

PLEXU10 - Validation des câbles glissants et frottants dans CALC_EUROPLEXUS

Résumé :

Des mécanismes permettant de modéliser des câbles glissants et frottants ont été ajoutés dans EUROPLEXUS.

Cette série de tests valide l'appel de CALC_EUROPLEXUS à ces fonctionnalités avec précontrainte calculée dans Code_Aster ou non, mais participe aussi directement à leurs validations dans EUROPLEXUS.

Câbles glissants :

La modélisation des câbles glissants se fait uniquement par une liaison (*LCAB GLIS*). Cette liaison, inspirée du chargement *RELA_CINE_BP* de Code_Aster, calcule les relations cinématiques entre béton et câble en laissant libre le mouvement de chaque nœud de câble dans la direction tangente à la trajectoire du câble. Afin de prendre en compte les grandes déformations et les grands glissements, cette liaison est réactualisée à chaque pas de temps.

Câbles frottants :

La modélisation des câbles frottants est faite en utilisant la même liaison que pour les câbles glissants. Des éléments discrets spécifiques sont utilisés pour modéliser le frottement. Des liaisons doivent également être faites sur les nœuds des éléments discrets non communs avec des éléments de câbles. Cette liaison est activée par la syntaxe *LCAB FROT*.

Modélisation A : Validation de l'appel à la liaison EPX *LCAB GLIS* (reproduction du test *bm_str_lcab_glis*).

Modélisation B : Validation de la bonne prise en compte d'un état initial de précontrainte avec la liaison *LCAB GLIS*.

Modélisation C : Mise en tension d'un câble glissant dans EPX (référence Code_Aster).

Modélisation D : Validation de l'appel à la liaison EPX *LCAB FROT*, (reproduction du test *bm_str_lcab_frot_amor*). Ce test participe à la validation de *LCAB FROT* dans EPX, il fournit une valeur de référence pour une mise en tension d'un câble frottant avec recul d'ancrage.

Modélisation E : Reproduction du test *bm_str_lcab_frot*

Modélisation F : Validation du chaînage Code_Aster/EPX avec des câbles frottants.

