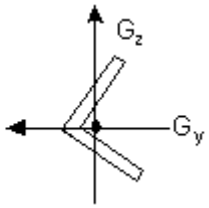
On calcule simultanément 3 types de sections transversales différentes :

1 section rectangulaire

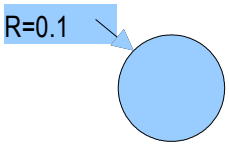


1 section cornière à ailes égales





1 section circulaire



1.2 Propriétés de matériaux

Module de Young : $E=2.10^{11}Pa$
Coefficient de Poisson : $\nu=0.3$

1.3 Conditions aux limites et chargements

1.3.1 Cas encastré-libre, chargements unitaires à l'extrémité

La longueur de la poutre est $L=2m$.
Encastrement en O .
Six chargements unitaires en B :

$Fx=1$ $Mx=1$
$Fy=1$ $My=1$
$Fz=1$ $Mz=1$

Un chargement combiné flexion plus traction : $Fx=1$; $My=1$; $Mz=1$;
Un chargement combiné efforts tranchants plus torsion : $Fy=1$ $Fz=1$ $Mx=1$.

1.3.2 Cas appuis simples, chargements unitaires à l'extrémité

La longueur de la poutre est $L=6m$.
Un chargement réparti linéaire : $Fy=1000.x$ section circulaire, de rayon $0.1m$ (modélisations F, G, H, I) (avec appui simple en O et B dans ce cas).

1.4 Notation des caractéristiques de sections transversales

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

Les caractéristiques géométriques des sections transversales sont notées :

A	aire de la section
I_y, I_z	moments d'inertie géométriques par rapport aux axes principaux d'inertie de la section
JX	constante de torsion
ay, az	coefficients de cisaillement dans les directions Gy et Gz
$A'_y=\frac{A}{ay}$ et $A'_z=\frac{A}{az}$	aires réduites équivalentes à l'effort tranchant
e_y, e_z	excentricité du centre de torsion
JG	constante de gauchissement

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

Solution analytique [bib1] et [bib2].

2.1.1 Cas encastré-libre, chargements unitaires à l'extrémité

Traction simple $u_x=\frac{F_x L}{E S}$

Flexion simple $u_y=\frac{F_y L^3\left(4+\Phi_y\right)}{12 E I_z} \quad \theta_z=\frac{L^2 F_y}{2 E I_z} \quad \Phi_y=\frac{12 E I_y}{L^2 G A_y'}$

Flexion simple $u_z=\frac{F_z L^3\left(4+\Phi_z\right)}{12 E I_y} \quad \theta_y=\frac{-L^2 F_z}{2 E I_y} \quad \Phi_z=\frac{12 E I_z}{L^2 G A_z'}$

Torsion $\theta_x=\frac{M_x L}{G J_x}$

Flexion pure $u_z=-\frac{M_y L^2}{2 E I_y} \quad \theta_y=\frac{M_y L}{E I_y}$

Flexion pure $u_y=\frac{M_z L^2}{2 E I_z} \quad \theta_z=\frac{M_z L}{E I_z}$

Remarque 1 :

Pour la section cornière, comme le centre de cisaillement n'est pas confondu avec le centre de gravité $\left(e_y \neq 0\right)$ *, il faut ajouter le moment de torsion :* $M_x=F_z e_y$ *au chargement* $F_z=1$ *.*
Ceci modifie le déplacement :

$$u_z=\frac{F_z L^3\left(4+\Phi_z\right)}{12 E I_y}+\theta_x e_y \quad \theta_x=\frac{M_x L}{G J_x}$$

De la même façon, le chargement $M_x=1$ *entraîne un déplacement* $u_z=\theta_x e_y$ *.*
Chargement réparti linéaire :

$$u_y(x)=\frac{p x}{360 L E I}\left(3 x^4-10 L^2 x^2+7 L^4\right) \quad u_y^{max}=\frac{0.00652\, p L^4}{E I} \quad en\, x=0.519\, L$$

Remarque 2 :

