

Réalisation d'une étude génie civil avec câbles de précontrainte

Résumé :

Ce document a pour but de donner des conseils pour réaliser des études de béton armé avec des câbles de précontrainte. Il donne des informations sur les précautions de maillage, sur les modalités d'application de la précontrainte et sur les possibilités de phasage.

1 Introduction

Les études de Génie Civil sont souvent assez complexes à réaliser dans la mesure où elles font intervenir des modélisations 3D, coques, barres et plusieurs matériaux. Ce document essaie de mutualiser l'expérience acquise sur le sujet en donnant des conseils de méthodologie pour le maillage et la phase de modélisation, pour ce qui concerne les structures précontraintes.

La mise en œuvre numérique de la tension exige quelques précautions d'usage, notamment dans le cas des calculs non-linéaires, puisque la chronologie des chargements peut impacter les résultats. Dans ce document, nous voyons comment mettre en place les commandes pour reproduire quelques exemples de situations envisageables dans la réalité.

2 Remarque préliminaire

Dans *Code_Aster*, les câbles de précontrainte sont modélisés par des éléments 1D (barre à 2 nœuds). Leur mise en tension est possible et consiste à appliquer une tension non nulle dans ces câbles. Deux variantes existent pour réaliser cette mise en tension. La première méthode consiste à mettre en place les conditions cinématiques entre le câble et le béton, calculer la tension le long du câble et ensuite appliquer ces chargements au modèle (chargement instantané) pour chercher l'équilibre de la structure. Son inconvénient est que la tension qui résulte de l'équilibre est généralement plus faible que celle demandée par l'utilisateur.

La deuxième méthode est une amélioration de la première : elle garantit que la tension à l'équilibre soit exactement celle demandée, mais permet également la mise en tension successive des câbles pour recréer le phasage de la mise en précontrainte de la structure. Le dernier intérêt de cette méthode, c'est la possibilité d'appliquer la tension du câble de façon graduelle, ce qui peut être nécessaire pour des comportements de type non-linéaire, notamment en cas de fissuration du béton pendant la phase de mise en précontrainte.

Dans les deux cas, les ingrédients de base sont les mêmes (opérateur `DEFI_CABLE_BP` et `AFFE_CHAR_MECA`). La différence vient du fait que dans le premier cas, la mise en équilibre est faite simplement par un `STAT_NON_LINE` alors que dans le deuxième cas, on utilise la macro-commande `CALC_PRECONT` qui englobe un certain nombre de manipulations du modèle pour assurer la mise en tension (cf. [R7.01.02]).

3 Première étape : le maillage

Pour réaliser un calcul sur une structure de génie civil, il est nécessaire de mailler le béton, et éventuellement les armatures ainsi que les câbles de précontrainte.

- Le maillage du béton peut être réalisé avec n'importe quel élément volumique en 3D ou en 2D. Les éléments peuvent être linéaires ou quadratiques.
- Les armatures sont obligatoirement maillées avec des `SEG2` dont les nœuds doivent être confondus avec ceux du béton. Il faut donc y penser lorsqu'on maille le béton. Par ailleurs, il faut être vigilant si le béton est maillé avec des éléments cubiques de façon à bien faire correspondre tous les nœuds béton situés le long de l'armature avec un nœud acier : autrement dit si le béton est maillé avec des éléments quadratiques, à l'endroit où doit passer une armature, il faut définir 2 `SEG2` acier pour une maille béton.

- Les câbles de précontrainte doivent être maillés avec des *SEG2*. En revanche, il n'est pas nécessaire de faire coïncider les nœuds du câble et les nœuds béton : la commande *DEFI_CABLE_BP* permet en effet de créer également des liaisons cinématiques qui vont lier les nœuds du câble avec les nœuds du béton de la maille environnante. Par contre, cela génère un grand nombre de multiplicateurs de Lagrange qui vont alourdir le calcul. Il y a donc un compromis à trouver entre facilité de réaliser le maillage et coût du calcul.
- Afin de pouvoir définir les câbles, il est nécessaire d'avoir nommé les nœuds d'ancrage à chaque extrémité du câble.