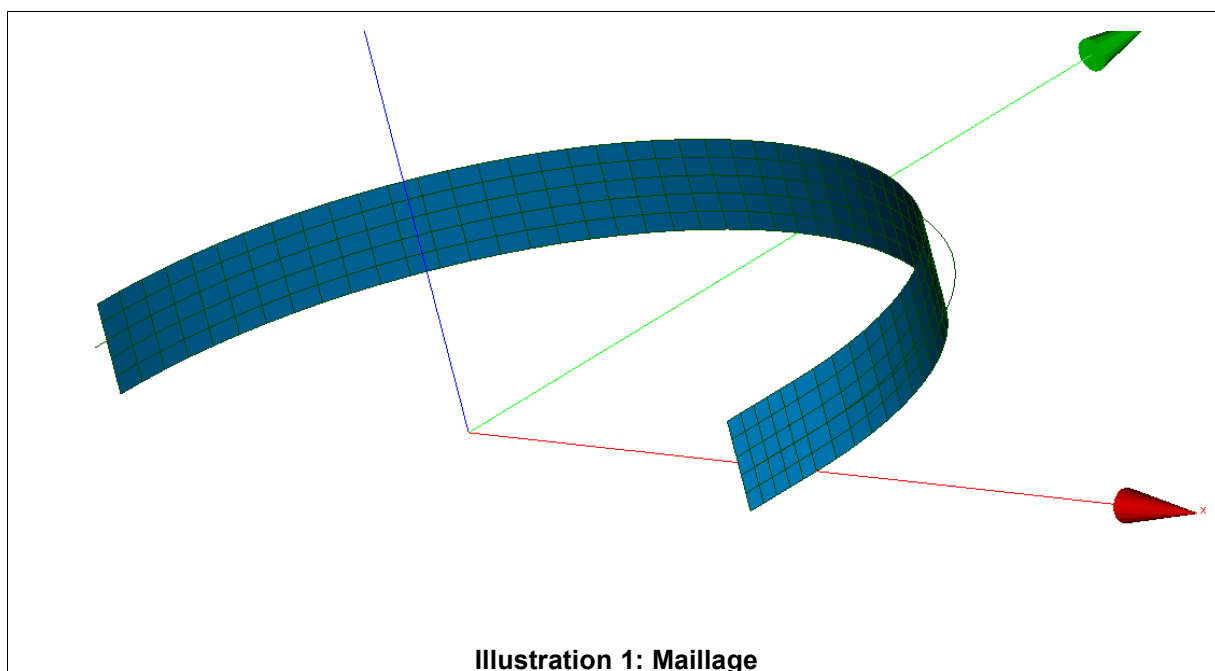
1 Description

1.1 Géométrie, maillage et modèle

Le modèle d'étude est une portion de demi-cylindre de hauteur $H=2\text{ m}$ de rayon $R=10\text{ m}$ et d'épaisseur $ep=1\text{ m}$. Ce demi-cylindre est prolongé à son extrémité située en $x>0$ par une partie rectiligne de même hauteur et de 3 m de long. Un câble traverse le béton en suivant sa géométrie à une distance $ex=0,4\text{ m}$ du feuillet moyen du côté extérieur.

Le béton est modélisé en coque (élément Q4GG). Il est constitué de 275 mailles QUAD4, 5 mailles dans sa hauteur et 55 sur la longueur (dont 50 sur la partie cylindrique et 5 sur la partie rectiligne).

Le câble est modélisé en éléments BARRE, il est constitué de 55 mailles SEG2.



Pour les modélisations D, E et F, des éléments DIS_T reposant sur des mailles SEG2 aux nœuds confondus (le premier nœud étant un nœud de câble) sont ajoutés au maillage (à l'aide de la fonctionnalité CREA_SEG2 de CREA_MALLAGE) et au modèle.

1.2 Propriétés des matériaux

Les propriétés du béton pour le cylindre et de l'acier pour le câble sont données dans le tableau suivant :

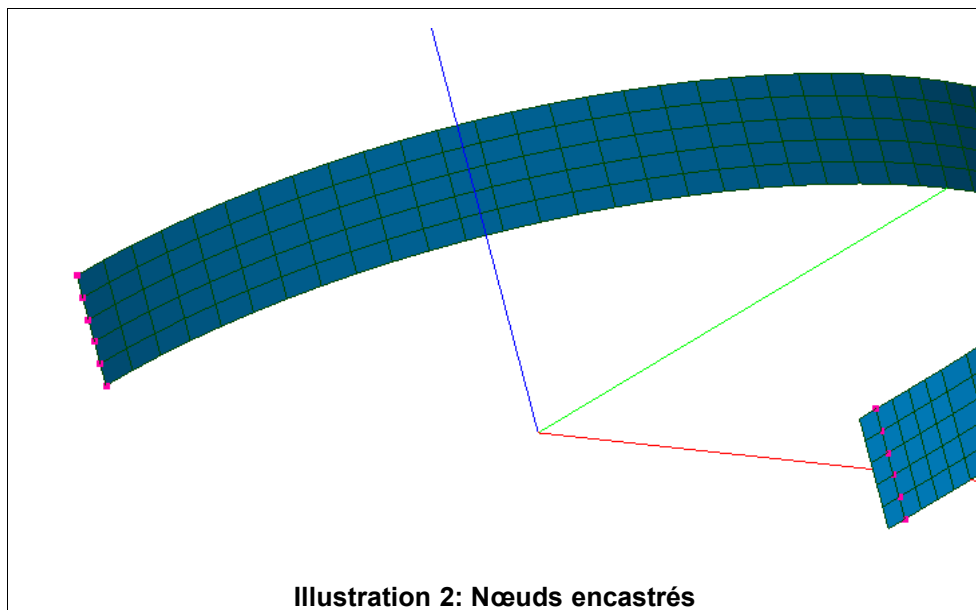
Matériau	Béton	Acier	
Module d'Young	$3 \times 10^{10} \text{ Pa}$	$2 \times 10^{11} \text{ Pa}$	
Coefficient de Poisson	0.0	0.0	
Masse volumique	2500 kg/m^3	Modélisation A, B et C 500 kg/m^3	Modélisation D, E et F 7800 kg/m^3

