SSNV229 - Validation des formules ETCC dans DEFI_CABLE_BP et de la rupture d'un câble

Résumé :

Le but de ce cas-test est d'apporter des éléments de validation de l'opérateur DEFI_CABLE_BP pour le calcul des profils de tension dans les câbles de précontrainte dans les structures en béton. Il s'agit :

- de valider les formules ETCC implantées dans Code_Aster qui permettent de prendre en compte les pertes de tension par frottement entre les câbles et le béton, par recul aux ancrages, et par relaxation de l'acier, matériau constituant les câbles (modélisations A et B) ;
- de valider la procédure développée pour modéliser la rupture d'un câble avec réancrage (mot clé facteur MODI_CABLE_ETCC de la commande DEFI_CABLE_BP) (modélisation C).

La structure considérée est un cylindre, contenant dans son épaisseur dix câbles de précontrainte. Les câbles décrivent chacun un cercle dans un plan horizontal, et parcourent la structure sur sa longueur. Tous les câbles sont ancrés sur la même ligne.

La modélisation A permet de tester la prise en compte directe de la relaxation des aciers (méthode approchée). La modélisation B permet de modéliser plus finement la relaxation des aciers en réalisant un calcul à court terme et un calcul à long terme qui pourra être combiné à la modélisation du retrait et du fluage dans le béton. Dans les deux cas, les résultats obtenus sont validés par comparaison avec ceux théoriquement attendus.

La modélisation C modélise la rupture d'un des 10 câbles de précontrainte après la mise en tension. On vérifie que le résultat obtenu est conforme à ce qui a été injecté dans le calcul.

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

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

Il s'agit d'un cylindre en béton de hauteur est $H=10\,m$ et de rayon moyen $R=20.5\,m$.
L'épaisseur du voile vaut $e=1\,m$.