4 Deuxième étape : la mise en donnée du problème

On détaille ici les différentes étapes de la mise en donnée d'un problème type de béton précontraint dans *Code_Aster*. Pour chaque phase, on précise les éventuelles questions à se poser et les informations qu'il faut fournir. Un exemple de mise en application est proposé en annexe où l'on donne les différentes variantes pour la phase de résolution.

4.1 Lecture et enrichissements éventuels du maillage

Vérifier que les nœuds d'ancrage sont bien accessibles (individuellement) par un *GROUP_NO*.
Créer les éventuels groupes de nœuds ou de mailles pour le post-traitement.
Orienter correctement les groupes de mailles où on impose des chargements de type pression ou flux (commande *ORIE_PEAU_3D* (2D)).

4.2 Affectation d'un modèle

A l'heure actuelle, les armatures et les câbles de précontrainte ne peuvent être modélisés que par des éléments *BARRE* (s'appuyant sur des *SEG2*). Pour le béton, le choix est beaucoup plus libre, en revanche, il faut noter les limitations suivantes :

- en présence de câble de précontrainte, l'utilisation de *DEFI_CABLE_BP* n'autorise que les éléments volumiques et les modélisations de plaque (*DKT, Q4GG*) ;
- l'opérateur *CALC_PRECONT* qui permet notamment de ne pas mettre tous les câbles en tension simultanément est compatible avec les mêmes modélisations.

4.3 Caractéristiques des éléments de structure

Définir la section des armatures passives et des câbles de précontrainte.

4.4 Définition des matériaux

Les lois de comportement disponibles pour le béton sont :

- *ELAS*,
- *MAZARS* version locale ou non-locale [R7.01.08]
- *ENDO_ISOT_BETON* version locale ou non locale [R7.01.04]
- *ENDO_ORTH_BETON* version locale ou non locale [R7.01.09]
- *BETON_DOUBLE_DP* [R7.01.03]
- *KIT_DDI* pour combiner un modèle mécanique avec un modèle de fluage : *BETON_DOUBLE_DP* avec *GRANGER_FP*, et ses variantes [R7.01.01] ou *MAZARS* avec *BETON_UMLV_FP*.

Les lois de comportement disponibles pour les aciers sont : à peu près toutes les lois sont utilisables avec les éléments barres, les plus couramment utilisées sont :

- *ELAS*

- VMIS_CINE_LINE (plasticité à écrouissage cinématique linéaire)
- VMIS_ISOT_LINE (plasticité à écrouissage isotrope linéaire)
- VMIS_ISOT_TRAC (plasticité à écrouissage isotrope donné par une courbe en traction)
- PINTO_MENEGOTTO

Le choix de la loi détermine les mots-clés à renseigner sous `DEFI_MATERIAU`.

En présence de câbles et pour pouvoir utiliser `DEFI_CABLE_BP`, il faut également avoir renseigné :

- le mots-clé `BETON_BPEL` (`PERT_FLUA`, `PERT_RETR`) pour les mailles béton,
- le mots-clé `ELAS` et `ACIER_BPEL` (`SY`, `FROT_LINE`, `FROT_COURB`, `MU0_RELAX`, `RELAX_1000`) pour l'acier des câbles de précontrainte.

Tous ces paramètres ne sont pas obligatoires.

Remarques :

- 1) Le paramètre `SY` demande une attention particulière puisque contrairement à ce qu'on pourrait attendre, il n'intervient pas dans un éventuel calcul non linéaire avec la plasticité des câbles. Le `SY` renseigné sous `ACIER_BPEL` correspond au paramètre `Fprg` indiqué dans le règlement `BPEL` et qui permet de calculer la perte par relaxation. Pour permettre un calcul avec plastification, il faut déclarer la limite d'élasticité avec la loi de comportement choisie.
- 2) La commande `DEFI_CABLE_BP` ne peut pas considérer le cas où les caractéristiques élastiques du béton traversé par le câble peuvent varier avec la température.
- 3) La commande `DEFI_CABLE_BP` peut supporter le cas où un câble traverse plusieurs matériaux béton. Il faut cependant que tous les bétons aient les mêmes propriétés vis-à-vis du `BPEL`, c'est-à-dire les mêmes propriétés sous le mot-clé `BPEL_BETON`.