2 Modélisation A

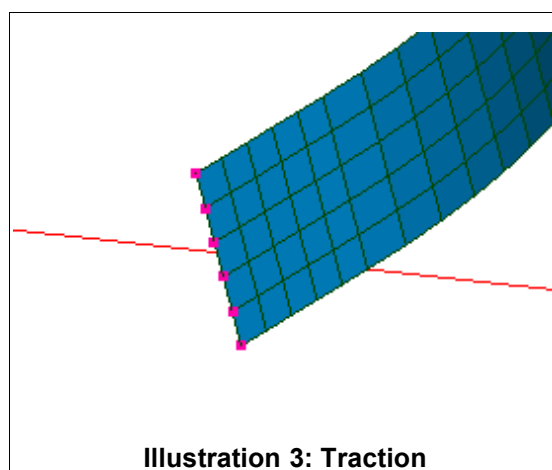
Dans cette modélisation, on cherche à valider la bonne utilisation de la liaison *LCAB GLIS* d'EPX dans *CALC_EUROPLEXUS*. Cette liaison est activée à partir du chargement *RELA_CINE_BP* d'*AFFE_CHAR_MECA* en donnant au mot-clé *TYPE_EPX* la valeur « *GLIS* ».

2.1 Conditions aux limites et chargements

Les nœuds en rouge sur l'illustration 2 sont encastrés.



Le déplacement $DY = -3\text{m}$ ainsi que le blocages des ddl de rotations sont imposés sur les nœuds en rouge sur l'illustration 3.



Ce chargement est imposé avec la fonction multiplicatrice suivante :

Temps	Coefficient
0.	0.0
0.002	1.0
1.0	1.0

2.2 Détails

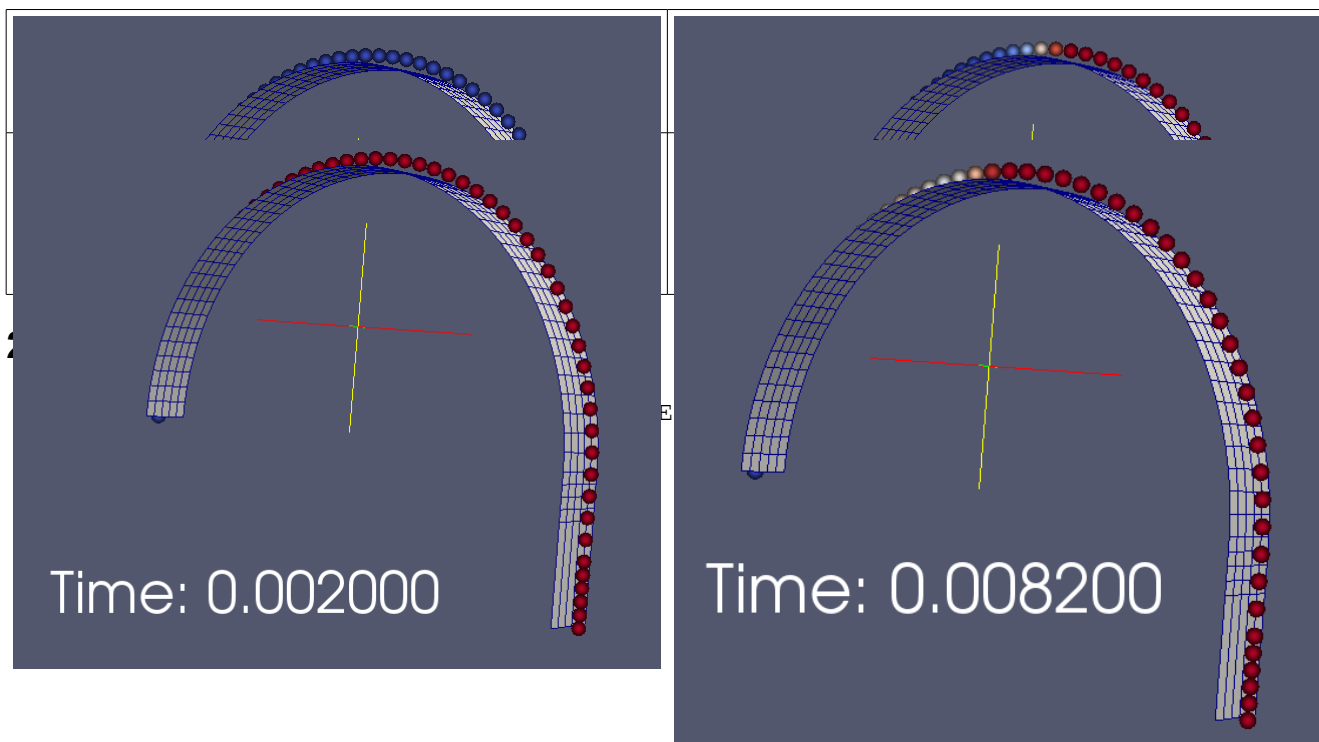
Sans la présence des liaisons entre le câble et le béton le chargement n'aurait d'effet que sur les 5 mailles à l'extrémité où la traction est appliquée. La liaison *LCAB GLIS* impose une relation cinématique totale aux deux nœuds aux extrémités du câble (ou nœuds d'ancrage) et une relation cinématique partielle aux autres nœuds (pas de liaison dans la direction du câble).

