

# ICAB Surface Exemples

Exemples de calculs pour coques

manuel de l'utilisateur

## *Table des Matières*

SSLS01 PLAQUE RECTANGULAIRE EN PORTE-A-FAUX .....	2
SSLS02 PLAQUE CARREE SIMPLEMENT SUPPORTEE .....	3
SSLS03 PLAQUE CIRCULAIRE SOUS CHARGE UNIFORME .....	6
SSLS04 POUTRE A SECTION EN Z.....	6
SSLS05 POUTRE CAISSON EN TORSION .....	7
SSLS06 CYLINDRE MINCE SOUS PRESSION RADIALE UNIFORME.....	7
SSLS07 CYLINDRE SOUS CHARGE AXIALE UNIFORME.....	8
SSLS08 CYLINDRE SOUS PRESSION HYDROSTATIQUE.....	8
SSLS09 CYLINDRE SOUS SON POIDS PROPRE .....	9
SSLS10 TORE SOUS PRESSION INTERNE UNIFORME .....	9
SSLS19 COQUE CYLINDRIQUE SOUMISE A SON POIDS PROPRE .....	10
SSLS20 COQUE CYLINDRIQUE PINCEE .....	10

## Introduction

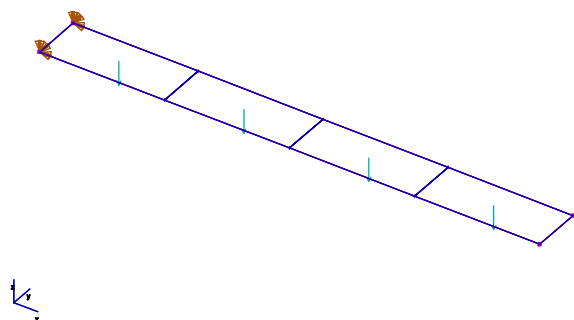
Les exemples présentés dans ce manuel sont extraits du "Guide de validation des progiciels de calcul de structures" publié par l'AFNOR. Ces tests ont été élaborés par la Société Française des Mécaniciens (SFM) avec pour objectif de "contribuer à l'amélioration de la qualité et de la fiabilité des progiciels de calcul de structures, outils indispensables à la conception et au dimensionnement des équipements mécaniques".

Pour dépouiller un projet, par exemple SSLS01, ouvrez le fichier SSLS01.IGB avec le logiciel ICAB Force (<http://www.icab.fr/download>).

Si vous disposez d'une licence d'utilisation, pour créer, calculer et dépouiller un modèle à partir d'un fichier de données IGA, suivez les étapes suivantes:

1. Vous éditez, avec ICAB Edit, un fichier au format IGA (par exemple SSLS01.IGA) qui contient la description de votre structure.
2. Vous générez le projet SSLS01 à partir du fichier SSLS01.IGA avec la commande ICAB "Fichier, Importer"
3. Vous lancez les calculs avec la commande « Calcul, calcul ».
4. Vous pouvez alors dépouiller ou extraire une note de calcul.

### SSLS01 Plaque rectangulaire en porte-à-faux



Plaque de longueur  $l=1\text{m}$ , de largeur  $b=0.1\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.005\text{m}$  en acier ( $E=2.1\text{E}11\text{ Pa}$ ) encastée à un extrémité soumise à une pression uniforme  $p=-1700\text{ Pa}$ .

La théorie des poutres donne la flèche suivante:

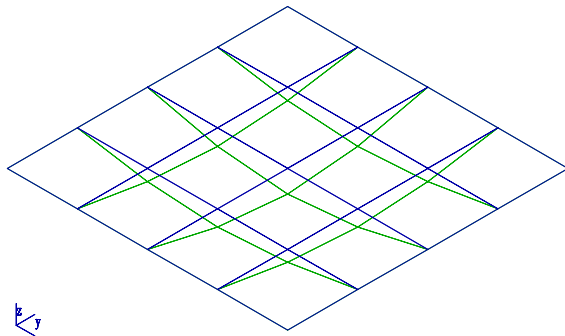
$$w = p b l^4 / (8 EI), I = b h^3 / 12, w = -0.09714\text{ m}$$