4.5 Définition des câbles

La phase de définition des câbles passe par la commande `DEFI_CABLE_BP`. Cela permet de définir quelle doit être la tension dans les câbles selon les règles du `BPEL`, en fonction de la tension initiale, du recul d'ancrage (qui s'applique uniquement pour les ancrages actifs), de la relaxation de l'acier et des déformations différées du béton (fluage et retrait).

Signalons qu'un seul `DEFI_CABLE_BP` peut regrouper plusieurs câbles à condition qu'ils aient les mêmes paramètres d'entrée pour le calcul de la tension, et que l'on souhaite tendre tous ces câbles simultanément.

Le poinçonnement créé par les ancrages peut quelques fois donner lieu à des difficultés numériques de modélisation. L'origine de ce problème est lié à l'incompatibilité du mode de chargement (une force ponctuelle créée par l'ancrage) par rapport au maillage du béton (2D ou 3D). Pour éviter ce problème, le mot-clé `CONE` sous `DEFI_CABLE_BP` (disponible à partir de la V7 de *Code_Aster*) permet de définir un volume représentant le cône d'évanouissement placé à l'extrémité des câbles, et ainsi de répartir la force de poinçonnement sur un volume du béton, et non plus sur un ou, quelques nœuds au plus. La géométrie de ce volume correspond à un cylindre dont les dimensions (longueur et rayon) devraient correspondre au cône d'évanouissement réellement employé. Cependant il faut noter que si le maillage du béton dans cette région n'est pas suffisamment fin, le volume du cône ne pourra pas intégrer des nœuds de béton en plus. Mais dans cette condition le problème de concentration de contrainte sera probablement insignifiant.

Remarques :

- 1) Chaque extrémité de câble peut être déclarée comme étant « actif » ou « passif ». Si un câble ne comporte aucune extrémité active, aucune tension n'est alors appliquée.
- 2) L'utilisation de l'option `CONE` requiert une attention particulière quant à la façon d'imposer les conditions aux limites sous peine de voir apparaître des conditions cinématiques surabondantes qui empêchent la résolution du problème.

4.6 Définition des chargements

Il est nécessaire de définir séparément (soit autant d'appels à `AFFE_CHAR_MECA(_F)`) les chargements suivants :

- Les conditions aux limites ainsi que les éventuels chargements instantanés valables dès le début du calcul
- Les relations cinématiques permettant de relier les nœuds câble aux nœuds béton : `RELA_CINE_BP=_F(RELA_CINE='OUI')`. Ce chargement est nécessaire pour tout calcul avec `STAT_NON_LINE` sur le modèle contenant les câbles de précontrainte (sinon erreur fatale pour cause de matrice non factorisable).
Pendant l'appel à `CALC_PRECONT`, les liaisons cinématiques ne doivent pas être incluses dans les chargements sauf lorsque l'on effectue la mise en tension en plusieurs étapes. Il faut en effet inclure les liaisons cinématiques pour les câbles qui ont déjà été mis en tension par un premier `CALC_PRECONT` : cela concerne donc les câbles qui n'entrent ni dans le mot-clé `CABLE_BP` ni dans le mot-clé `CABLE_BP_INACTIF` (cf. exemple en annexe et plus particulièrement le scénario 1). Dans ce cas, il faut penser à définir autant de chargement que de phases de mise en tension différentes.
- Les chargements postérieurs à la mise en tension des câbles.

5 La résolution du problème mécanique

Il s'agit ici de préciser les chargement à inclure (mot-clé `EXCIT`) lors de l'appel à `CALC_PRECONT`. Plusieurs cas se présentent.