Le chargement imposé va donc entraîner le nœud d'ancrage avec les nœuds de béton, ce qui va tirer sur tout le câble.

Les nœuds de câble se déplacent alors le long de la trajectoire. Pour ce test et son équivalent dans EPX la validation est visuelle. On a utilisé le module ParaVIS de SalomeMeca pour visualiser les déplacements des nœuds de câbles au fil du temps.

Une fois cette visualisation effectuée, des tests de non régression ont été ajoutés au test EPX. Afin de valider l'appel de `CALC_EUROPLEXUS` à la liaison EPX *LCAB GLIS*, on teste les mêmes valeurs qu'EPX.

Une vidéo serait plus parlante, on montre cependant la déformée de ce calcul à plusieurs instants.



Nœud	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
NY10	DX	0.002	1.58933	2.E-6
NY10	DY	0.002	-0.125243	2.E-6
NY10	DX	0.006	2.17663	2.E-6
NY10	DY	0.006	-0.277227	2.E-6
NY10	DX	0.01	2.52102	2.E-6
NY10	DY	0.01	-0.394618	2.E-6

3 Modélisation B

Cette modélisation valide l'utilisation d'un état initial de précontrainte avec la liaison EPX LCAB GLIS.

3.1 Conditions aux limites et chargements

Les 6 nœuds à chaque extrémité du béton sont encastres.

De plus on affecte au modèle un chargement de type précontrainte calculé à partir de `DEFI_CABLE_BP` et `CALC_PRECONT`. La tension imposée sur le câble est définie par le mot-clé `TENSION_INIT` de `DEFI_CABLE_BP`, sa valeur est mise à $2.E5\text{ N}$. Ce chargement est envoyé à EPX sous la forme d'un état initial.

3.2 Détails

On applique dans EPX la précontrainte sans chargement supplémentaire. Lors du calcul de cet état précontraint par `CALC_PRECONT`, les relations cinématiques entre le câble et le béton étaient totales (c-à-d dans les trois directions de l'espace). Pour ce test, en arrivant dans EPX, on aura des liaisons glissantes.

Malgré cela on teste quand même que le système est à l'équilibre en arrivant de EPX. En effet, le profil de contrainte calculé dans `DEFI_CABLE_BP` est fait avec des coefficients de frottements nuls. La contrainte est donc égale sur toutes les mailles. Une fois dans EPX, bien que les liaisons soient relâchées en chaque nœud dans la direction tangente au câble, les nœuds ne bougent pas à cause de ce profil de contrainte uniforme.

Pour tester cet équilibre, on effectue de nombreux pas de temps et on vérifie sur quelques valeurs que rien n'a évolué.

Rq : on a vérifié qu'en calculant un profil de tension avec du frottement le câble bougeait le long de sa trajectoire dans EPX.

3.3 Grandeurs testées et résultats

Ces tests ont une référence ANALYTIQUE donnée l'état du système en sortie de `CALC_PRECONT`.

