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 en utilisant les fonctionnalités dédiées (DEFI_CABLE_BP/CALC_PRECONT). Il donne des informations sur les précautions de maillage, sur les modalités d'application de la précontrainte et sur les possibilités de phasage.

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

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.

Pour une présentation plus visuelle, les supports de la formation « Code_Aster/salome_meca Module 4 : Génie Civil » peuvent également être consultés (02-Modeling of the prestressed reinforced structures) et une mise en application sous forme de Travaux Pratiques, accessible via le test FORMA42 .

2 Remarque préliminaire

Dans *Code_Aster*, deux types de modélisation existent pour décrire la précontrainte.

- La première méthode est adaptée pour décrire la **précontrainte adhérente**. Dans ce cas, les câbles de précontrainte sont représentés par des éléments $1D$ avec la modélisation BARRE. La précontrainte peut-être appliquée de manière aisée via les opérateurs DEFI_CABLE_BP et AFFE_CHAR_MECA qui permettent d'estimer le profil de tension initiale (N) variable le long du câble d'après les formules réglementaires (BPEL ou ETCC) et de le transformer en chargement.
- La deuxième méthode (moins éprouvée) est adaptée pour décrire la **précontrainte non adhérente** (typiquement les TGG). Dans ce cas, les câbles de précontrainte sont représentés par des éléments 1D avec la modélisation CABLE_GAINE. La mise en tension du câble est obtenue en simulant le processus de mise en tension du câble via l'opérateur CALC_PRECONT, en supposant que les câbles glissent avec un frottement de type loi de Coulomb .

3 Première étape : le maillage

Pour réaliser un calcul sur une structure en béton armé précontraint, il est nécessaire de mailler le béton, 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 . En $3D$, les éléments peuvent être linéaires ou quadratiques. Si une modélisation de type coque est choisie, les éléments seront linéaires.

- Les armatures peuvent être représentés :
  - soit individuellement dans ce cas, elles seront obligatoirement maillées avec des *SEG2* (éléments linéaires) dont les nœuds sont communs 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 quadratiques 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 ;
  - soit de manière répartie sous forme d'une surface dont les nœuds sont les mêmes que les nœuds du béton. Les mailles pourront être indifféremment des triangles ou des quadrangles, linéaires ou quadratiques. Il faudra donc veiller à identifier cette surface au

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

moment du maillage béton et à dupliquer les mailles pour définir la nappe d'acier (via *Transformation → Duplication Nodes/Elements* dans *salome_meca*). S'il y a plusieurs nappes d'armatures, il faudra dupliquer autant de fois que nécessaire ces éléments.

- Les câbles de précontrainte doivent être maillés avec des éléments unidimensionnels. Si la modélisation BARRE est utilisée, ces éléments seront des $SEG2$; si la modélisation CABLE_GAINE est utilisée, ces éléments seront des $SEG3$. Quelque soit la modélisation, 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 les liaisons cinématiques qui vont lier les nœuds du câble avec les nœuds du béton de la maille environnante. Il faut en revanche veiller à avoir un niveau de discrétisation semblable pour le béton et l'acier, de façon à avoir, dans la mesure du possible, un nœud acier dans chaque maille de béton (pour que tous les éléments voient le câble) et d'éviter d'avoir plusieurs nœuds acier dans une maille béton (pour éviter d'alourdir le problème avec des multiplicateurs de Lagrange inutile).
  Les nœuds d'ancrage devant être définis pour chaque câble, il est nécessaire d'avoir créé des groupes de nœuds pour chaque extrémité de câbles.

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 les deux types de modélisation. Pour chaque phase, on précise les éventuelles questions à se poser et les informations qu'il faut fournir. Dans le cas de la modélisation BARRE, 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. Si on souhaite post-traiter les tensions dans des câbles de précontrainte, il faut penser à ordonner les nœuds du groupe de nœuds correspondants (option 'SEGM_DROI_ORDO' ou 'NOEUD_ORDO' dans DEFI_GROUP/CREA_GROUP_NO).

- 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

- **Pour les armature**s

Dans le cas d'une modélisation 3D , les armatures seront modélisées par des éléments BARRE si elles ont été représentées par des éléments linéiques ou par des éléments GRILLE_MEMBRANE ou MEMBRANE) si elles ont été représentées par des éléments surfaciques.
Dans le cas d'une modélisation de type plaque (DKT , Q4GG), il faut utiliser la modélisation GRILLE_EXCENTREE .