- 1) L'utilisateur souhaite mettre en tension simultanément tous les câbles de précontrainte ainsi qu'un chargement instantané, sans autres chargements au préalable. Dans ce cas, il suffit de faire appel une seule fois à la macro-commande `CALC_PRECONT`. Le chargement est composé des conditions aux limites et des éventuels chargements instantanés. Sous le mot-clé `CABLE_BP`, on inclura tous les concepts `DEFI_CABLE_BP` (voir scénario 3 en annexe).
- 2) L'utilisateur souhaite faire des calculs avant la mise en tension des câbles. Dans ce cas, il convient :
 - 1) soit de ne pas inclure les câbles dans le modèle utilisé pour faire les calculs avant la mise en tension des câbles
 - 2) soit d'utiliser sous le mot-clé `COMPORTEMENT` de `STAT_NON_LINE`, la loi de comportement `RELATION='SANS'` pour les mailles du câble. Dans ce cas, il est indispensable d'ajouter dans les chargements, les relations cinématiques liant câble et béton (obtenues en écrivant `AFFE_CHAR_MECA(RELA_CINE_BP=_F(RELA_CINE='OUI'))`) (voir scénario 1 et 3 en annexe).

- 3) L'utilisateur souhaite mettre successivement en tension les câbles. Dans ce cas, il faut faire appel à `CALC_PRECONT` autant de fois que nécessaire. `CABLE_BP` contiendra les concepts `DEFI_CABLE_BP` associés aux câbles que l'on est en train de tendre au cours de cet appel à `CALC_PRECONT`, `CABLE_BP_INACTIF` contiendra ceux que l'on souhaite tendre ultérieurement. De cette façon, c'est la macro-commande qui se charge d'affecter une loi de comportement `SANS` à ces câbles et d'inclure les liaisons cinématiques associées à ces mêmes câbles. Pour le chargement, il s'agit d'inclure systématiquement les conditions aux limites ainsi que les éventuels chargements instantanés. A partir du deuxième appel à `CALC_PRECONT`, il convient d'inclure en plus, les liaisons cinématiques liées aux câbles déjà mis en tension aux étapes précédentes (voir scénario 1 en Annexe).

Dans tous les cas de figure, pour les `STAT_NON_LINE` qui suivent la mise en tension des câbles, il est important de ne pas oublier l'ensemble des liaisons cinématiques liées aux câbles

Remarque :

Si pour une raison ou une autre, l'utilisateur ne souhaite pas utiliser `CALC_PRECONT` pour mettre en tension les câbles de précontrainte, il est possible d'avoir recours à l'ancienne méthode de mise en tension des câbles malgré ses inconvénients [R7.01.02]. La mise en tension est réalisée simplement en incluant dans les charges le concept `AFFE_CHAR_MECA` défini par `RELA_CINE_BP = F(RELA_CINE = 'OUI', SIGM_BPEL='OUI')`. A l'issue de ce calcul, la tension dans les câbles n'est plus égale à celle prescrite par le `BPEL`. Néanmoins, il est possible de déterminer les coefficients de correction à appliquer aux tensions initiales appliquées aux câbles (au niveau de la déclaration de l'opérateur `DEFI_CABLE_BP`) permettant de compenser globalement la perte par déformation instantanée de la structure. Une fois le fichier de commande modifié par ces coefficients de correction, la modélisation des câbles de précontrainte est accomplie.

Attention, dans le cas d'enchaînement de `STAT_NON_LINE`, il convient à partir du deuxième appel, de n'inclure dans le chargement que les relations cinématiques et pas la tension dans les câbles, sous peine d'ajouter cette tension, à chaque calcul (voir scénario 2 en annexe). Cela nécessite donc de créer un deuxième `AFFE_CHAR_MECA` avec l'opérande `RELA_CINE_BP = F(RELA_CINE = 'OUI', SIGM_BPEL='NON')` (cf. scénario 2 en Annexe).

6 Annexe

Voici un exemple d'application inspiré du cas test [V6.04.164] (SSNV164). Il s'agit d'un poteau traversé par 5 câbles, et le chargement est composé de :

- la pesanteur
- la précontrainte dans les câbles
- une pression sur la face supérieure

La mise en donnée est commune, ensuite on montre 3 scénarios pour résoudre le problème :

Le premier scénario est le plus physique :

- prise en compte de la pesanteur
- mise en tension des câbles 1 et 2
- mise en tension des câbles 3 et 4
- mise en tension du câble 5
- mise en pression

Le deuxième scénario est celui qu'on appliquait avant le développement de l'opérateur `CALC_PRECONT` (jusqu'à la version 6 de *Code_Aster*) et qui est la méthode qui reste préconisée dans le cas où on utilise un modèle `DKT` pour le béton