Nœud	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
NY10	DX	0.01	-2.40357805409E-06	3.E-5
NY10	DY	0.01	-6.40552798575E-05	1.E-6

Maille	PG	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
MY10	1	NYX	0.01	-100399.049696	1.E-6
MCAY10	1	N	0.01	200000.163668	1.2E-6

4 Modélisation C

Cette modélisation fournit une référence pour le test EPX `bm_str_lcab_glis_amor` qui valide l'effet du câble glissant sur le béton en reproduisant une mise en tension dans EPX. La référence Code_Aster est calculée avec `DEFI_CABLE_BP` et `CALC_PRECONT`.

Le test EPX `bm_str_lcab_glis_amor` utilise l'amortissement d'EPX.

Il utilise à la fois `LIRE_EUROPLEXUS` sans passer par `CALC_EUROPLEXUS` pour récupérer le résultat du test EPX contenu dans un fichier MED (donné en unité 19) et reproduit le calcul avec `CALC_EUROPLEXUS`.

4.1 Conditions aux limites et chargements

Code_Aster :

Mêmes conditions aux limites que la modélisation B. Le chargement de précontrainte diffère seulement sur la valeur de la tension initiale donnée par `TENSION_INIT`. Elle est ici égale à $2.37182E+08$.

La valeur de cette tension est obtenue à partir de la composante *DY* du nœud `ANCR2` sur le champ FLIA (forces de liaison) d'EPX à l'instant final du calcul. C'est la force induite par le déplacement imposé appliqué sur le béton.

EPX :

Mêmes conditions aux limites et chargement que la modélisation A.

4.2 Détails

Comme déjà dit, dans le calcul EPX on utilise les fonctionnalités d'amortissement pour simuler un calcul quasi-statique et ainsi obtenir une solution stabilisée en un temps raisonnable. On arrête le calcul à $0.2s$ en s'étant assuré que plus rien n'évolue.

4.3 Grandeurs testées et résultats

Ces tests ont une référence `AUTRE_ASTER` donné par le résultat issu de `CALC_PRECONT`.

Maille	PG	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>MY</i> 10	1	<i>YYY</i>	0.2	-119202846.463	4.E-3
<i>MCAY</i> 10	1	<i>N</i>	0.2	237528990.0	2.E-3

5 Modélisation D

Cette modélisation fournit une référence pour le test EPX `bm_str_lcab_frot_amor` qui reproduit la mise en tension d'un câble frottant. Les valeurs de références sont les profils de tension calculés avec `DEFI_CABLE_BP`.

Le test EPX `bm_str_lcab_frot_amor` utilise l'amortissement d'EPX.

Il utilise à la fois `LIRE_EUROPLEXUS` sans passer par `CALC_EUROPLEXUS` pour récupérer le résultat du test EPX contenu dans un fichier MED (donné en unité 19) et reproduit le calcul avec `CALC_EUROPLEXUS`.

5.1 Matériau de frottement

On affecte au câble pour Code_Aster et aux discrets de frottement pour EPX le matériau `BPEL_ACIER` avec les paramètres suivants :

FROT_LINE	0,003
FROT_COURB	0,2

5.2 Conditions aux limites et chargements

EPX :

Mêmes conditions aux limites et chargement que la modélisation A. Seule la fonction multiplicatrice change pour simuler le recul d'ancrage.

Temps	Coefficient
0.	0.0
0.002	1.0
0.06	1.0
0.1	0.933333
1.0	1.0

Le passage de la fonction multiplicatrice à 0,933333 correspond à un recul de 0,2 m de `ANCR2`.