La théorie classique des poutres ne représente pas exactement la déformation des plaques,

car une poutre ne prend pas en compte la variation de flèche dans la section dans la direction transverse ( $y$ ), ni l'assouplissement dû au cisaillement transverse.

nombre de mailles (en x)	flèche (1 maille en y) (m)	flèche au centre (2 mailles en y)
1	-0.0948	-0.0948
2	-0.09317	-0.0931
3	-0.09424	-0.0941
4	-0.09482	-0.0945
5	-0.0952	-0.0948
6	-0.0954	-0.095

SSLS02 Plaque carrée simplement supportée



Plaque carrée de largeur  $l=1\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.01\text{m}$  simplement supportée sur le contour ( $Y=0.5, dz=0, dqy=0; Z=0.5, dz=0, dqz=0$ ).

Matériau:  $E=2.1\text{E}11\text{ Pa}$ ,  $\nu=0.3$   $\rho=7950\text{ kg.m}^{-3}$

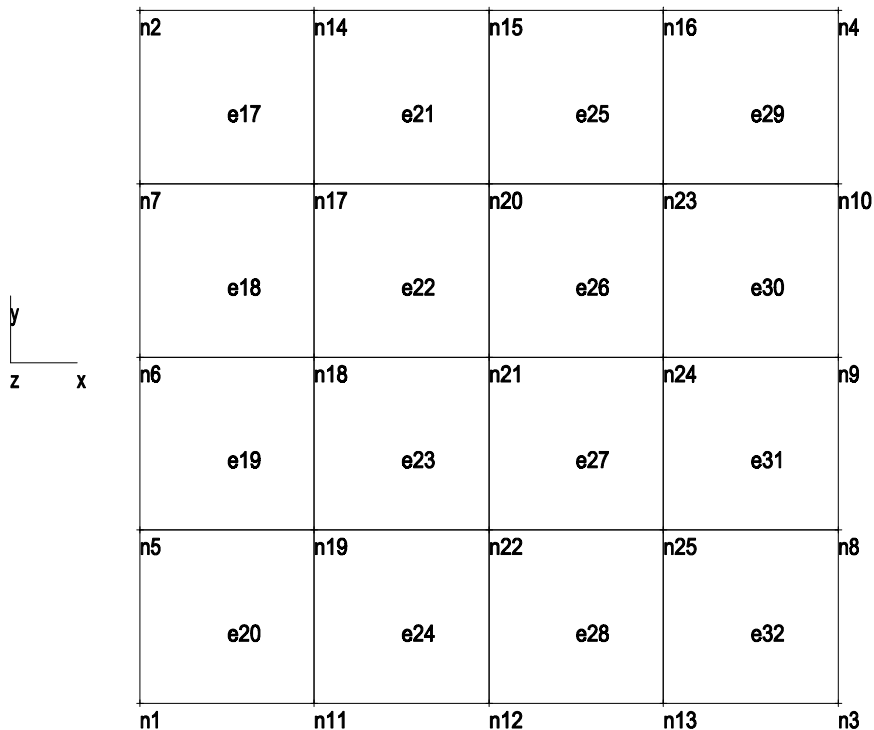
Champ de gravité (pesanteur)  $g=9.81\text{ m.s}^{-2}$ .

Les calculs avec des coques "épaisses" (prise en compte de la déformée associée au cisaillement transverse) fournissent des

flèches plus défavorables que des calculs avec des coques minces (hypothèse de Love-Kirchhoff  $w=0.158\text{mm}$ ):

nombre de mailles par côté	flèche au centre (mm) avec « coque épaisse » :
2	0.129
4	0.161 => précision suffisante à partir de 4 divisions
6	0.163
8	0.164

Maillage 4x4



SSLS02 PLAQUE CARRE SIMPLEMENT SUPPORTEE  
calcul 1 'POIDS PROPRE'

-----  
DEPLACEMENT (TRANSLATIONS ET ROTATIONS)  
X déplacement en translation X  
Y déplacement en translation Y  
Z déplacement en translation Z  
RX rotation autour de l'axe X  
RY rotation autour de l'axe Y  
RZ rotation autour de l'axe Z  
D déplacement total (x,y,z)  
R rotation totale (rx,ry,rz)  
-----