En ce qui concerne la modélisation A, la poutre est portée par le vecteur $e_1=\frac{1}{\sqrt{3}}\begin{pmatrix}1\\1\\1\end{pmatrix}$ *. Les autres vecteurs du repère local sont :* $e_2=\frac{1}{\sqrt{2}}\begin{pmatrix}-1\\1\\0\end{pmatrix}$ et $e_3=\frac{1}{\sqrt{6}}\begin{pmatrix}-1\\-1\\2\end{pmatrix}$
Les composantes du vecteur déplacement dans le repère global sont obtenues par :

$$u_G=\begin{pmatrix}\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}}\\ \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{6}}\\ \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & \frac{2}{\sqrt{6}}\end{pmatrix} u_{local}$$

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

Efforts généralisés et contraintes en O :

$$N(O)=F_x \qquad \sigma_{xx}=\frac{N}{S}$$

$$M_z(O)=T_y L \qquad T_y=F_y \qquad \sigma_{xx}(y)=\frac{M_z y}{I_z} \qquad \sigma_{xy}=\frac{T_y}{k_y S}$$

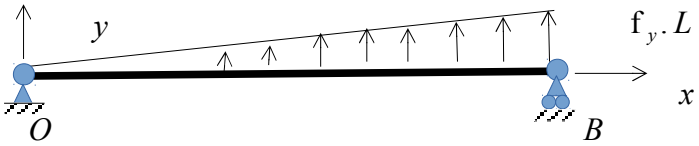
$$M_y(O)=-T_z L \qquad T_z(O)=F_z \qquad \sigma_{xx}(y)=\frac{-M_y z}{I_y} \qquad \sigma_{xz}=\frac{T_z}{k_z S}$$

$$M_x(0)=M_x(B) \qquad \sigma_{xy}=\sigma_{xz}=\frac{M_x R_T}{J_x}$$

$$M_y(0)=M_y(B) \qquad \sigma_{xx}(z)=\frac{M_y z}{I_y}$$

$$M_z(0)=M_z(B) \qquad \sigma_{xx}(y)=\frac{M_y y}{I_z}$$

2.1.2 Cas chargement transversal réparti linéaire



L'équilibre en rotation aut ou r de O donne la valeur de la réaction, d'appui en B :

$$R_{By}=-\int_0^L \mathrm{f}_y . x^2\, dx=-\frac{1}{3}\mathrm{f}_y . L^2=-12000 \quad \text{; puis : } \quad R_{Oy}=-6000 \quad .$$

Puis on a :

$$M_z(x)=\frac{-1000}{6}\left(L^2 x-x^3\right) \qquad V_y(x)=\frac{1000\,L^2}{6}-\frac{1000\,x^2}{2} \qquad \sigma_{xx}^{max}=\frac{M_z^{max} R}{I_z}$$

$$en\ x=\frac{L\sqrt{3}}{3}$$

2.2 Résultats de référence

2.2.1 Cas encastré-libre, chargements unitaires à l'extrémité

Déplacement du point B ,
Efforts généralisés au point O ,
Contraintes du point O .

2.2.2 Cas chargement transversal réparti linéaire

Efforts tranchant et réactions transversales au point O et au point B . Moment fléchissant maximal au point d'abscisse $x=\frac{L\sqrt{3}}{3}$.

2.3 Incertitude sur la solution

Solution analytique.

2.4 Références bibliographiques

1.J.L. BATOZ, G. DHATT : "Modélisation des structures par éléments finis" - Volume 2 Ed. HERMES.

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

2.N.D. PIKLEY : "Formulas for Stress, Stain & Structural Matrices" Ed. John Wiley & Sons.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

2 éléments POU_D_E $k_y = k_z = 1$ $\phi = 0$ par type de section

$S1$: Section rectangulaire modélisée par SECTION : 'GENERALE'

$A = 0.02$ $Iy = 0.1666\text{E}-4$ $Iz = 0.6666\text{E}-4$ $J_x = 0.45776\text{E}-4$