- **Pour les câbles de précontrainte**

Pour des câbles adhérents, le modèle BARRE (s'appuyant sur des $SEG2$) sera utilisé.
Pour des câbles non-adhérents, le modèle CABLE_GAINE (s'appuyant sur des $SEG3$) sera utilisé..

4.3 Caractéristiques des éléments de structure

Dans AFFE_CARA_ELEM, définir :

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

- pour les armatures passives, soit leur section (BARRE), soit la section et l'orientation de la nappe (GRILLE)
- pour les câbles de précontrainte, définir la section (BARRE).

4.4 Définition des matériaux

Différents types de lois sont disponibles en fonction des phénomènes que l'on souhaite prendre en compte (élasticité, endommagement, fluage, …). Des tableaux de synthèse donnant les principales caractéristiques de chacune d'entre elles sont disponibles dans **[U2.03.07] : Panorama des outils disponibles pour réaliser des calculs de structure de Génie Civil en béton** .

Le choix de la loi détermine les mots-clés à renseigner sous DEFI_MATERIAU [U4.43.01].

En présence de câbles et pour pouvoir utiliser DEFI_CABLE_BP, il faut également avoir renseigné en plus des paramètres liés à la loi de comportement utilisé, en fonction du règlement utilisé (BPEL ou ETCC) :

- pour le béton, **soit** le mot-clé BPEL_BETON, en renseignant si nécessaire les pertes par fluage PERT_FLUA, et les pertes dues au retrait PERT_RETR **soit** le mot-clé ETCC_BETON() ;

- pour l'acier des câbles de précontrainte, **soit** le mot-clé BPEL_ACIER, en renseignant la contrainte à rupture F_PRG, le coefficient de frottement en partie droite FROT_LINE et en partie courbe FROT_COURB, le coefficient de relaxation MU0_RELAX, et la relaxation de l'acier à 1000 heures RELAX_1000, **soit** le mot-clé ETCC_ACIER. Dans ce cas, les données à fournir sont la contrainte à rupture F_PRG, le coefficient de frottement COEF_FROT, le coefficient de perte en ligne PERT_LIGNE, et la relaxation de l'acier à 1000 heures RELAX_1000 .

Tous ces paramètres sont facultatifs.

Remarques :

1) *Le paramètre F_PRG n'intervient pas dans un éventuel calcul non linéaire avec la plasticité des câbles, il permet uniquement 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 ou ETCC, c'est-à-dire les mêmes propriétés sous le mot-clé BPEL_BETON ou ETCC_BETON.*

Cas des câbles non-adhérents :
Lorsqu'on utilise la modélisation CABLE_GAINE , l'utilisateur doit également renseigner la loi de frottement qui doit être utilisée via le mot-clé CABLE_GAINE_FROT . Le choix est logiquement de type ' FROTTANT ', impliquant de renseigner les coefficients de frottement en ligne droite et en courbe. Toutefois, l'utilisateur a également la possibilité de choisir l'option 'ADHERENT' pour faire facilement des comparaisons entre les deux comportements (résultats équivalents à la modélisation BARRE) ou l'option 'GLISSANT' qui permet d'éviter les éventuelles difficultés de convergence liées au frottement.

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/ETCC, 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).

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

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. C'est en général préférable d'un point de vue performance. Pour faciliter la mise en données et éviter le recours à des macros pythons, il est possible[1] de définir les câbles via une table définie dans un fichier extérieur (cf. SSNV229A).

Si l'utilisateur a fait le choix de modéliser des câbles non-adhérents (FROTTANT ou GLISSANT), il convient de préciser dans DEFI_CABLE_BP, ADHERENT='NON'.

Le poinçonnement créé par les ancrages peut quelque 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 créé par l'ancrage) par rapport au maillage du béton (2D ou 3D). Pour éviter ce problème, le mot-clé CONE sous DEFI_CABLE_BP) 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. La géométrie de ce volume correspond à un cylindre dont les dimensions (longueur et rayon) devraient idéalement 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 n'intégrera pas de nœuds supplémentaires et le problème ne sera pas pas modifié. Il n'est également pas possible qu'il y ait recouvrement des cônes. L'option CONE n'est pas activable dans le cas de câbles non adhérents.