- prise en compte de la pesanteur et mise en tension des 5 câbles
- mise en pression

Le troisième scénario est identique au deuxième en ce qui concerne l'ordre d'application des chargements mais il utilise l'opérateur `CALC_PRECONT` et permet ainsi d'avoir directement la tension réglementaire dans les câbles de précontrainte

La mise en donnée du problème

<pre> MA=LIRE_MAILLAGE(...) MA=DEFI_GROUP(...) MO=AFPE_MODELE(MAILLAGE=MA, AFPE=(_F(GROUP_MA='VOLTOT', PHENOMENE='MECANIQUE', MODELISATION='3D',),), _F(GROUP_MA=('CAB1','CAB2','CAB3',' CAB4','CAB5'), PHENOMENE='MECANIQUE', MODELISATION='BARRE',),),) CE=AFPE_CARA_ELEM(MODELE=MO, BARRE=_F(...),) MBETON=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(...), BPEL_BETON=_F(...)); MCABLE=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(...), BPEL_ACIER=_F(SY=1.94E11, FROT_COURB=0.0, FROT_LINE=1.5E-3,),), ECRO_LINE = _F(...)) CMAT=AFPE_MATERIAU(...) CAB_BP1=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO, CHAM_MATER=CMAT, CARA_ELEM=CE, GROUP_MA_BETON='VOLTOT', DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB1', GROUP_NO_ANCRAGE=('PC1D','PC1F',),), TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',), TENSION_INIT=3.75E6, RECU_L_ANCRAGE=0.001,); CAB_BP2=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO, CHAM_MATER=CMAT, CARA_ELEM=CE, GROUP_MA_BETON='VOLTOT', DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB2', GROUP_NO_ANCRAGE=('PC2D','PC2F',),), TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',), TENSION_INIT=3.75E6, RECU_L_ANCRAGE=0.001,); CAB_BP3=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO, CHAM_MATER=CMAT, CARA_ELEM=CE, GROUP_MA_BETON='VOLTOT', DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB3', GROUP_NO_ANCRAGE=('PC3D','PC3F',),), TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',), TENSION_INIT=3.75E6, RECU_L_ANCRAGE=0.001,); CAB_BP4=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO, CHAM_MATER=CMAT, CARA_ELEM=CE, GROUP_MA_BETON='VOLTOT', DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB4', GROUP_NO_ANCRAGE=('PC4D','PC4F',),), TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',), TENSION_INIT=3.75E6, RECU_L_ANCRAGE=0.001,); CAB_BP5=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO, CHAM_MATER=CMAT, CARA_ELEM=CE, GROUP_MA_BETON='VOLTOT', DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB5', GROUP_NO_ANCRAGE=('PC5D','PC5F',),), </pre>	<p>Lecture et enrichissement du maillage. La création des GROUP_NO liés aux câbles n'est indispensable que pour un éventuel post-traitement le long de ceux-ci.</p> <p>Définition des modèles (3D pour le béton, BARRE pour les câbles)</p> <p>Caractéristiques géométriques (transversales) des éléments barres</p> <p>Création et affectation des caractéristiques matériaux pour le câble et le béton : Béton : élastique + données réglementaires BPEL par défaut Acier : élastique + données réglementaires BPEL + données pour modèle plastique à écrouissage isotrope</p> <p>Définition des 5 câbles de précontrainte</p> <p>Remarque : <i>Il est possible de regrouper : CAB_BP1 et CAB_BP2 mais aussi CAB_BP3 et CAB_BP4 puisqu'ils ont les mêmes caractéristiques et sont mis en tension simultanément.</i></p> <p>Dans le cas où tous les câbles sont tendus simultanément (scénario 2 et 3), on peut regrouper tous les câbles sauf le 5 dont les ancrages sont différents (ACTIF/PASSIF contre ACTIF/PASSIF).</p>
--	---