Noeud	X m	Y m	Z m	RX rad	RY rad	RZ rad	D m	R rad
6	0	0	0	0	0.5435E-3	0	0	0.5435E-3
18	0	0	-0.115E-3	-0.000E-3	0.3721E-3	0	0.1145E-3	0.3721E-3
21	0	0	-0.161E-3	0.0000E-3	0.0000E-3	0	0.1611E-3	0.0000E-3

Détail des sorties pour les éléments e18 et e22 sur le maillage 4x4:

Propriété 2 PLAT10MM  
SSLS02 PLAQUE CARRE SIMPLEMENT SUPPORTEE  
calcul 1 'POIDS PROPRE'

-----  
EFFORTS RESULTANTS [coque] (valeurs aux points de Gauss)  
Nxx effort linéique de membrane (coque)  
Nyy effort linéique de membrane (coque)  
Nxy effort linéique de membrane (coque)  
Mxx moment fléchissant linéique (coque)  
Myy moment fléchissant linéique (coque)  
Mxy moment fléchissant linéique (coque)  
Qxz effort tranchant linéique (coque)  
Qyz effort tranchant linéique (coque)  
w flèche de la coque  
-----

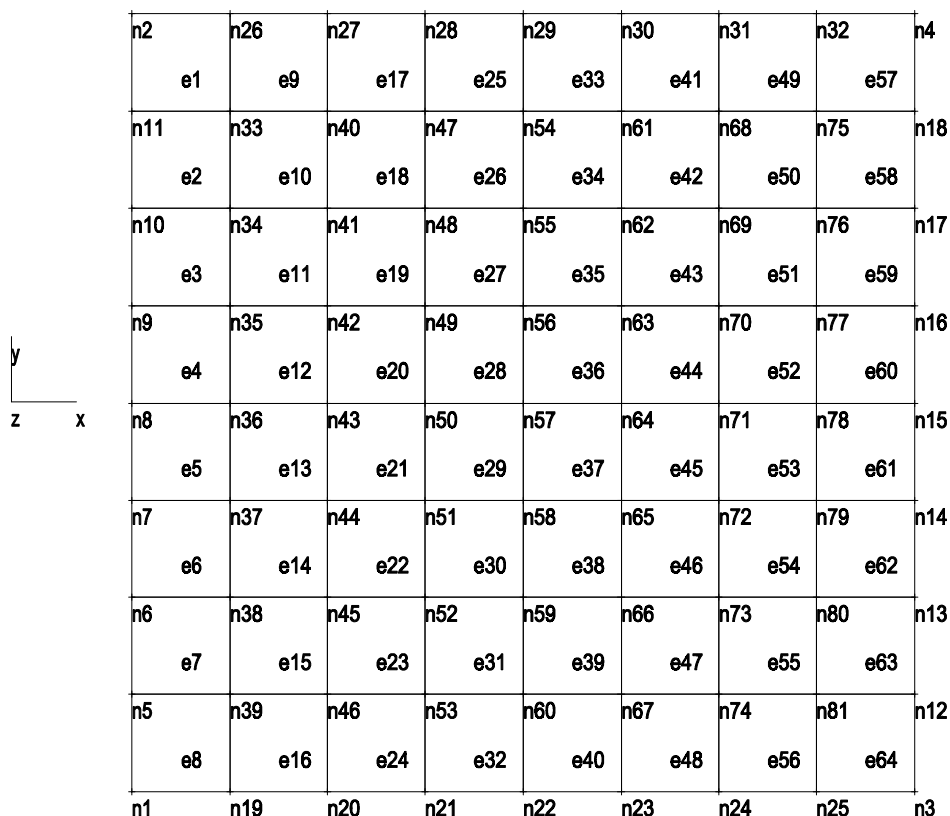
Elément Noeud	Nxx N/m	Nyy N/m	Nxy N/m	Mxx N	Myy N	Mxy N	Qxz N/m	Qyz N/m	w m
18									
7.	0	0	0	11.64818	7.39358	-9.50642	-156.5340	-7.3586	0.0187E-3
17.	0	0	0	15.16003	19.09974	-8.78258	-156.5340	-27.4628	0.0698E-3
18.	0	0	0	17.22816	19.72017	-4.68542	-184.6654	-27.4628	0.0848E-3
6.	0	0	0	13.71631	8.01402	-5.40927	-184.6654	-7.3586	0.0227E-3
22									
17.	0	0	0	28.65097	28.65097	-4.60715	-39.2345	-39.2345	0.0961E-3
20.	0	0	0	30.09640	33.46907	-2.92082	-39.2345	-51.2914	0.1168E-3
21.	0	0	0	34.91449	34.91449	-1.23448	-51.2914	-51.2914	0.1420E-3
18.	0	0	0	33.46907	30.09640	-2.92082	-51.2914	-39.2345	0.1168E-3