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

4.6.1 Cas des câbles adhérents

Deux variantes existent pour réaliser la mise en tension. La première méthode consiste à appliquer directement la précontrainte sous forme d'une tension initiale dans les câbles comme chargement avec STAT_NON_LINE. Le chargement est instantané. Son inconvénient est que la tension qui résulte de l'équilibre est généralement plus faible que celle demandée par l'utilisateur en raison de la déformation élastique du béton sous l'effet de la précontrainte.

La deuxième méthode est une amélioration de la première et s'appuie sur la macro-commande CALC_PRECONT qui englobe un certain nombre de manipulations du modèle pour assurer la mise en tension (cf. [R7.01.02]). En utilisant cet opérateur, la tension à l'équilibre est exactement celle demandée (c'est à dire celle calculée par les formules réglementaires), mais cela permet également la mise en tension successive des câbles pour recréer le phasage de la mise en précontrainte de la structure. Enfin, 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.

Méthode basique : STAT_NON_LINE
En plus des conditions aux limites, et des différents chargements, il suffit de créer un chargement lié aux câbles via l'opérateur AFFE_CHAR_MECA en incluant les chargements liés à la tension et ceux liés aux liaisons cinématiques entre l'acier et le béton soit :

1 Version 15.2.5

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

```
CHCAB      =AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,      RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP3,
                    SIGM_BPEL=' OUI ', RELA_CINE='OUI',),).
```

Toutefois si l'utilisateur envisage d'enchaîner plusieurs STAT_NON_LINE, il faudra dupliquer ce chargement en n'incluant que les liaisons cinématiques (SIGM_BPEL='NON', RELA_CINE='OUI'). Ce chargement sera utilisé dès le deuxième appel à STAT_NON_LINE.

Méthode conseillée : CALC_PRECONT

En plus des conditions aux limites, et des différents chargements, il faut définir les chargements liés aux câbles qui ne doivent intégrer que les liaisons cinématiques soit :

```
CHCAB      =AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,      RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP3,
                    SIGM_BPEL=' NON ', RELA_CINE='OUI',),).
```

Ces chargements seront utilisés :

- pour tout calcul avec STAT_NON_LINE pendant les phases antérieures à la mise en tension (par exemple, si on simule une phase de fluage)
- pour les phases postérieures à la mise en tension (sinon le calcul s'arrête en erreur fatale pour cause de matrice non factorisable) que le calcul soit fait avec STAT_NON_LINE ou avec CALC_PRECONT.

Il faut donc penser à définir autant de chargements que de phases de mise en tension différentes.

4.6.2 Cas des câbles non adhérents

Les consignes sont les mêmes que pour le cas adhérent avec CALC_PRECONT . En revanche, il faut prévoir également de créer des chargements supplémentaires permettant de bloquer le glissement aux nœuds d'ancrage des câbles une fois mis en tension. Soit :

```
CGLIS =AFFE_CHAR_MECA( MODELE=MO,
                       DDL_IMPO=(    _F(GROUP_NO=('PC1D','PC1F'),
                                        GLIS=0.0,),)
```

5 La résolution du problème mécanique

La dernière étape consiste à résoudre le problème mécanique. Elle se déroule différemment selon la méthode employée et la prise en compte du phasage. Ce chapitre détaille la manière de procéder pour chacun des choix, en précisant les chargements à inclure (mot-clé EXCIT) lors de l'appel à CALC_PRECONT ou à STAT_NON_LINE.

5.1 Câbles adhérents mis en tension avec CALC_PRECONT

Trois cas de figures sont envisageables :

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 (aucun chargement concernant les câbles). 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 :

   - soit de désactiver les câbles dans le modèle en leur affectant la loi de comportement RELATION='SANS' sous le mot-clé COMPORTEMENT de STAT_NON_LINE. Dans ce

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

cas, la rigidité des câbles est nulle. Il est également indispensable d'ajouter dans les chargements, les relations cinématiques liant câble et béton (chargement obtenu en écrivant AFFE_CHAR_MECA(RELA_CINE_BP=_F(RELA_CINE='OUI'))) (voir scénario 1 et 3 en annexe).

- soit de ne pas inclure les câbles dans le modèle utilisé pour faire les calculs avant la mise en tension des câbles (ce qui est plus fastidieux puisqu'il faut travailler avec 2 modèles).

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

5.2 Câbles adhérents mis en tension avec STAT_NON_LINE

Si 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 un coefficient multiplicatif (de l'ordre d'une dizaine de%) à appliquer aux tensions initiales appliquées aux câbles (au niveau de la déclaration de l'opérateur DEFI_CABLE_BP) permettant de compenser globalement les pertes 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).