<pre>TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','ACTIF'), TENSION_INIT=3.75E6, RECU_L_ANCRAGE=0.001,) CLIM =AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, DDL_IMPO =..., PESANTEUR =...) CMCAB1=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, RELA_CINE_BP=_F (CABLE_BP=CAB_BP1, SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI',),) CMCAB2=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, RELA_CINE_BP=_F (CABLE_BP=CAB_BP2, SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI',),) CMCAB3=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, RELA_CINE_BP=_F (CABLE_BP=CAB_BP3, SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI',),) CMCAB4=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, RELA_CINE_BP=_F (CABLE_BP=CAB_BP4, SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI',),) CMCAB5=AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, RELA_CINE_BP=_F (CABLE_BP=CAB_BP5, SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI',),); PRES =AFFE_CHAR_MECA (MODELE=MO, PRES_REP =_F (GROUP_MA = 'HAUT', PRES = 500,,) FCT = DEFI_FONCTION (NOM_PARA = 'INST', VALE = (0.,0., 600., 0., 1000., 1.),)</pre>	<p>Création des chargements :</p> <p>les conditions aux limites et la pesanteur</p> <p>Les liaisons cinématiques reliant le câble au béton (ici SIGM_BPEL='NON' , car on ne veut pas inclure dans ce chargement la tension dans les câbles)</p> <p>Les chargements postérieurs à la mise en tension des câbles (ici une pression)</p>
--	--

Scénario 1

```
LINST=DEFI_LIST_REEL (VALE=(0.0,150.,300.,450.,600.,1000.),
);

# ETAPE 1 : effet de la pesanteur

RES1 = STAT_NON_LINE (MODELE=MO,
                      CHAM_MATER=CMAT,
                      CARA_ELEM=CE,
                      COMPORTEMENT=( _F ( RELATION =
'ELAS', ),
                                     _F ( RELATION = 'SANS',
                                           GROUP_MA= ('CABLE'), ), ),
                      EXCIT = ( _F (CHARGE = CLIM, ),
                                _F (CHARGE = CMCAB1, ),
                                _F (CHARGE = CMCAB2, ),
                                _F (CHARGE = CMCAB3, ),
                                _F (CHARGE = CMCAB4, ),
                                _F (CHARGE = CMCAB5, ),
                      INCREMENT=_F (LIST_INST = LINST,
                                     INST_FIN = 150.))

# ETAPE 2 : mise en tension des câbles 1 et 2
#-----
RES1 = CALC_PRECONT (reuse=RES1,
                    ETAT_INIT=_F (EVOL_NOLI=RES1),
                    MODELE=MO,
                    CHAM_MATER=CMAT,
                    CARA_ELEM=CE,
                    COMPORTEMENT=( _F ( RELATION = 'ELAS',
                                         GROUP_MA='VOLTOT', ),
                                   _F ( RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',
                                         GROUP_MA = 'CABLE' ), ),
                    EXCIT=( _F (CHARGE = CLIM, ), ),
                    CABLE_BP=(CAB_BP1,CAB_BP2),
                    CABLE_BP_INACTIF =
(CAB_BP3,CAB_BP4,CAB_BP5),
                    INCREMENT=_F (LIST_INST = LINST,
                                     INST_FIN = 300.))

# ETAPE 3 : mise en tension câbles 3 et 4
#-----
RES1 = CALC_PRECONT ( reuse=RES1,
                    ETAT_INIT=_F (EVOL_NOLI=RES1),
                    MODELE=MO,
                    CHAM_MATER=CMAT,
                    CARA_ELEM=CE,
                    COMPORTEMENT=( _F ( RELATION = 'ELAS',
                                         GROUP_MA='VOLTOT', ),
                                   _F ( RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',
                                         GROUP_MA = 'CABLE' ), ),
                    EXCIT = ( _F (CHARGE = CLIM, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB1, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB2, ), ),
                    CABLE_BP = ( CAB_BP3 , CAB_BP4 ),
                    CABLE_BP_INACTIF = ( CAB_BP5 , ),
                    INCREMENT=_F (LIST_INST = LINST,
                                     INST_FIN = 450.))

# ETAPE 4 : mise en tension câble 5
#-----
RES1 = CALC_PRECONT ( reuse=RES1,
                    ETAT_INIT=_F (EVOL_NOLI=RES1),
                    MODELE=MO,
                    CHAM_MATER=CMAT,
                    CARA_ELEM=CE,
                    COMPORTEMENT=( _F (RELATION = 'ELAS',
                                         GROUP_MA='VOLTOT', ),
                                   _F ( RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',
                                         GROUP_MA = 'CABLE' ), ),
                    EXCIT = ( _F (CHARGE = CLIM, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB1, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB2, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB3, ),
                              _F (CHARGE = CMCAB4, ), ),
                    CABLE_BP = ( CAB_BP5 , ),
                    INCREMENT=_F (LIST_INST = LINST,
                                     INST_FIN = 600.))
```