Propriété 2 PLAT10MM  
SSLS02 PLAQUE CARRE SIMPLEMENT SUPPORTEE  
calcul 1 'POIDS PROPRE'

-----  
CONTRAINTES [coque] (valeurs aux points de Gauss)  
Sxx1 contrainte sur la face supérieure (coque)  
Sxy1 contrainte sur la face supérieure (coque)  
Syy1 contrainte sur la face supérieure (coque)  
Sxx2 contrainte sur la face inférieure (coque)  
Sxy2 contrainte sur la face inférieure (coque)  
Syy2 contrainte sur la face inférieure (coque)  
Sm contrainte de Mises (coque)  
Sxz contrainte de cisaillement au coeur (coque)  
Syz contrainte de cisaillement au coeur (coque)  
-----

Elément Noeud	Sxx1 N/m2	Sxy1 N/m2	Syy1 N/m2	Sxx2 N/m2	Sxy2 N/m2	Syy2 N/m2	Sm N/m2	Sxz N/m2	Syz N/m2
18									
7.	698.9E3	-570.4E3	443.6E3	-698.9E3	570.4E3	-443.6E3	1162.4E3	-18.8E3	-0.9E3
17.	909.6E3	-527.0E3	1146.0E3	-909.6E3	527.0E3	-1146.0E3	1389.7E3	-18.8E3	-3.3E3
18.	1033.7E3	-281.1E3	1183.2E3	-1033.7E3	281.1E3	-1183.2E3	1217.6E3	-22.2E3	-3.3E3
6.	823.0E3	-324.6E3	480.8E3	-823.0E3	324.6E3	-480.8E3	910.4E3	-22.2E3	-0.9E3
22									
17.	1719.1E3	-276.4E3	1719.1E3	-1719.1E3	276.4E3	-1719.1E3	1784.5E3	-4.7E3	-4.7E3
20.	1805.8E3	-175.2E3	2008.1E3	-1805.8E3	175.2E3	-2008.1E3	1938.9E3	-4.7E3	-6.2E3
21.	2094.9E3	-74.1E3	2094.9E3	-2094.9E3	74.1E3	-2094.9E3	2098.8E3	-6.2E3	-6.2E3
18.	2008.1E3	-175.2E3	1805.8E3	-2008.1E3	175.2E3	-1805.8E3	1938.9E3	-6.2E3	-4.7E3

Maillage 8x8



-----  
 DEPLACEMENT (TRANSLATIONS ET ROTATIONS) (valeurs aux nœuds)  
 X, Y, Z déplacements en translation  
 RX, RY, RZ rotations  
 D déplacement total (x,y,z), R rotation totale (rx,ry,rz)  
 -----

Noeud	X m	Y m	Z m	RX rad	RY rad	RZ rad	D m	R rad
8	0	0	0	0	0.5458E-3	0	0	0.5458E-3
36	0	0	-0.065E-3	-0.000E-3	0.4925E-3	0	0.0649E-3	0.4925E-3
43	0	0	-0.118E-3	0.000E-3	0.3589E-3	0	0.1182E-3	0.3589E-3
50	0	0	-0.152E-3	0.000E-3	0.1868E-3	0	0.1523E-3	0.1868E-3
57	0	0	-0.164E-3	-0.000E-3	0.000E-3	0	0.1640E-3	0.000E-3

Détail des sorties pour l'élément e28 :

Propriété 2 PLAT10MM  
 SLS02 PLAQUE CARRE SIMPLEMENT SUPPORTEE (maille 8x8)  
 calcul 1 'POIDS PROPRE'

