

Manuel de Validation**Fascicule V6.04 : Statique non linéaire des structures volumiques****Document : V6.04.164**

SSNV164 - Mise en tension de câbles de précontrainte dans une poutre 3D

Résumé

On considère une poutre en béton armé de section carré, composée de deux tronçons de 10 mètres de longueur, ayant respectivement un et quatre mètres carré de section. La poutre est verticale, la plus faible section en bas. Elle est encastrée à sa base, et contient 5 câbles de précontrainte rectilignes.

On teste ici le phasage de la mise en précontrainte, c'est-à-dire la mise en tension successive des différents câbles.

Les fonctionnalités particulières à tester sont les suivantes :

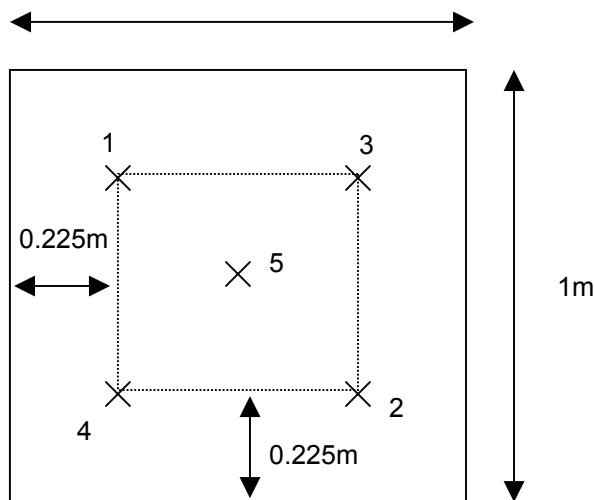
- l'opérateur `DEFI_CABLE_BP` : détermination des relations cinématiques entre les DDL des nœuds d'un câble et les DDL des nœuds «voisins» d'une structure en béton modélisée par des éléments 3D et calcul des tensions dans un câble sous l'effet de frottement et du recul d'ancrage,
- l'opérateur `AFFE_CHAR_MECA` associé au mot-clé `RELA_CINE_BP`,
- l'opérateur `CALC_PRECONT` : mise en tension des câbles de précontrainte.

Les résultats obtenus sont validés par comparaison au code de calcul CASTEM 2000.

1 Problème de référence

1.1 Géométrie

On considère une poutre en béton armé de section carré, composée de deux tronçons de 10 mètres de longueur, ayant respectivement un et quatre mètres carré de section. La poutre est verticale, la plus faible section en bas. Elle est encastree à sa base, et contient 5 câbles de précontrainte rectilignes.



Les cinq câbles qui traversent toute la longueur de la poutre sont situés comme sur le plan ci-dessous :

Figure 1.1-a : Positionnement des câbles dans la poutre

La section de chaque câble est de 25 cm^2 .

1.2 Propriétés des matériaux

Matériau béton constituant la poutre :

- module d'Young : $E_b = 4. 10^5 \text{ MPa}$
- coefficient de Poisson : $\nu = 0,2$
- masse volumique : $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$

Matériau acier constituant le câble :

- module d'Young : $E_b = 1,93 10^5 \text{ MPa}$
- coefficient de Poisson : $\nu = 0,3$
- masse volumique : $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

Caractéristique concernant la mise en tension des câbles :

- recul d'ancrage = 1 mm
- coefficient de frottement linéaire : $0,0015 \text{ m}^{-1}$
- force de tension à l'extrémité d'un câble : $3,75 10^6 \text{ N}$
- âge de décoffrage 150 jours
- âge de mise en tension du premier câble 300 jours

1.3 Conditions aux limites et chargements

La base de la poutre est bloquée dans la direction Z. Les deux mouvements de translation par rapport à OX et OY sont bloqués ainsi que le mouvement de rotation autour de OZ.

La séquence de chargement est la suivante :

- à 300 jours, mise en tension de 2 câbles (1 et 2) par leur extrémité inférieure,
- à 450 jours, mise en tension de 2 câbles supplémentaires (3 et 4) toujours par leur extrémité inférieure,
- à 600 jours, mise en tension du dernier câble (5) par ses deux extrémités.

La poutre est bien évidemment soumise à la pesanteur.

2 Solution de référence

La solution de référence a été obtenue par le CEA avec CASTEM 2000, avec un maillage contenant 2080 éléments cubiques à 20 nœuds et 100 éléments de câble.

3 Modélisation A

3.1 Caractéristiques de la modélisation

La poutre en béton est représentée par 2080 éléments `MECA_HEXA8`, supportés par autant de mailles hexaèdres à 8 nœuds. Les 5 câbles sont représentés à l'aide de 20 éléments `MECA_BARRE` chacun supportés par autant de segments à 2 nœuds. La figure ci-dessous montre le maillage de la poutre.