$Ry = 0.1$ $Rz = 0.05$ $R_T = 0.0892632$

Point de calcul des contraintes

$S2$: Section cornière

$A = 1.856\text{E}-3$ $I_y = 4.167339\text{E}-4$ $I_z = 1.045547\text{E}-4$

$J_x = 03.9595\text{E}-8$ $e_y = 41.012\text{E}-3$ $e_z = 0.0$

$S3$: Section rectangulaire modélisée par SECTION : RECTANGLE

$Hy = 0.2$ $Hz = 0.1$

$S4$: Section CERCLE $R = 0.1$

$$I_Y = I_Z = \frac{\pi R^4}{4} = \frac{\pi}{4} 10^{-4}$$

3.2 Caractéristiques du maillage

4×2 mailles SEG_2. La poutre est orientée selon le vecteur $(1,1,1)$.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Cas de charge	Poutre	Identification	Référence
$F_x = 1$	$S1 = S3$	$u_x(B)$	2.887E-10
		$\theta_{xx}(0)$	50.
	$S2$	$u_x(B)$	3.11E-9
	$S4$	$u_x(B)$	1.838E-10
		σ_{xx}	31.83
$F_y = 1$	$S1 = S3$	$u_y(B)$	+1.414E-7
		$\theta_z(B)$	1.225E-7
		$\sigma_{xx}(0)$	3000
	$S2$	$u_y(B)$	9.017E-8
	$S4$	$\sigma_{xx}(0)$	2546.479
$F_z = 1$	$S1 = S3$	$u_z(B)$	6.532E-7
		$\theta_y(B)$	-4.243E-7
		$\sigma_{xx}(0)$	6000
		$\sigma_{xz}(0)$	50
	$S2$	$u_z(B)$	9.279E-7
		$\theta_y(B)$	1.553E-5
		$\theta_x(B)$	1.555E-5
	$S4$	$u_z(B)$	1.386E-7
		$\theta_y(B)$	-9E-8

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

		$\sigma_{xx}(0)$	2546.479
		$\sigma_{xz}(0)$	31.831
$M_x=1$	$S1=S3$	$\theta_x(B)$	3.279E-7
		$\sigma_{xy}=\sigma_{xz}(0)$	1950.0
	$S2$	$\theta_x(B)$	3.791E-4
		$u_z(B)$	2.199E-5
	$S4$	$\theta_x(B)$	9.556E-8
		$\sigma_{xy}=\sigma_{xz}(0)$	636.62
$M_y=1$	$S1=S3$	$u_z(B)$	-4.899E-7
		$\theta_y(B)$	4.243E-7
		$\sigma_{xx}(0)$	3000
	$S2$	$u_z(B)$	-1.959E-8
		$\theta_y(B)$	1.697E-8
	$S4$	$u_z(B)$	-1.04E-7
		$\theta_y(B)$	9.0E-8
		$\sigma_{xx}(0)$	1273.2395
$M_z=1$	$S1=S3$	$u_y(B)$	1.061E-7
		$\theta_z(B)$	1.225E-7
		$\sigma_{xx}(0)$	1500.0
	$S2$	$u_y(B)$	6.763E-8
		$\theta_z(B)$	7.809E-8
	$S4$	$u_y(B)$	9.0E-7
		$\sigma_z(B)$	1.04E-7
		$\sigma_{xx}(0)$	1273.2395
$M_y=1$ $M_z=1$ $F_x=1$	$S1=S3$	$\sigma_{xx}max(0)$	4550.0
		$\sigma_{xx}\left(\frac{a}{2},\frac{b}{2}\right)$	1550.0
	$S4$	$\sigma_{xx}max(0)$	1832.4636
$F_y=1$	$S1,S3$	$\sigma_{xy}(0)$	2000.0
$F_z=1$		$\sigma_{xz}(0)$	2000.0
$M_x=1$		$\sigma_{xx}max(0)$	9000.0
	$S1,S3$	$\sigma_{xx}\left(\frac{a}{2},\frac{b}{2}\right)$	-9000.0
	$S4$	$\sigma_{xx}max(0)$	3601.27
		$\sigma_{xy}(0)$	668.451

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation

2 éléments POU_D_T.
Les coefficients de cisaillement sont :

$S1$: Section rectangulaire

$$AY = AZ = 1.2 = \frac{1}{k_y}$$

$S2$: Section cornière

$$AY = AZ = \frac{1}{0.358}$$

$S4$: Section CERCLE

$$AY = AZ = \frac{10}{9}$$

4.2 Caractéristiques du maillage

4×2 mailles SEG_2 .