-----  
 EFFORTS RESULTANTS [SHELL coque] (valeurs aux points de Gauss)  
 -----

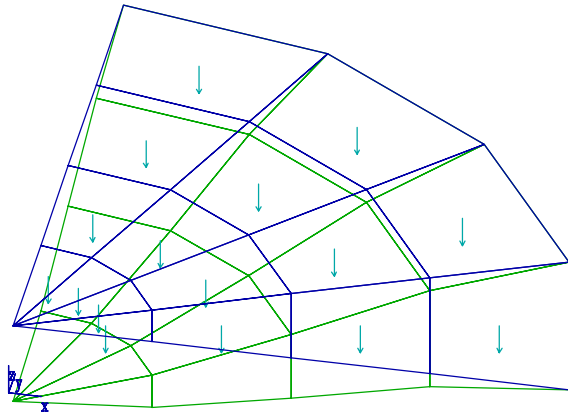
Elément Noeud	Nxx N/m	Nyy N/m	Nxy N/m	Mxx N	Myy N	Mxy N	Qxz N/m	Qyz N/m	w m
28-									
49.	0	0	0	35.17014	35.17014	-1.17937	-23.47221	-23.47221	0.1461E-3
56.	0	0	0	35.54015	36.40351	-0.74769	-23.47221	-24.61274	0.1524E-3
57.	0	0	0	36.77352	36.77352	-0.31601	-24.61274	-24.61274	0.1591E-3
50.	0	0	0	36.40351	35.54015	-0.74769	-24.61274	-23.47221	0.1524E-3

-----  
 CONTRAINTES [SHELL coque] (valeurs aux points de Gauss)  
 -----

Elément Noeud	Sxx1 N/m2	Sxy1 N/m2	Syy1 N/m2	Sxx2 N/m2	Sxy2 N/m2	Syy2 N/m2	Sm N/m2	Sxz N/m2	Syz N/m2
28-									
49.	2110.2E3	-70.8E3	2110.2E3	-2110.2E3	70.8E3	-2110.2E3	2113.8E3	-2.8E3	-2.8E3
56.	2132.4E3	-44.9E3	2184.2E3	-2132.4E3	44.9E3	-2184.2E3	2160.2E3	-2.8E3	-3.0E3
57.	2206.4E3	-19.0E3	2206.4E3	-2206.4E3	19.0E3	-2206.4E3	2206.7E3	-3.0E3	-3.0E3
50.	2184.2E3	-44.9E3	2132.4E3	-2184.2E3	44.9E3	-2132.4E3	2160.2E3	-3.0E3	-2.8E3

NB. La différence de la valeur maximale des contraintes calculées aux points de Gauss est de 5% entre le maillage grossier 4x4 et le maillage plus fin 8x8.

SSLS03 Plaque circulaire sous charge uniforme



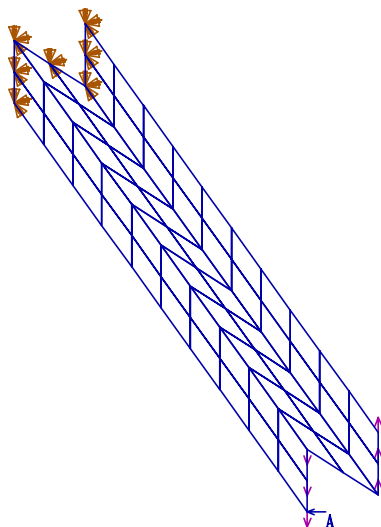
Plaque circulaire encastrée au bord de rayon  $r=1\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.005\text{m}$  soumise à une pression uniforme  $p=-1000\text{Pa}$ .

Un quart de la plaque seulement est modélisée avec des plans de symétrie. Dans le plan de symétrie  $XoZ$ , les blocages sont  $dy=0$ ,  $dqx = dqz=0$ ; dans le plan  $YoZ$ ,  $dx=0$ ,  $dqy = dqz=0$ . Attention, le noeud central est entièrement bloqué sauf en  $z$  (ce noeud cumule les deux conditions de symétrie). La plaque est divisée en 4 secteurs. L'augmentation des divisions selon le rayon

augmente la précision, toutefois 4 sections suffisent pour atteindre une précision sur la flèche de l'ordre de 0.5%:

divisions	flèche (mm)
1	7.668
2	6.710
3	6.580
4	6.534
5	6.512
6	6.50

SSLS04 Poutre à section en Z

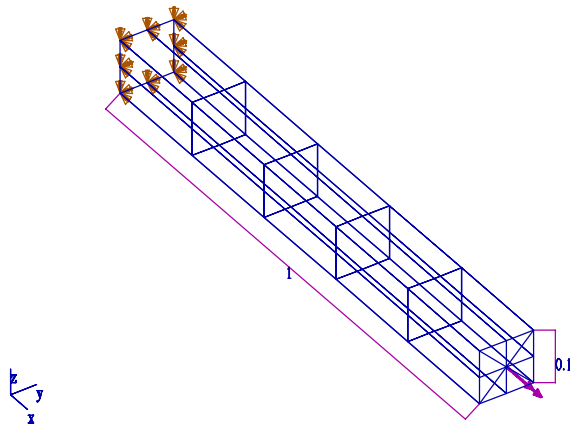


Poutre Z soumise à un cisaillement à son extrémité.

déplacement du point A:  $x= -0.000749$ ,  $y=0.005676$ ,  $z=-0.007151$



SSLS05 Poutre caisson en torsion

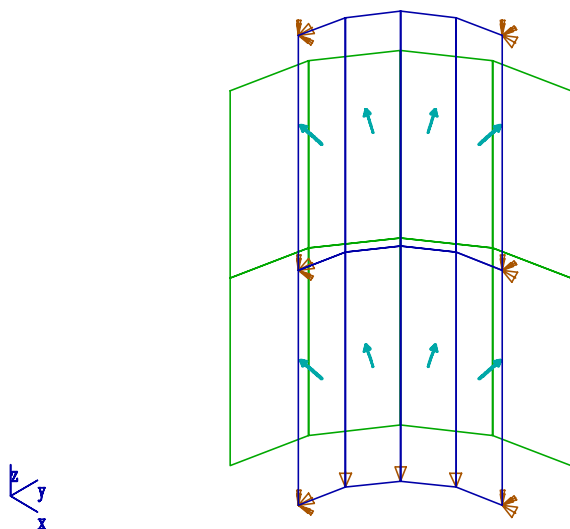


Poutre caisson encastée à son extrémité soumise à un moment  $M=10 \text{ N.m}$  à l'autre extrémité (noeuds reliés au point central par des barres rigides).

Déplacement du point B (0.8, -0.05, 0)  
 $z = -9.87\text{E-}6 \text{ m}$ ,  $qx = 0.197\text{E-}4 \text{ rad}$ .

Contrainte  $s_{xy}$  maximale = 116 000 Pa.

SSLS06 Cylindre mince sous pression radiale uniforme



Un cylindre de rayon  $R=1\text{m}$  et de hauteur  $L=4\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.02\text{m}$  est soumis à une pression interne  $p=10\,000\text{Pa}$ .

Un quart de cylindre seulement est modélisé avec 2 plans de symétrie (XoZ) et (YOZ)..

La solution analytique pour une coque mince conduit à:

contrainte de Mises  $s = 500\text{E}3 \text{ Pa}$ .

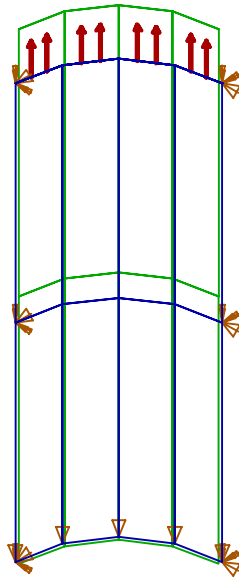
la dilatation radiale  $dR = 2.38 \text{ E-}6\text{m}$

la variation de hauteur  $dL = -2.86 \text{ E-}6\text{m}$

La précision de la solution dépend du nombre N de secteurs employés dans la modélisation (avec coque épaisse):

N	$s \text{ (x } 10^3 \text{ Pa)}$	$dR \text{ (x } 10^{-6} \text{ m)}$	$-dL \text{ (x } 10^{-6} \text{ m)}$
2	462 -7.6%	2.12	2.64
3	483 -3.4%	2.3	2.76
4 (figure)	490 -2%	2.34	2.80
5	494 -1.2%	2.35	2.82
6	496 -0.8%	2.36	2.83
12	499 -0.2%	2.36	2.85

## SSLS07 Cylindre sous charge axiale uniforme



Un cylindre de rayon  $R=1\text{m}$  et de hauteur  $L=4\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.02\text{m}$  est soumis à une traction uniforme  $q=10\,000\text{ N/m}$ .