Les câbles n'interviennent pas : d'où RELATION='SANS', mais comme ils sont présents dans le modèle, on inclut les liaisons cinématiques les concernant (sinon les câbles "tombent").

Alors que les conditions aux limites et la pesanteur sont maintenues, CALC_PRECONT, va mettre en tension les câbles 1 et 2, tout en maintenant inactifs les câbles 3,4 et 5. Affecter la loi de comportement réelle aux câbles. Ne pas inclure les liaisons cinématiques liant les câbles au béton, CALC_PRECONT s'en charge

Cette fois les câbles 1 et 2 sont déjà tendus et ne sont donc plus gérés par CALC_PRECONT, c'est pourquoi il faut inclure dans le chargement en plus des conditions aux limites, les liaisons cinématiques pour ces 2 câbles. En revanche rien à mettre pour le câble 5, toujours inactif, et pour les câbles 3 et 4 que CALC_PRECONT va mettre en tension à cette étape

Seul le câble 5 est géré par CALC_PRECONT, il faut donc inclure les liaisons cinématiques pour les autres câbles déjà tendus (1,2,3 et 4).

ETAPE 5 : mise en pression

#

```
RES1 = STAT_NON_LINE( reuse=RES1,  
                      ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=RES1),  
                      MODELE=MO,  
                      CHAM_MATER=CMAT,  
                      CARA_ELEM=CE,  
                      COMPORTEMENT=( _F( RELATION = 'ELAS',  
                                         GROUP_MA='VOLTOT',),  
                                     _F( RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',  
                                         GROUP_MA = 'CABLE',),),  
                      EXCIT  =( _F(CHARGE = CLIM,),  
                               _F(CHARGE = CMCAB1,),  
                               _F(CHARGE = CMCAB2,),  
                               _F(CHARGE = CMCAB3,),  
                               _F(CHARGE = CMCAB4,),  
                               _F(CHARGE = CMCAB5,),  
                               _F(CHARGE = PRES,  
                                   FONC_MULT = FCT,)),  
                      INCREMENT=_F(LIST_INST = LINST,  
                                     INST_FIN = 1000.))
```

Tous les câbles sont maintenant actifs. Le chargement doit comprendre les conditions aux limites, les chargements instantanés, les liaisons cinématiques pour tous les câbles et les nouveaux chargements à appliquer (ici PRES).

Scénario 2

```
LINST=DEFI_LIST_REEL(VALE=(0.0, 600., 1000.),);  
CMCAB1B=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MO,  
    RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP1,  
                    SIGM_BPEL='OUI',  
                    RELA_CINE='OUI',),),  
CMCAB2B=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MO,  
    RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP2,  
                    SIGM_BPEL='OUI',  
                    RELA_CINE='OUI',),),  
CMCAB3B=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MO,  
    RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP3,  
                    SIGM_BPEL='OUI',  
                    RELA_CINE='OUI',),),  
CMCAB4B=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MO,  
    RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP4,  
                    SIGM_BPEL='OUI',  
                    RELA_CINE='OUI',),),  
CMCAB5B=AFPE_CHAR_MECA(MODELE=MO,  
    RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP5,  
                    SIGM_BPEL='OUI',  
                    RELA_CINE='OUI',),);
```

ETAPE 1 : effet de la pesanteur + tension des câbles

```
RES1 = STAT_NON_LINE(MODELE=MO,  
    CHAM_MATER=CMAT,  
    CARA_ELEM=CE,  
    COMPORTEMENT=( _F(RELATION = 'ELAS',  
                       GROUP_MA='VOLTOT',),  
                   _F(RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',  
                       GROUP_MA = 'CABLE',),),  
    EXCIT = (_F(CHARGE = CLIM,),  
             _F(CHARGE = CMCAB1B),  
             _F(CHARGE = CMCAB2B),  
             _F(CHARGE = CMCAB3B),  
             _F(CHARGE = CMCAB4B),  
             _F(CHARGE = CMCAB5B),),  
    INCREMENT=_F(LIST_INST = LINST,  
                 INST_FIN = 600.),)
```