4.3 Grandeurs testées et résultats

On donne seulement les valeurs qui diffèrent de la modélisation A (à cause de la prise en compte du cisaillement transverse).

Chargement	Section	Identification	Référence
$F_y = 1$	$S1 = S3$	$u_y(B)$	2.0156E-7
		$\sigma_{xy}(0)$	60.
	$S2$	$u_y(B)$	1.666552E-7
	$S4$	$u\,y(B)$	1.707308E-7
		$\sigma_{xy}(0)$	37.13615
$F_z = 1$	$S1$, $S3$	$u_z(B)$	8.0156E-7
		$\sigma_{xz}(0)$	60.
	$S2$	$u_z(B)$	1.17559754E-6
	$S4$	$u_z(B)$	1.707308E-7
		$\sigma_{xz}(0)$	37.13615
$F_y = 1$	$S4$	$\sigma_{xz}(0)$	673.75592
$F_z = 1$		$\sigma_{xy}(0)$	673.75592
$M_x = 1$			

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation

2 éléments POU_D_TG.
Le gauchissement n'est pas gêné.
Les coefficients de cisaillement sont identiques à ceux de la modélisation B.

5.2 Caractéristiques du maillage

2×2 mailles SEG_2.

5.3 Grandeurs testées et résultats

Chargement	Section	Identification	Référence
$F_y = 1$	$S1 = S3$	$u_y(B)$	2.0156E-7
		$\theta_{xy}(0)$	60.
	$S2$	$u_y(B)$	1.666552E-7
	$S4$	$u_y(B)$	1.70684E-7
		$\theta_{xy}(0)$	35.367765
$F_z = 1$	$S1, S3$	$u_z(B)$	8.0156E-7
		$\theta_{xz}(0)$	60.
	$S2$	$u_z(B)$	1.17559754E-6
	$S4$	$u_z(B)$	1.70684E-7
		$\theta_{xz}(0)$	35.367765

5.4 Remarque

Le gauchissement n'est pas gêné. Les résultats sont donc identiques à ceux de la modélisation B.

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

6 Modélisation D

6.1 Caractéristiques de la modélisation

Éléments POU_D_TG, torsion gênée

$$JG=\begin{cases}5.5556\mathrm{E}-8\ pour\ S_1\\ 4.439822\mathrm{E}-11\ pour\ S_2\end{cases}$$

en 0 $GRX=0$

6.2 Caractéristiques du maillage

- 10 mailles SEG_2,
- raffinement vers l'encastrement.

6.3 Grandeurs testées et résultats

Mêmes résultats que pour la modélisation C, sauf ceux qui concernent les effets de gauchissement.

Chargement	Section	Identification	Référence
$F_z=1$	$S2$	$\theta_x=DRX$	2.62034E-5
		$u_z=DZ$	1.14578E-6
		GRX	1.34652E-5
$M_x=1$	$S1$	$u_z=DZ$	5.52E-7
		GRX	2.84E-7
	$S2$	u_z	2.6203E-5
		θ_x	6.3892E-4
		GRX	3.28324E-4

6.4 Remarques

Pour θ_x la solution est (cf [bib1]) :

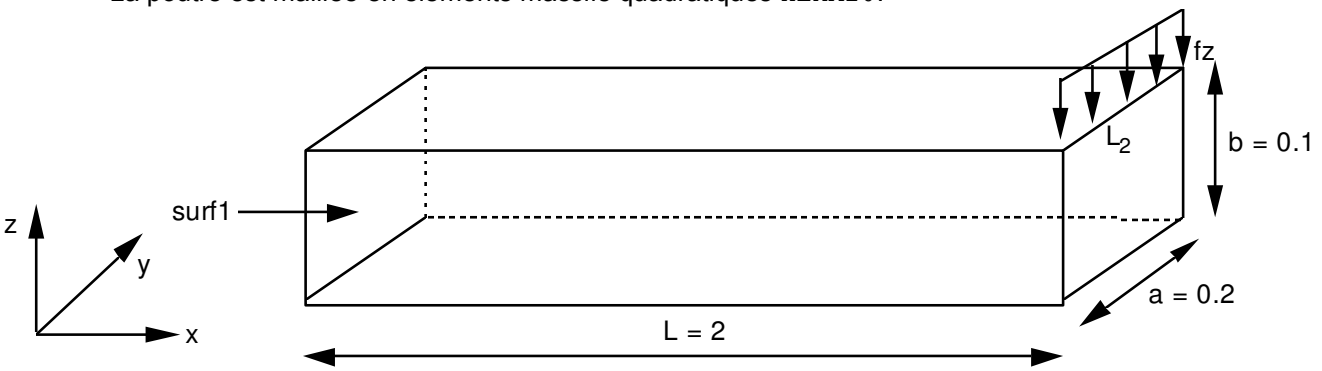
$$\theta_x=\frac{M_x L}{G J_x}+\frac{M_x\left(1-e^{2\alpha L}-2e^{\alpha L}\right)}{\alpha^3 E J G\left(1+e^{2\alpha L}\right)}\qquad \alpha^2=\frac{G J}{E J G}$$