5.3 Câbles non adhérents mis en tension avec CALC_PRECONT

Les consignes sont identiques au cas des câbles adhérents. Deux spécificités à signaler néanmoins.

1. La loi de comportement pour le câble n'est plus simplement élastique mais :
```
RELATION = 'KIT_CG', RELATION_KIT =(' ELAS
','CABLE_GAINE_FROT'),
```
'ELAS', peut être remplacé par 'SANS' lorsque le câble ne doit pas intervenir dans le calcul.

2. Une fois que les câbles ont été mis en tension, il faut rajouter le chargement qui bloque le glissement des nœuds d'ancrage (cf. § 4.6.2). Il est conseillé de s'appuyer sur le cas-test SSNV164D.

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

6 Cas particuliers : relaxation des câbles et rupture des câbles

6.1 Relaxation des câbles

Pour modéliser la relaxation des câbles deux options sont possibles mais uniquement dans le cas des câbles adhérents (modélisation BARRE et non CABLE_GAINE) : utiliser les formules réglementaires ou utiliser une loi viscoélastique pour les câbles.

- Lorsque vous utilisez les formules réglementaires (BPEL ou ETCC) vous calculez les pertes par relaxation à une date donnée. C'est donc à utiliser avec précaution lorsque vous effectuer un calcul non-linéaire.
- Pour la relaxation, la formule de l'ETCC nécessite de connaître l'état de tension dans le câble après prise en compte des pertes instantanées : le calcul doit donc se faire en 2 étapes. Se reporter au cas-test SSNV229B pour avoir un exemple. L'utilisateur a également la possibilité d'utiliser une version simplifiée : c'est l'option TYPE_RELAXATION='ETCC_DIRECT' (par opposition à TYPE_RELAXATION='ETCC_REPRISE'). Le test SSNV229A met en œuvre cette option.
- Pour un calcul totalement non-linéaire, il suffit d'affecter au câble de précontrainte (modélisation BARRE), la loi de comportement RELAX_ACIER (cf. [R5.03.09] et test SSNL143 pour plus de détails).

6.2 Rupture des câbles

Pour simuler la rupture d'un câble **adhérent**, il faut veiller à ce que le maillage soit suffisamment raffiné pour qu'il n'y ait bien qu'un câble par maille de béton.
Si on suppose que la tension est nulle dans tout le câble, il suffit de faire à nouveau appel à CALC_PRECONT en ayant défini un nouveau DEFI_CABLE_BP avec le ou les câbles concernés en ayant défini une tension nulle
Si on suppose qu'il y a réancrage du câble, alors vous avez la possibilité de rentrer le profil de votre choix. La séquence proposée est la suivante :

- réalisation du calcul de mise en tension initiale
- récupération de la tension dans le(s) câble(s) concerné(s) : CALC_CHAM/POST_RELEVE_T
- modification des tensions dans la table à l'aide d'une formule définie par l'utilisateur
- création du concept DEFI_CABLE_BP en définissant le câble grâce au mot-clé facteur MODI_CABLE_RUPT
- nouvelle mise en précontrainte à l'aide de CALC_PRECONT.

Le test SSNV229C permet d'avoir un exemple.

Attention :compte-tenu des hypothèses de modélisation, les réponses obtenues sont plutôt qualitatives et ne doivent pas être regardées de manière très locales.

7 Post-traitement

Pour les cas adhérents, il est possible de récupérer le profil de tension dans le câble calculée selon les formules réglementaires, via la commande :

```
TAB_1_I=RECU_TABLE(CO=CAB_BP, NOM_TABLE='CABLE_BP',)
```

Après mise en tension des câbles, il est bien sûr possible de tracer le profil de tension à plusieurs instants grâce aux commandes POST_RELEVE_T/RECU_FONCTION/IMPR_FONCTION. Un exemple est présent dans le test FORMA42.