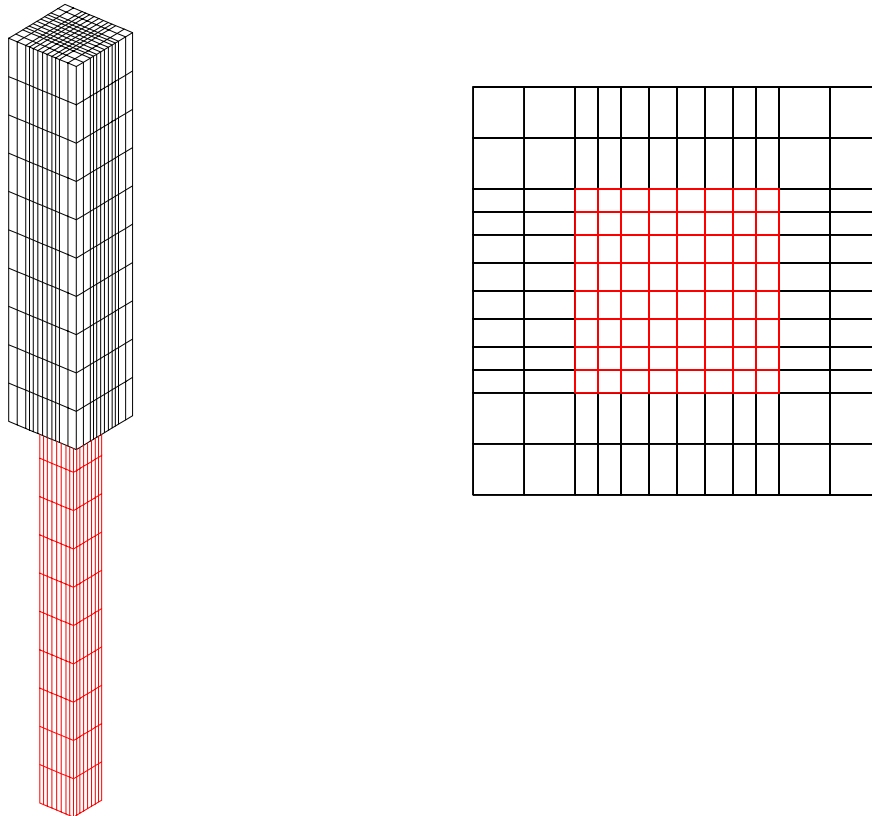


Figure 3.1-a : Description du maillage

Le matériau béton est défini par les comportements `ELAS` et `BPEL_BETON` : les paramètres caractéristiques de cette relation sont fixés à 0 car on ne souhaite pas inclure les pertes de tension dues au retrait et au fluage du béton.

Le matériau acier pour les câbles est défini par les comportements `ELAS` et `BPEL_ACIER`. Les valeurs non nulles pour `BPEL_ACIER` concernent le frottement ($\text{FROT_LINE} = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$) et la limite d'élasticité puisqu'une valeur nulle est illicite ($\text{SY} = 1,94 \cdot 10^{11} \text{ Pa}$). Le rayon des câbles est de $2,8209 \cdot 10^{-2} \text{ m}$.

Les DDL bloqués sont les suivants :

DZ pour la face inférieure

DX et DY pour les points situés sur l'axe de symétrie de la poutre

DX pour le point (0.5 0. 0.) et DY pour le point (-0.5 0. 0.)

La tension $F_0 = 3,75 \cdot 10^6 \text{ N}$ est appliquée sur les nœuds inférieurs des câbles 1, 2, 3 et 4 et aux deux extrémités pour le câble 5.

Le chargement est réalisé en 4 pas de temps :

- $t = 150$ s, prise en compte de la pesanteur : STAT_NON_LINE avec les conditions aux limites, la pesanteur et les relations cinématiques pour tous les câbles. Les câbles ne contribuant pas à la rigidité du modèle, on leur affecte une loi de comportement 'SANS' (contrainte nulle),
- $t = 300$ s, mise en tension des câbles 1 et 2 : CALC_PRECONT avec les conditions aux limites, les câbles 1 et 2 étant les câbles à mettre en tension, les câbles 3, 4 et 5 étant inactifs,
- $t = 450$ s, mise en tension des câbles 3 et 4 : CALC_PRECONT avec les conditions aux limites, les relations cinématiques pour les câbles 1 et 2, les câbles 3 et 4 étant les câbles à mettre en tension, le câble 5 étant inactif,
- $t = 600$ s, mise en tension du câble 5 : CALC_PRECONT avec les conditions aux limites, les relations cinématiques pour les câbles 1, 2, 3 et 4, le câble 5 étant le câble à mettre en tension.