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

7 Modélisation E

7.1 Caractéristiques de la modélisation

La poutre est maillée en éléments massifs quadratiques HEXA20.



La poutre est encastrée au niveau de la section *surf1* . Elle est soumise à un effort tranchant unitaire qui est modélisé par une densité linéique de charge *fz* s'appliquant sur les 4 mailles SEG3 constituant l'arête supérieure *L2* .

7.2 Caractéristiques du maillage

La poutre est maillée avec 640 éléments massifs quadratiques HEXA20.
Le modèle comporte 3665 nœuds.

7.3 Grandeurs testées et résultats

On teste la valeur de la flèche selon *z* du nœud milieu de la section où l'on applique le chargement (nœud *N62*).

Identification	Référence	*Aster*	% différence
Dz du nœud *N62*	-8.0E-7	-7.9523E-7	-0.596

7.4 Remarques

La valeur de référence correspond à la valeur donnée par la Résistance Des Matériaux.

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

8 Modélisation F

8.1 Caractéristiques de la modélisation

Le modèle est composé de 10 éléments poutre droite d'Euler : modélisation POU_D_E. La section est circulaire pleine, de rayon $0.1\,m$.

8.2 Caractéristiques du maillage

Il est constitué de 10 mailles SEG2. La longueur de la poutre est maintenant $L=6\,m$.

8.3 Grandeurs testées et résultats

8.3.1 Efforts intérieurs

	Résultats analytiques
$V_y(0)$	6.0000E+03
$V_y(6)$	-1.2000E+04
MFZ en $x=2\sqrt{3}$	-1.3856E+04

8.3.2 Contrainte axiale

	Résultats analytiques
$SIXX$ en $x=2\sqrt{3}$	1.7642E+07

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

9 Modélisation G

9.1 Caractéristiques de la modélisation

Le modèle est composé de 10 éléments de poutre droite de Timoshenko avec gauchissement : modélisation POU_D_TG. La section est circulaire pleine, de rayon $0.1\,m$.
L'effort réparti est imposé suivant l'axe y. L a flexion a donc lieu autour de z.

9.2 Caractéristiques du maillage

Il est constitué de 10 mailles SEG_2. La longueur de la poutre est $L=6\,m$.

9.3 Grandeurs testées et résultats

9.3.1 Efforts intérieurs

	Résultats analytiques
$V_y(0)$	6.0000E+03
$V_y(6)$	-1.2000E+04
MFZ en $x=2\sqrt{3}$	-1.3856E+04

9.3.2 Déplacement (flèche proche du milieu de la poutre)

	Résultats *Aster* (non régression)	Tolérance (%)
DY au point $x=3.115977734$	3.23499E-03	1.E-4

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

10 Modélisation H

10.1 Caractéristiques de la modélisation

Le modèle est composé de 21 éléments TUYAU_3M s'appuyant sur des mailles SEG4. La section est circulaire creuse de rayon $0,1$ et d'épaisseur $0,01$.
L'effort réparti est imposé suivant l'axe y . L a flexion a donc lieu autour de z .

10.2 Caractéristiques du maillage

Il est constitué de 21 mailles SEG3, transformées en mailles SEG4. La longueur du tuyau est $L=6m$.