La solution analytique pour une coque mince conduit à:

contrainte axiale  $s= 500\text{E}3\text{ Pa}$ .

la dilatation radiale  $dR = -0.714\text{E-}6\text{ m}$

la variation de hauteur  $dL = 9.52\text{E-}6\text{ m}$

NB. pour appliquer une charge linéique sur le bord supérieur du cylindre, suivre les opérations suivantes:

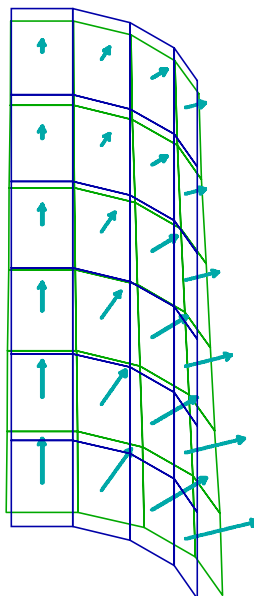
1. mailler la ligne supérieure du cylindre par des éléments de type "barre élastique" (ROD).
2. appliquer une charge linéique sur ces barres élastiques.

Une charge répartie  $P$  sur une barre élastique de longueur  $L$  ne crée pas de moment

fléchissant sur cette barre. Cette charge est donc équivalente à deux charges concentrées sur chaque extrémité de la barre d'intensité  $P.L/2$ .

Si la barre élastique est posée sur une coque, on peut choisir une barre de section nulle  $AR=0$  pour que cette barre ne rigidifie pas la structure.

## SSLS08 Cylindre sous pression hydrostatique



Un cylindre de rayon  $R=1\text{m}$  et de hauteur  $L=4\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.02\text{m}$  est soumis à une pression hydrostatique  $20000\text{Pa}*(1-z/L)$ .

La solution analytique pour une coque mince conduit à:

la dilatation radiale  $dR(z=L/2) = 2.38\text{E-}6\text{ m}$

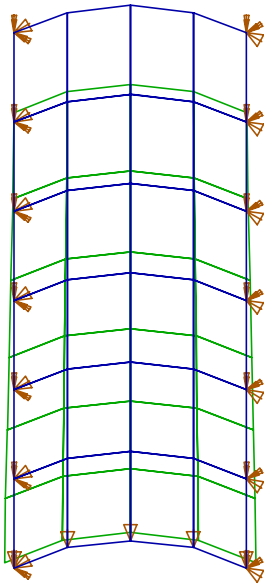
la variation de hauteur  $dL(z=L) = -2.86\text{E-}6$

Pour modéliser finement la variation de pression en fonction de la hauteur, il est nécessaire de diviser le cylindre sur sa hauteur en éléments (la pression est constante sur un élément donné). Avec 6 divisions:

$dR(z=L/2) = 2.335\text{E-}6\text{ (-1.9\%)}$

$dL(z=L) = -2.802\text{E-}6\text{ (-2\%)}$

SSLS09 Cylindre sous son poids propre



Un cylindre de rayon  $R=1\text{m}$  et de hauteur  $L=4\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.02\text{m}$  est soumis à son poids propre  $7850 \text{ kg/m}^3 * 10 \text{ m/s}^2$ .

La solution analytique pour une coque mince conduit à:

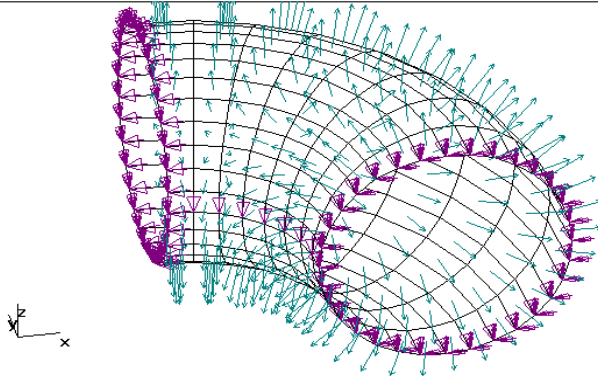
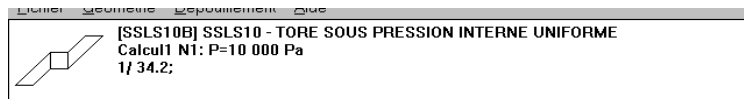
- contrainte axiale  $s(z=0) = 3.14\text{E}5 \text{ Pa}$ .
- la dilatation radiale  $dR(z=0) = 4.49\text{E}-7 \text{ m}$
- la variation de hauteur  $dL(z=L) = -2.99\text{E}-6$