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

8 Liste des cas-tests de vérification/validation

Nom test	Type de structure	Type de validation
SSNV137/ ZZZZ305	Poutre $3D$ soumise à de la flexion-compression par un câble de précontrainte	DEFI_CABLE_BP (BPEL) + STAT_NON_LINE en 3D
ZZZZ344	Cylindre $3D$ avec 1 câble	Calcul des déviations angulaires dans DEFI_CABLE_BP
SSNV229	Cylindre $3D$ avec 10 câbles de précontrainte	Validation des formules de l'ETCC
SSLV115	Elément de béton précontraint 3D (BARRE ou CABLE_GAINE pour le câble)	Vérification des calculs de pesanteur+validation CALC_PRECONT en 3D
SSNV164/ FORMA42	Bi-poutre $3D$ avec 5 câbles de précontrainte	Validation du phasage de mise en précontrainte (comparaison CASTEM) + option CONE (SSNV164B)
ZZZZ347	1/2 anneau en $3D$ avec un câble de précontrainte	Validation des éléments CABLE_GAINE pour décrire les câbles frottants.
ZZZZ111	1/2 cylindre avec 4 câbles de précontrainte	Validation de DEFI_CABLE_BP avec des éléments coques (DKT et Q4GG)
SSNP108	Plaque avec 1 câble de précontrainte (compression)	Validation calcul d'équilibre avec STAT_NON_LINE avec les coques
SSNP109	Poutre soumise à de la flexion-compression par un câble de précontrainte (DKT)	Validation calcul d'équilibre avec STAT_NON_LINE
SSLS137	Plaque avec 1 câble de précontrainte (flexion)	Validation de CALC_PRECONT avec les coques
ARCAD01	Partie courante d'enceinte	Test utilisé pour l'outil-métier ARCADE

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

9 Annexe

Voici un exemple d'application commenté qui est tiré du TP de formation FORMA42 disponible dans la liste des cas-tests [V6.04.165]. 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 (chargement non présent dans le cas-test)

La mise en donnée est commune, ensuite on montre 3 scénarios pour résoudre le problème. La mise en œuvre du test permettra de comparer les réponses obtenues en termes de tension dans les câbles. Selon le scénario choisi, la tension dans les câbles et les déformations du béton ne sont pas identiques.

Le premier scénario (FORMA42C) est le plus physique et le phasage est le suivant :

- 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 (FORMA42B) est identique au premier mais il utilise l'opérateur CALC_PRECONT et permet ainsi d'avoir directement la tension réglementaire dans les câbles de précontrainte.

Le troisième scénario (FORMA42A) 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

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

La mise en donnée du problème

```
MA=LIRE_MAILLAGE(...)

MA=DEFI_GROUP(...)

MO=AFFE_MODELE(MAILLAGE=MA,
               AFFE=(_F(GROUP_MA='VOLTOT',
                        PHENOMENE='MECANIQUE',
                        MODELISATION='3D',),
                     _F(GROUP_MA=('CAB1','CAB2','CAB3','
CAB4','CAB5'),
                        PHENOMENE='MECANIQUE',
                        MODELISATION='BARRE',),),)

CE=AFFE_CARA_ELEM(MODELE=MO,
                  BARRE=_F(... ),)

MBETON=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(...),
                     BPEL_BETON=_F(),);

MCABLE=DEFI_MATERIAU(ELAS=_F(... ),
                     BPEL_ACIER=_F(F_PRG=1.94E11,
                                   FROT_COURB=0.0,
                                   FROT_LINE=1.5E-3,))

CMAT=AFFE_MATERIAU(...)


CAB_BP12=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO,
           CHAM_MATER=CMAT,
           CARA_ELEM=CE,
           GROUP_MA_BETON='VOLTOT',
           TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',),
           TENSION_INIT=3.75E6,
           RECUL_ANCRAGE=0.001,
           DEFI_CABLE= (
                  _F(GROUP_MA='CAB1',
                      GROUP_NO_ANCRAGE=('PC1D','PC1F',)),
                  _F(GROUP_MA='CAB2',
                      GROUP_NO_ANCRAGE=('PC2D','PC2F')))

CAB_BP34=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO,
           CHAM_MATER=CMAT,
           CARA_ELEM=CE,
           GROUP_MA_BETON='VOLTOT',
           TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',),
           TENSION_INIT=3.75E6,
           RECUL_ANCRAGE=0.001,
           DEFI_CABLE=(
                 _F(GROUP_MA='CAB3',
                    GROUP_NO_ANCRAGE=('PC3D','PC3F',)),
                 _F(GROUP_MA='CAB4',
                    GROUP_NO_ANCRAGE=('PC4D','PC4F',)))

CAB_BP5=DEFI_CABLE_BP(MODELE=MO,
           CHAM_MATER=CMAT,
           CARA_ELEM=CE,
           GROUP_MA_BETON='VOLTOT',
           TYPE_ANCRAGE=('ACTIF','PASSIF',),
           TENSION_INIT=3.75E6,
           RECUL_ANCRAGE=0.001,
           DEFI_CABLE=_F(GROUP_MA='CAB5',
                      GROUP_NO_ANCRAGE=('PC5D','PC5F',)))


CLIM =AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                     DDL_IMPO =...,
                     PESANTEUR =... )

CMCAB12=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                  RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP12,
                                  SIGM_BPEL='NON',
                                  RELA_CINE='OUI',),)

CMCAB23=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                  RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP23,
                                   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',),);
```

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.