10.3 Grandeurs testées et résultats

10.3.1 Déplacements

	Résultats analytiques
$D_y maxi$ au point $x=3.115977734$	9.38888E-03

10.3.2 Réactions transversales

	Résultats analytiques
R_{Oy}	-6.0000E+03
R_{By}	-1.2000E+04

10.3.3 Efforts intérieurs

	Résultats analytiques
$V_y(x=0)$	6.0000E+03
$V_y(x=L=6)$	-1.2000E+04
MFZ en $x=2\sqrt{3}$	-1.3856E+04

10.3.4 Contraintes

Elle sont calculées au point d'abscisse $x=\frac{L\sqrt{3}}{3}$ qui correspond au moment maximum :

$$M_z(x)=\frac{-1000}{9\sqrt{(3)}}L^3=-13856.41\,N.m$$

Pour l'angle 0° sur la circonférence du tuyau (l'origine des angles étant l'axe z), les contraintes sont nulles, et pour l'angle 90°, elles sont maximum : $\sigma_{xx}^{max}=\frac{M_z^{max}(R-e/2)}{I_z}=-4.87363\mathrm{E}+07\,Pa$

	Référence	Tolérance
$\sigma_{xx}(\alpha=0)$	0	0,10%
$\sigma_{xx}(\alpha=90)$	-4.87363E+07	1,00%
MFZ	-1.3856E+04	1.%

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

11 Modélisation I

11.1 Caractéristiques de la modélisation

Le modèle est composé de 2 éléments POU_D_EM.
Le chargement est similaire à celui de la modélisation A (moment de torsion uniquement)

11.2 Caractéristiques du maillage

Il est constitué de 2 mailles SEG2. La longueur de la poutre est $L=2\,m$

La poutre est orientée selon le vecteur $(1,1,1)$.

La section est rectangulaire, identique à celle de la modélisation A.

11.3 Grandeurs testées et résultats

11.3.1 Rotations dues au moment de torsion

	Résultats *Aster* (non régression)	**Tolérance (%)**
$DRX=DRY=DRZ$	3.2792525E-07	1.E-6

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

12 Modélisation J

12.1 Caractéristiques de la modélisation

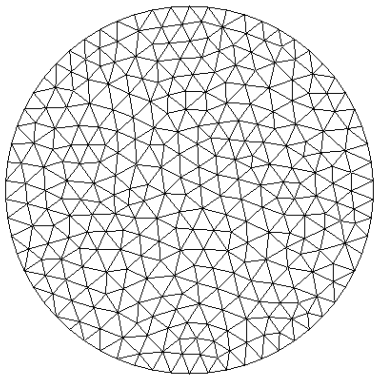
Le modèle est composé de 10 éléments POU_D_EM.
On applique une force répartie de $6000\,N/m$ sur toute la poutre.

12.2 Caractéristiques du maillage

Il est constitué de 10 mailles SEG2. La longueur de la poutre est $L=6\,m$

Le maillage de la section est constitué de :

- 373 nœuds
- 62 SEG2
- 682 TRIA3



12.3 Grandeurs testées et résultats

12.3.1 Efforts intérieurs

Efforts intérieurs	Résultats analytiques
$V_y(0)$	6.0000E+03
$V_y(6)$	-1.2000E+04
MFZ	-1.3856E+04

12.3.2 Déplacement (flèche proche du milieu de la poutre)

	Résultats *Aster* (non régression)	Tolérance (%)
DY au point $x=3.115977734$	3.23499E-03	1.E-4

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

13 Synthèse des résultats

Ce test permet de vérifier simultanément le bon fonctionnement des éléments POU_D_E, POU_D_T et POU_D_TG sur 3 types de sections différentes. La coïncidence parfaite des résultats avec les solutions analytiques (RDM) est normale, et doit toujours être observée, puisque la solution est contenue dans les fonctions de forme des éléments.

De plus, la modélisation E permet de tester le chargement réparti sur des arêtes d'éléments volumiques. L'écart à la solution analytique (RDM) est inférieur à 0.6% .

Les modélisations F, G, H et J permettent de tester le chargement réparti (variation linéaire) pour les éléments de poutre POU_D_E, POU_D_TG, POU_D_EM et les éléments de TUYAU_3M. L'écart à la solution analytique (Résistance des Matériaux) est inférieur à 0.6% .

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