3.2 Etapes de calcul et fonctionnalités testées

Les principales étapes de calcul correspondent aux fonctionnalités que l'on souhaite valider :

- opérateur DEFI_MATERIAU : définition des relations de comportement BPEL_BETON avec les valeurs par défaut et BPEL_ACIER, dans le cas de perte par frottement linéaire,
- opérateur DEFI_CABLE_BP : détermination d'un profil de tension le long du câble de précontrainte, en prenant en compte les pertes par frottement linéaire et les pertes par recul d'ancrage ; calcul des coefficients des relations cinématiques entre les DDL des nœuds du câble et les DDL des nœuds «voisins» de la poutre en béton, dans le cas d'une poutre modélisée par des éléments 3D,
- opérateur AFFE_CHAR_MECA : définition d'un chargement de type RELA_CINE_BP (RELA_CINE = 'OUI'),
- opérateur STAT_NON_LINE, option COMP_INCR : calcul de l'état d'équilibre en tenant compte du chargement de type RELA_CINE_BP, dans le cas d'une poutre modélisée par des éléments 3D,
- loi de comportement SANS,
- macro-commande CALC_PRECONT avec un état initial non vierge, qu'il y ait ou non des câbles inactifs, qu'il y ait un ou plusieurs câbles à mettre en tension.

4 Résultats de la modélisation A

On compare la valeur extraite du champ `SIEF_ELNO_ELGA` à la de référence obtenue avec CASTEM et ceci pour les différents instants caractéristiques (tension non nulle) et pour des nœuds équirépartis le long des câbles.

La composante sur laquelle porte le test est la tension dans les câbles N.

La tolérance d'écart relatif par rapport à la référence vaut 0.1 % pour la phase de mise en tension puis 1% pour les étapes suivantes.

4.1 Tension dans le câble 1

T = 300 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N1	M5655	$3,648.10^6$ N	$3,6494.10^6$ N	0,038 %
N6	M5660	$3,675.10^6$ N	$3,6769.10^6$ N	0,051 %
N11	M5664	$3,693.10^6$ N	$3,6952.10^6$ N	0,059 %
N16	M5670	$3,667.10^6$ N	$3,6638.10^6$ N	-0,087 %
N101	M5674	$3,640.10^6$ N	$3,6419.10^6$ N	0,052 %

T = 450 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N1	M5655	$3,561.10^6$ N	$3,5634.10^6$ N	0,068 %
N6	M5660	$3,588.10^6$ N	$3,5903.10^6$ N	0,063 %
N11	M5664	$3,628.10^6$ N	$3,6132.10^6$ N	-0,408 %
N16	M5670	$3,645.10^6$ N	$3,6418.10^6$ N	-0,088 %
N101	M5674	$3,629.10^6$ N	$3,6224.10^6$ N	-0,183 %

T = 600 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N1	M5655	$3,519.10^6$ N	$3,5214.10^6$ N	0,069 %
N6	M5660	$3,546.10^6$ N	$3,5479.10^6$ N	0,055 %
N11	M5664	$3,597.10^6$ N	$3,5730.10^6$ N	-0,666 %
N16	M5670	$3,635.10^6$ N	$3,6308.10^6$ N	-0,115 %
N101	M5674	$3,614.10^6$ N	$3,6046.10^6$ N	-0,260 %

4.2 Tension dans le câble 3

T = 450 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N41	M5695	$3,647.10^6$ N	$3,6494.10^6$ N	0,066 %
N46	M5700	$3,675.10^6$ N	$3,6769.10^6$ N	0,051 %
N51	M5705	$3,695.10^6$ N	$3,6914.10^6$ N	-0,097 %
N56	M5710	$3,667.10^6$ N	$3,6638.10^6$ N	-0,087 %
N103	M5714	$3,640.10^6$ N	$3,6419.10^6$ N	0,052 %

T = 600 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N41	M5695	$3,605.10^6$ N	$3,6075.10^6$ N	0,070 %
N46	M5700	$3,632.10^6$ N	$3,6346.10^6$ N	0,070 %
N51	M5705	$3,662.10^6$ N	$3,6720.10^6$ N	0,272 %
N56	M5710	$3,655.10^6$ N	$3,6529.10^6$ N	-0,058 %
N103	M5714	$3,625.10^6$ N	$3,6241.10^6$ N	-0,024 %

4.3 Tension dans le câble 5

T = 600 s

Nœud	Maille	Valeur de référence	Valeur calculée	Ecart relatif
N81	M5735	$3,647.10^6$ N	$3,6494.10^6$ N	0,066 %
N86	M5740	$3,674.10^6$ N	$3,6768.10^6$ N	0,078 %
N91	M5745	$3,695.10^6$ N	$3,6952.10^6$ N	0,005 %
N96	M5750	$3,674.10^6$ N	$3,6714.10^6$ N	-0,072 %
N105	M5754	$3,647.10^6$ N	$3,6494.10^6$ N	0,066 %

5 Synthèse des résultats

On constate que la macro-commande permet d'obtenir la tension donnée par le BPEL (garantie par la procédure mise en œuvre par CASTEM) avec une très bonne précision puisque l'écart est inférieur à 0.1%. Par ailleurs, l'effet de la mise en tension des câbles sur le reste de la structure et notamment sur les câbles déjà tendus, est tout à fait satisfaisant puisque l'écart entre la solution de référence et le calcul Aster est inférieur à 1%, alors que le maillage de référence était quadratique et le calcul réalisé ici utilisait des mailles linéaires.