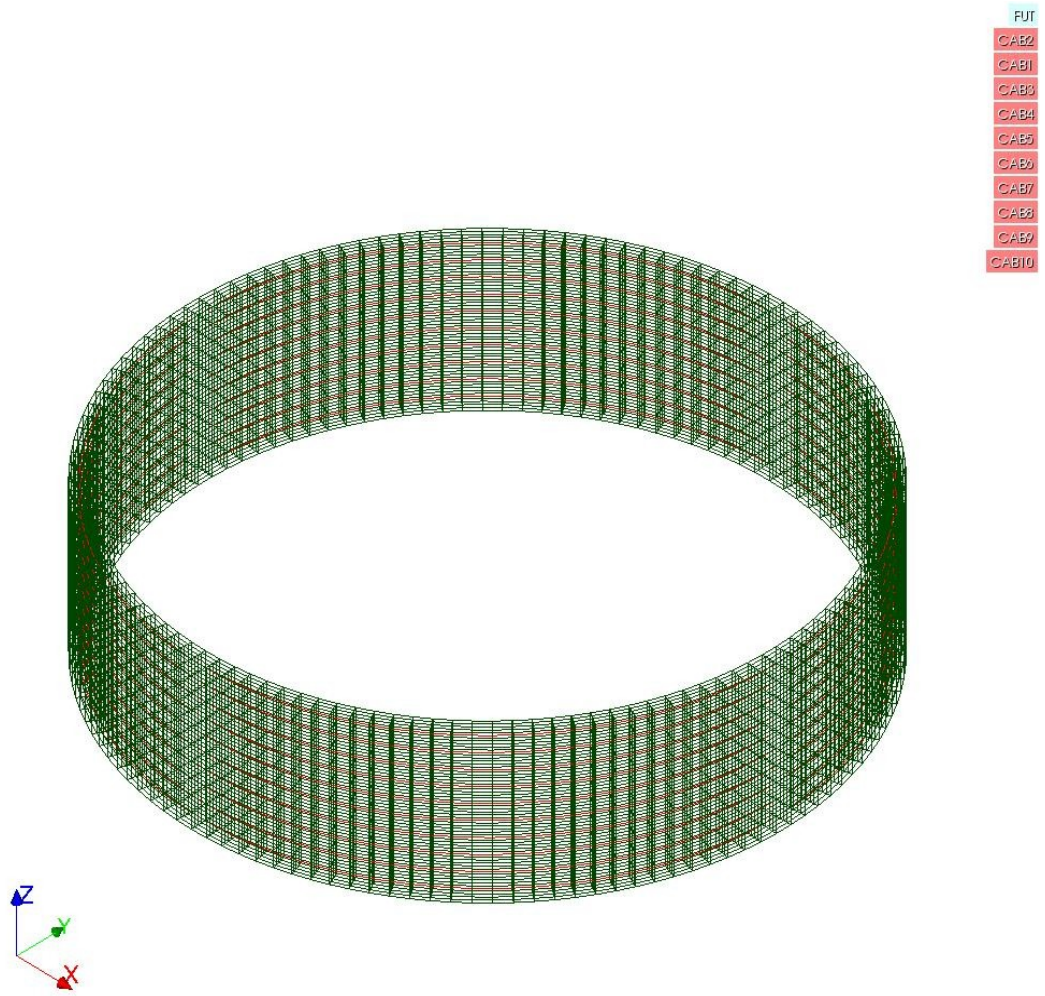


Figure 1.1-1: modèle étudié

Les câbles décrivent chacun un cercle dans un plan horizontal, et parcourent ainsi la structure sur sa longueur. Tous les câbles sont ancrés sur la même ligne. Les 10 câbles sont espacés de $1\,m$ entre $z=-4.5\,m$ et $z=4.5\,m$.

L'aire de la section droite de chacun des câbles vaut $S_a=7.923\,10^{-3}\,m^2$.

1.2 Propriétés des matériaux

1.2.1 Matériau béton constituant le voile

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

Propriétés élastiques :

Module d'Young $E_b = 3.10^{10}\,Pa$

Coefficient de Poisson $\nu_b = 0,2$

1.2.2 Matériau acier constituant les câbles

Propriétés élastiques :

Module d'Young $E_a = 1,915.10^{11}\,Pa$

Coefficient de Poisson $\nu_a = 0,3$

Paramètres caractéristiques pour estimation des pertes de tension :

Contrainte limite élastique de l'acier $f_{prg} = 1,814.10^{9}\,Pa$

Coefficient de frottement $\mu = 0,17$

Coefficient de perte en ligne $k = \frac{0,0015}{0,17}\,m^{-1}$

Relaxation de l'acier à 1000 heures $\rho_{1000} = 2,5\,\%$

1.3 Chargement

On applique aux deux extrémités de chaque câble un effort normal de traction. La valeur de la contrainte appliquée dans l'acier est $\sigma_0 = 0,8\,F_{prg} = 1487,48\,MPa$ soit une tension $F_0 = 11,785.10^{6}\,N$.

Pour évaluer les pertes de tension au voisinage des ancrages, on tient compte d'un recul aux ancrages $\Delta = 8.10^{-3}\,m$.

Pour les modélisations A et B, les caractéristiques sont évaluées après 65 ans, soit $t = 569790\,h$ qui correspond au paramètre NBH_RELAX.

Pour la modélisation C, on ne modélise que les pertes par frottement et par recul d'ancrage. Puis, on suppose qu'une rupture du câble 5 a lieu à l'abscisse curviligne $s = 64,39\,m$ et que la tension se réancre linéairement sur une distance de 20 m (de part et d'autre du point de rupture). Les profils avant et après rupture sont visibles sur la figure suivante.