ETAPE 2: mise en pression

```
#-----  
RES1 = STAT_NON_LINE(reuse=RES1,  
    ETAT_INIT=_F(EVOL_NOLI=RES1),  
    MODELE=MO,  
    CHAM_MATER=CMAT,  
    CARA_ELEM=CE,  
    COMPORTEMENT=( _F(RELATION = 'ELAS',  
                       GROUP_MA='VOLTOT',),  
                   _F(RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',  
                       GROUP_MA = 'CABLE',),  
                   _F(CHARGE = CLIM,),  
                   _F(CHARGE = CMCAB1,),  
                   _F(CHARGE = CMCAB2,),  
                   _F(CHARGE = CMCAB3,),  
                   _F(CHARGE = CMCAB4,),  
                   _F(CHARGE = CMCAB5,),  
                   _F(CHARGE = PRES,  
                       FONC_MULT = FCT,)),  
    INCREMENT=_F(LIST_INST = LINST,  
                 INST_FIN = 1000.),)
```

Pour appliquer directement la tension dans les câbles, on a besoin de définir de nouveaux chargements contenant à la fois les liaisons cinématiques liant câble et béton, et la valeur de la tension à inclure dans les câbles (d'où SIGM_BPEL='OUI', contrairement aux chargements CMCAB_i définis initialement).

Le chargement est composé de CLIM et des CMCAB_iB contenant les liaisons cinématiques et la tension dans les câbles

On maintient toujours les conditions aux limites et la pesanteur, on inclut la pression. Pour les câbles, c'est bien les CMCAB_i car on souhaite juste maintenir les liaisons cinématiques (sinon, on ajoute une nouvelle fois la tension dans les câbles)

Scénario 3

```
LINST=DEFI_LIST_REEL(VALE=(0.0, 600., 1000.),);
```

ETAPE 1 : effet de la pesanteur + tension des câbles

```
RES1 = CABLE_PRECONT(MODELE=MO,  
CHAM_MATER=CMAT,  
CARA_ELEM=CE,  
COMPORTEMENT=( _F( RELATION = 'ELAS',  
GROUP_MA='VOLTOT',),  
_F( RELATION = 'VMIS_ISOT_LINE',  
GROUP_MA = 'CABLE',),  
CABLE_BP = (CAB_BP1,CAB_BP2,  
CAB_BP3,CAB_BP4, CAB_BP5),  
EXCIT = _F( CHARGE = CLIM, ),  
INCREMENT=_F( LIST_INST = LINST,  
INST_FIN = 600. ), )
```

Le chargement est composé de CLIM et les 5 câbles sont mis en tension simultanément

ETAPE 2 : mise en pression

```
#-----  
RES1 = STAT_NON_LINE( reuse=RES1,  
ETAT_INIT=_F( EVOL_NOLI=RES1 ),  
MODELE=MO,  
CHAM_MATER=CMAT,  
CARA_ELEM=CE,  
COMPORTEMENT=( _F( RELATION = 'ELAS',  
GROUP_MA='VOLTOT',),  
_F( RELATION='VMIS_ISOT_LINE',  
GROUP_MA = 'CABLE',),  
EXCIT = ( _F( CHARGE = CLIM, ),  
_F( CHARGE = CMCAB1, ),  
_F( CHARGE = CMCAB2, ),  
_F( CHARGE = CMCAB3, ),  
_F( CHARGE = CMCAB4, ),  
_F( CHARGE = CMCAB5, ),  
_F( CHARGE = PRES,  
FONC_MULT = FCT, ),  
INCREMENT=_F( LIST_INST = LINST,  
INST_FIN = 1000. ), )
```

On maintient toujours les conditions aux limites et la pesanteur, on inclut la pression. Pour les câbles, on a toujours besoin des liaisons cinématiques les concernant.