Définition des modèles (3D pour le béton, BARRE pour les câbles)

Caractéristiques géométriques (section) des éléments barres

Création et affectation des caractéristiques matériaux pour le câble et le béton :
Béton : élastique + données réglementaires BPEL par défaut
Acier : élastique +données réglementaires BPEL +

Définition des 5 câbles de précontrainte

Il est possible de regrouper dans un même : DEFI_CABLE_BP les câbles 1 et 2 d'une part, et les câbles 3 et 4 d'autres part, puisqu'ils ont les mêmes caractéristiques et sont mis en tension simultanément. Et dans le cas où tous les câbles sont tendus simultanément (scénario 2 et 3), on pourrait regrouper tous les câbles.

Création des chargements :

les conditions aux limites et la pesanteur

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)

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

```
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.),)
```

Les chargements postérieurs à la mise en tension des câbles (ici une pression)

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

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',
                                      GROUP_MA='VOLTOT',),
                                  _F(RELATION = 'SANS',
                                    GROUP_MA= ('CABLE'),),),
                     EXCIT =(_F(CHARGE = CLIM,),
                             _F(CHARGE = CMCAB12),
                             _F(CHARGE = CMCAB34),
                             _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','CABLE')),
                     EXCIT=(_F(CHARGE = CLIM,),),
                     CABLE_BP=(CAB_BP12),
                     CABLE_BP_INACTIF =
                           (CAB_BP34,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','CABLE')),
                     EXCIT   =(_F(CHARGE = CLIM,),
                               _F(CHARGE = CMCAB12,)),
                     CABLE_BP   =( CAB_BP34 ),
                     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 = CMCAB12,),
                                _F(CHARGE = CMCAB34,)),
                      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).

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

```
# 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',’CABLE)),
                      EXCIT   =(_F(CHARGE = CLIM,),
                                _F(CHARGE = CMCAB12,),
                                _F(CHARGE = CMCAB34,),
                                _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`).

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

Scénario 2

```
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',’CABLE)),
                     CABLE_BP = (CAB_BP12,CAB_BP34,CAB_BP5),
                     EXCIT   =_F(CHARGE = CLIM,),
                     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',’CABLE)),
                      EXCIT   =(_F(CHARGE = CLIM,),
                                _F(CHARGE = CMCAB12,),
                                _F(CHARGE = CMCAB34,),
                                _F(CHARGE = CMCAB5,),
                                _F(CHARGE = PRES,
                                   FONC_MULT = FCT,)),
                      INCREMENT=_F(LIST_INST = LINST,
                                   INST_FIN = 1000.),)
```

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

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.

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

Scénario 3

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

CMCAB12B=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                  RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP12,
                                  SIGM_BPEL='OUI',
                                  RELA_CINE='OUI',),)

CMCAB34B=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                  RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP3,
                                   SIGM_BPEL='OUI',
                                   RELA_CINE='OUI',),)

CMCAB5B=AFFE_CHAR_MECA(MODELE=MO,
                  RELA_CINE_BP=_F(CABLE_BP=CAB_BP5,
                                  SIGM_BPEL='OUI',
                                  RELA_CINE='OUI',),);
```

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 `CMCABi` définis initialement).

```
# 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','CABLE')),
                     EXCIT   =(_F(CHARGE = CLIM,),
                               _F(CHARGE = CMCAB12B),
                               _F(CHARGE = CMCAB34B),
                               _F(CHARGE = CMCAB5B),),
                    INCREMENT=_F(LIST_INST = LINST,
                    INST_FIN = 600.),)
```

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

```
# 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','CABLE')),
                      EXCIT   =(_F(CHARGE = CLIM,),
                                _F(CHARGE = CMCAB12,),
                                _F(CHARGE = CMCAB34,),
                                _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, c'est bien les `CMCABi` car on souhaite juste maintenir les liaisons cinématiques (sinon, on ajoute une nouvelle fois la tension dans les câbles)

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