La solution obtenue avec le maillage ci-contre est:

- $s(z=0) = 2.89\text{E}5 \text{ Pa}$  (-8%)
- $dR(z=0) = 4.247\text{E}-7 \text{ m}$  (-5%)
- $dL(z=L) = -2.99\text{E}-6$  (0%)

NB. L'accroissement d'éléments dans le sens vertical Z permet de mieux répartir la distribution des efforts du poids propre.

SSLS10 Tore sous pression interne uniforme



Pour mailler un tore à partir d'arcs de cercles, il faut utiliser des surfaces de type "surfaces réglées tore-cylindre"; si la surface de maillage est simplement une "surface réglée", cette surface n'est pas exactement un tore.

Le tore ci-contre a un demi-diamètre moyen  $a=2\text{m}$ , un rayon de tube  $b=1\text{m}$ , une épaisseur  $h=0.02\text{m}$ . La pression interne est  $p=10000\text{Pa}$ .

Contraintes principales:

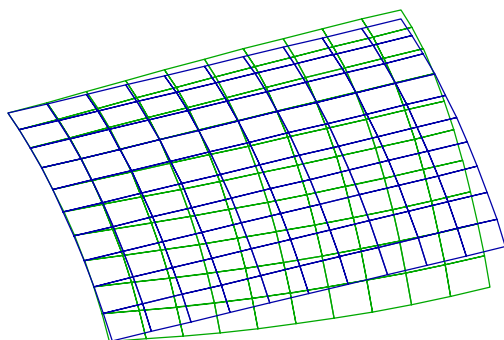
	solution analytique	4 secteurs	8 secteurs pour un quart de tore
s22	= 0.25 MPa	0.22 (-13%)	0.24 (-4%)
s11 (r=a-b)	= 0.75 MPa	0.71 (-5%)	0.743 (-0.9%)
s11 (r=a+b)	= 0.417 MPa	0.402 (-3.5%)	0.414 (-0.7%)

## SSLS19 Coque cylindrique soumise à son poids propre

Une voûte cylindrique de rayon  $R=3\text{m}$ , de longueur  $L=6\text{m}$  formant un arc d'angle  $2\alpha$  ( $\alpha=40^\circ$ ) est soumise à une charge volumique  $208\,300\text{ N/m}^3$ .



[SSLS19] SSLS19 COQUE CYLINDRIQUE SOUMISE A SON POIDS PROPRE  
Calcul 1 N0: poids propre  
1/ 23.4; (deform.x 15)



Un quart de la voûte est modélisé, les résultats ci-dessous indiquent le déplacement maximal vertical  $dZ$  au noeud B (coordonnées  $x=R \sin\alpha$ ,  $y=L/2$ ,  $z=R \cos(\alpha)$ ) et la flèche  $W_B$  au point de Gauss le plus proche de B. La solution de référence donnée par le guide AFNOR est  $dZ = 3.7\text{ cm}$  ( $\pm 2\%$ ). Cette structure nécessite une modélisation assez fine car la voûte présente une déformée assez relativement complexe avec une double inversion des sens de flexion.

éléments	$dZ_B$ (cm)	$W_B$ (cm)	contrainte max. (MPa)
1x1	13.445	8.918	36.24
2x2	4.284	3.769	20.26
3x3	3.455	3.350	19.14
4x4	3.417	3.451	19.01
5x5	3.451	3.564	20.03
6x6	3.488	3.652	20.81
8x8	3.543	3.767	21.86
<b>10x10</b>	3.579	3.840	22.54
19x19	3.689	4.020	24.09
20x20	3.701	4.036	24.21

## SSLS20 Coque cylindrique pincée

Une coque cylindrique de longueur totale  $L=10.35$ , de rayon  $R=4.953\text{m}$ , d'épaisseur  $h=0.094\text{m}$  est pincée en son milieu par une force ponctuelle  $F=100\text{N}$ .