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

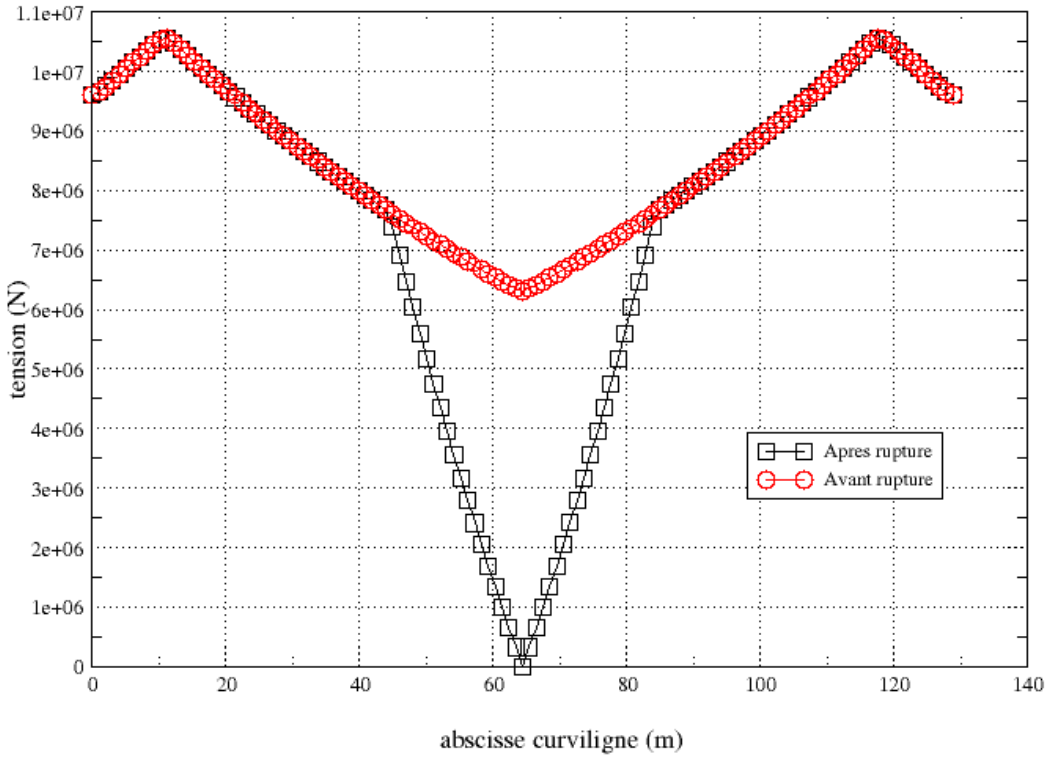


Figure 1.3-1: Profil de tennsion dans le cable 5, avant et après rupture

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

2 Solution de référence

2.1 Effort normal dans les câbles selon l'ETCC

La solution de référence pour les modélisations A et B a été obtenue par une feuille de calcul sous Excel réalisée par la société GDS.

Les deux modélisations correspondent à deux modes de calcul de la perte de précontrainte due à la relaxation des aciers.

- Dans la modélisation A, les pertes par relaxation sont considérées en négligeant les pertes élastiques (calcul direct avec DEFI_CABLE_BP) soit :

$$F_i(s) = F_0 \exp^{-\mu(\theta + k s)} - \text{recul d'ancrage}$$

et finalement :

$$F(s) = F_i(s) - 0{,}66\,\rho_{1000}\,.\exp^{9{,}1\,F_i(s)/F_{prg}}.\left(\frac{t}{1000}\right)^{0{,}75(1-F_i(s))/F_{prg}}.10^{-5}\,F_i(s)$$

- Dans la modélisation B, les pertes par relaxation des aciers sont calculées à partir de la tension prenant en compte les pertes élastiques obtenues par un précédent calcul, où les câbles ont été mis en tension en 2 groupes, soit :

pour le groupe 1 (câbles impairs) :

$$F_i^1(s) = F_0 \exp^{-\mu(\theta + k s)} - \text{recul d'ancrage} - \frac{A_p E_p \Delta\sigma_c(x)}{E}$$

pour le groupe 2 (câbles pairs) :

$$F_i^2(s) = F_0 \exp^{-\mu(\theta + k s)} - \text{recul d'ancrage}$$

et $F(s) = F_i^{1,2}(s) - 0{,}66\,\rho_{1000}\,.\exp^{9{,}1\,F_i^{1,2}(s)/F_{prg}}.\left(\frac{t}{1000}\right)^{0{,}75(1-F_i^{1,2}(s))/F_{prg}}.10^{-5}\,F_i^{1,2}(s)$

La valeur de référence a en réalité était obtenue en considérant qu'on avait les mêmes pertes élastiques sur tous les câbles valant $\Delta F_{el}(s) = \frac{A_p E_p \Delta\sigma_c(x)}{2E}$.

2.2 Modélisation de la rupture

Pour la modélisation C, le profil de tension a été postulé de manière totalement arbitraire. On vérifie simplement que le résultat à l'issu de la mise en précontrainte est bien égal au profil que l'on souhaitait introduire.

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

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques des modélisations

Le mur en béton est représenté par des éléments 3D supportés dans les deux cas par des mailles hexaédriques à 8 nœuds : on compte 10 mailles sur une génératrice verticale, 4 mailles dans l'épaisseur et 126 sur la circonférence.

Pour valider séparément la prise en compte des pertes par frottement et par recul d'ancrage, on ne considère les pertes par relaxation que sur les câbles pairs.

3.2 Grandeurs testées et résultats

La composante testée est la tension dans les câbles N.