Code_Aster :

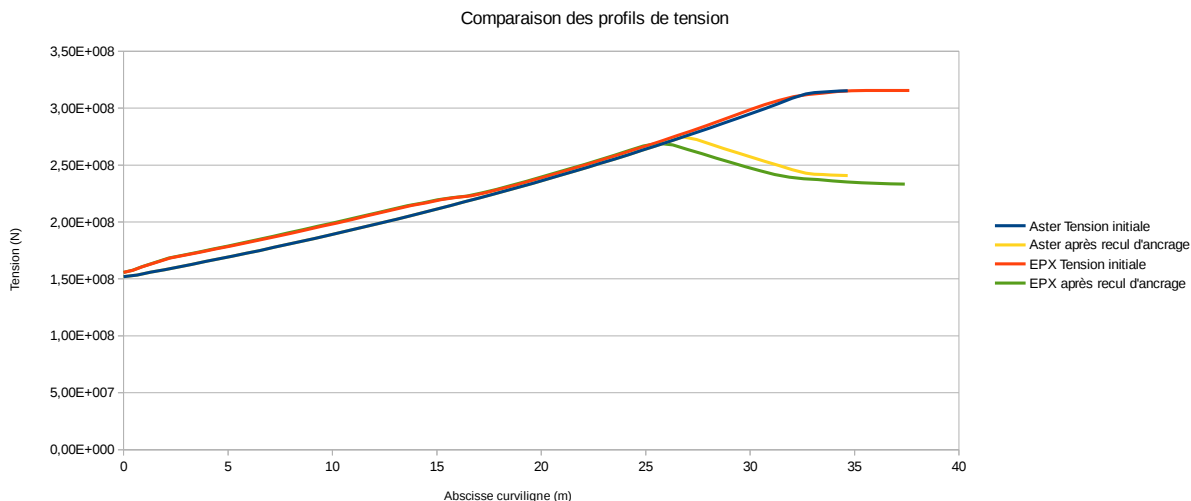
Mêmes conditions aux limites que la modélisation B. Le chargement de précontrainte diffère seulement sur la valeur de la tension initiale donnée par `TENSION_INIT`. Elle est ici égale à 315367000 . L'appel à `DEFI_CABLE_BP` est fait deux fois, une première fois sans recul d'ancrage et une deuxième fois avec un recul d'ancrage de 0,116.

La valeur de la tension à appliquer dans Code_Aster a été déterminée de la manière suivante. On a récupéré les résultats du calcul EPX. Le champ EPX de contraintes des câbles a été transformé en champs d'effort. A partir de ce champ aux points de Gauss (`SIEF_ELGA`) on a calculé le champ aux nœuds correspondants (`SIEF_NOEU`). On a ensuite détecté dans le champ de déplacement au temps 0.06s, le premier nœud de câble à partir du nœud `ANCR2` dont la coordonnée actualisée Y n'ait pas dépassée -2 m. Physiquement, c'est le premier nœud de câble qui ne soit pas sorti du béton lors de cette phase de mise en tension. La valeur de la tension à appliquer dans Code_Aster est la valeur du champ d'effort aux nœuds à ce nœud.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, le recul d'ancrage à appliquer dans Code_Aster n'est pas de 0.2m mais de 0.116m. En effet le recul d'ancrage ne doit pas être calculé à partir du nœud `ANCR2`

mais à partir du dernier nœud encore inclus dans le béton à la suite de la phase initiale. On obtient alors la valeur de 0.116m.

5.3 Comparaison des profils de tension



On donne ici l'analyse faite dans le document EPX :

Dans la phase initiale de mise en tension, on voit que les courbes se superposent presque parfaitement pour les abscisses curvilignes supérieures à 20.0 m environ. En imprimant la valeur des courbures en chaque nœud calculées dans EPX, on s'est aperçu que quelques valeurs au milieu du câble étaient assez différentes des autres, alors que dans la partie circulaire la courbure doit être la même en chaque point. Ceci est probablement le fait de très légères imprécisions dans le maillage à ce niveau. Code_Aster ne le voit pas car il utilise une méthode de spline interpolant globalement la trajectoire du câble alors que dans EPX on interpole simplement la trajectoire localement.

Concernant le recul d'ancrage, on a des différences légèrement plus grandes mais les courbes sont parallèles sur cette partie. Les différences peuvent provenir d'une prise en compte du frottement sur des nœuds normalement sortis du béton ou encore de l'interprétation du nœud de référence pour la détermination du recul d'ancrage à appliquer dans Code_Aster.

5.4 Grandeurs testées et résultats

On test l'écart maximum des profils de tension de Code_Aster et d'EPX à la fin des phases de tension initiale et de recul d'ancrage.

Instant	Écart maximum
0.06	0.0447086123078
0.12	0.0605346658829

6 Modélisation E

Ce test reproduit le bench EPX bm_str_lcab_frot. Il valide l'utilisation des câbles frottants dans EPX sans amortissement.

6.1 Matériau de frottement

On affecte au câble pour Code_Aster et aux discrets de frottement pour EPX le matériau BPEL_ACIER avec les paramètres suivants :

FROT_LINE	0,018
FROT_COURB	0,38

Ces coefficients correspondent à deux fois les coefficients de frottements réglementaires de type TICC (Torons Injectés au Coulis de Ciment).

6.2 Grandeurs testées et résultats

Nœud	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>NY10</i>	<i>DX</i>	0.11	2.27750E-01	1.E-3
<i>NY10</i>	<i>DX</i>	0.4	2.37959E-01	1.E-3

Maille	PG	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>MCAY10</i>	1	<i>N</i>	0.11	40510650.0	1.E-3
<i>MCAY10</i>	1	<i>N</i>	0.4	38661900	1.E-3

7 Modélisation F

Cette modélisation valide l'utilisation d'un état initial de précontrainte avec la liaison EPX *LCAB FROT*. Il correspond aux tests « *bm_str_lcab_frot_ini_med* » et « *bm_str_lcab_frot_ini_amor* ».

7.1 Conditions aux limites et chargements

Les 6 nœuds à chaque extrémité du béton sont encastrés.

De plus on affecte au modèle un chargement de type précontrainte calculé à partir de *DEFI_CABLE_BP* et *CALC_PRECONT*. La tension imposée sur le câble est définie dans *DEFI_CABLE_BP* par les mot-clés *TENSION_INIT* et *RECU_L_ANCRAGE*, dont les valeurs sont respectivement de $2.E7\text{ N}$ et 0.01 m . Ce chargement est envoyé à EPX sous la forme d'un état initial.

7.2 Détails

Deux calculs sont effectués. Dans les deux cas, on applique dans EPX la précontrainte sans chargement supplémentaire. Dans le premier, le mot-clé *EQUI* est mis à 'OUI' afin qu'EPX équilibre l'état initial donné Code_Aster. On vérifie alors que le système n'évolue pas. Dans le second, *EQUI* est mis à 'NON'. Un léger amortissement est ajouté pour laisser le système s'équilibrer tout seul.

7.3 Grandeurs testées et résultats

Calcul 1 :

Ces tests ont une référence *ANALYTIQUE* donnée l'état du système en sortie de *CALC_PRECONT*.

Nœud	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>NY10</i>	<i>DX</i>	0.01	$-1.46059\text{E-}04$	1.E-3
<i>NY10</i>	<i>DY</i>	0.01	$-3.61863\text{E-}03$	1.E-3

Maille	PG	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>MCAY10</i>	1	<i>N</i>	0.01	14051238.3598	1.E-3

Calcul 2 :

Ces tests ont une référence *SOURCE_EXTERNE*.

Nœud	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>NY10</i>	<i>DX</i>	0.2	$1.36726\text{E-}04$	1.E-3
<i>NY10</i>	<i>DY</i>	0.2	$-3.69190\text{E-}03$	1.E-3

Maille	PG	Composante	Instant (s)	Valeur de référence (m)	Tolérance
<i>MCAY10</i>	1	<i>N</i>	0.2	14278815.0	1.E-3

8 Synthèse

Les différentes modélisations valident bien les points suivants :

- l'utilisation de la liaison *LCAB GLIS D'EPX* dans *CALC_EUROPLEXUS* sans précontrainte ;
- l'utilisation de la liaison *LCAB GLIS D'EPX* dans *CALC_EUROPLEXUS* avec précontrainte ;
- l'effet des câbles glissants sur le béton dans EPX ;
- l'utilisation de la liaison *LCAB FROT D'EPX* dans *CALC_EUROPLEXUS* sans précontrainte ;
- l'utilisation de la liaison *LCAB FROT D'EPX* dans *CALC_EUROPLEXUS* avec précontrainte ;
- le calcul de la force seuil de la loi BPEL d'EPX.