Valeur abscisse curviligne (en mètres)	Câble concerné	Type de référence	Valeur de référence [N]	Tolérance (%)
0.	'CAB1'	'ANALYTIQUE'	$9{,}537.10^6$	0,50%
9,2	'CAB1'	'ANALYTIQUE'	$10{,}436.10^6$	0,50%
64,4	'CAB1'	'ANALYTIQUE'	$6{,}273.10^6$	0,50%
0.	'CAB2'	'ANALYTIQUE'	$9{,}286.10^6$	0,50%
9,2	'CAB2'	'ANALYTIQUE'	$10{,}079.10^6$	0,50%
64,4	'CAB2'	'ANALYTIQUE'	$6{,}210.10^6$	0,50%

3.3 Remarques

Les écarts sont très faibles, sachant que la discrétisation du câble n'est pas tout à fait identique. L'écart le plus important se situe au niveau de l'ancrage et de l'estimation des pertes par recul d'ancrage.

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

4 Modélisation B

4.1 Caractéristiques de la modélisation et maillage

Le maillage est identique à la modélisation A. En revanche, le calcul de la tension est réalisé en 2 étapes.

- Dans la première le calcul de la tension est réalisé en prenant uniquement en compte les pertes par frottement et par recul d'ancrage. La mise en tension est ensuite effectuée à l'aide de CALC_PRECONT , en deux étapes permettant de récupérer les pertes élastiques : la mise en tension des câbles impairs dans un premier temps puis la mise en tension des câbles pairs.
- Dans la deuxième phase, le calcul de la tension des câbles est réalisé en pren ant en compte la relaxation des aciers.

4.2 Grandeurs testées et résultats

La composante testée est la tension dans les câbles N à l'issue du deuxième DEFI_CABLE_BP.

Valeur abscisse curviligne (en mètres)	Câble concerné	Type de référence	Valeur de référence [N]	Tolérance (%)
0.	'CAB9'	'ANALYTIQUE'	$9{,}289.10^6$	0,50%
9,2	'CAB9'	'ANALYTIQUE'	$10{,}085.10^6$	0,50%
64,4	'CAB9'	'ANALYTIQUE'	$6{,}210.10^6$	0,50%
0.	'CAB10'	'ANALYTIQUE'	$9{,}289.10^6$	0,50%
9,2	'CAB10'	'ANALYTIQUE'	$10{,}085.10^6$	0,50%
64,4	'CAB10'	'ANALYTIQUE'	$6{,}210.10^6$	0,50%

On teste également la cohérence de la tension N avant et après CALC_PRECONT.

TYPE_TEST	Câble concerné	Type de référence	Valeur de référence	Tolérance (%
SOMME	'CAB9'	'AUTRE_ASTER'	1066341600,5904781	0,05%
SOMME	'CAB10'	'AUTRE_ASTER'	1063650103,5108216	0,05%

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

5 Modélisation C

5.1 Caractéristiques de la modélisation et maillage

Le maillage est identique à la modélisation A. L'étude se décompose en 2 étapes.

- Dans la première le calcul de la tension est réalisé en prenant uniquement en compte les pertes par frottement et par recul d'ancrage. Tous les câbles sont tendus simultanément.
- Dans la deuxième phase, on suppose que le câble 5 est cassé. Le nouveau profil de tension est appliqué.

5.2 Grandeurs testées et résultats

On teste le profil de tension (composante N) dans le câble 5, plus exactement la valeur minimale et la somme des N sur tout le câble. Plus exactement, on compare les valeurs obtenues à l'issue de DEFI_CABLE_BP et à l'issue de CALC_PRECONT et on les compare aux valeurs de la tension fournie en entrée.

Composante	Table	Type de référence	Valeur de référence [N]	Tolérance (%)
'MIN'	'tensc5nw'	'AUTRE_ASTER'	561,23848763760	10^{-4}%
'SOMM'	'tensc5nw'	'AUTRE_ASTER'	957773249,63245	10^{-4}%
'MIN'	'tensc5f'	'AUTRE_ASTER'	561,23848763760	$3*10^{-4}$%
'SOMM'	'tensc5f'	'AUTRE_ASTER'	957773249,63245	0,01%

6 Synthèse des résultats

Les résultats obtenus sont validés par comparaison avec ceux théoriquement attendus avec une bonne précision.

Les fonctionnalités particulières testées sont les suivantes :

- opérateur DEFI_MATERIAU [U4.23.01] : définition des paramètres caractéristiques des matériaux acier et béton permettant le calcul de la tension le long des câbles de précontrainte, conformément aux règles de l'ETCC ;
- opérateur DEFI_CABLE_BP [U4.23.06] : calcul de la tension le long des câbles et notamment les mots-clé facteur MODI_CABLE_ETCC et MODI_CABLE_RUPT .

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