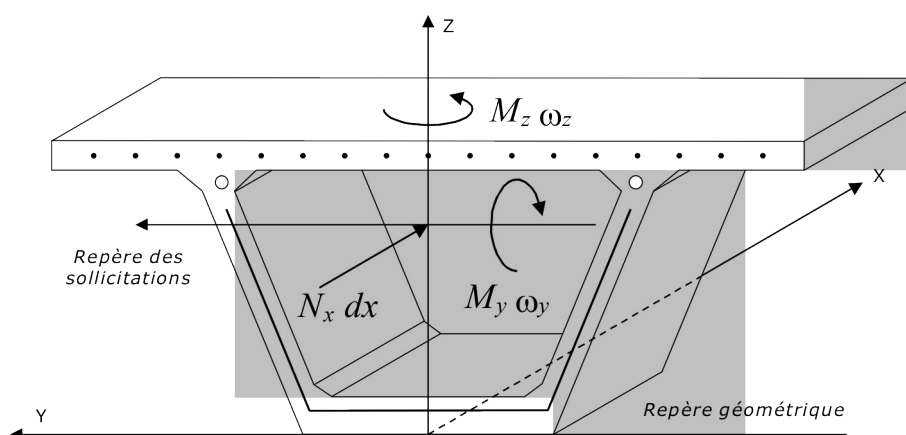


CDS 7.02 – version fichier de commandes

Mai 2025



CDS 7.02

Calcul de Sections

Version : Fichier de commandes

Collection les outils



Document édité par le Céréma dans la collection « les outils ».
Cette collection regroupe les guides, logiciels, supports
pédagogique, catalogue, données documentaires et annuaires.

Ont participé à la réalisation du logiciel CDS

Jean GUAL
Nicolas VIGNEAUD
Pierre PERRIN
Angel-Luis MILLAN
Pierre PEYRAC

L'application est désignée sous le sigle "CDS" pour Calcul de Sections. Ce nom et ce sigle ont été déposés à l'Institut National de la Propriété industrielle dans les classes suivantes :

9 : logiciels (programmes enregistrés)
42 : programmation pour ordinateur.

Toute représentation ou reproduction, intégrale ou partielle de cette documentation et/ou du logiciel, faite sans le consentement du Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire est illicite (loi du 11 mars 1957, alinéa 1er de l'article 40).

SOMMAIRE

	1
Chapitre I - Installation et prise en main	10
I.1 - Installation	10
I.2 - Prise en main	11
Chapitre II - Conventions simplifiées	12
II.1 - Présentation des commandes	12
II.2 - Format des commandes	12
II.3 - Unités et signes	13
Chapitre III - Commandes générales	14
III.1 - Commande CDS	14
III.2 - Commande TITRE	14
III.3 - Commande OPTION	15
Chapitre IV - Commandes Matériaux (simplifiés)	16
IV.1 - Commande MATERIAU BETON	16
IV.2 - Commande MATERIAU ACIER	18
IV.3 - Commande MATERIAU PRECONTRAINT	20
IV.4 - Commande MATERIAU CHARPENTE	21
IV.5 - Commande EDITER	22
Chapitre V - Commandes Section	23
V.1 - Commande SECTION	23
V.2 - Sous-Commande CONTOUR type	25
V.3 - Sous-Commande CONTOUR quelconque	31
V.4 - Sous-Commande EVIDEMENT	34
V.5 - Sous-Commande CHARPENTE	36
V.6 - Sous-Commande GAINÉ	38
V.7 - Sous-Commande PRECONTRAINT	40
V.8 - Sous-Commande FERRAILLAGE explicite	42
V.9 - Sous-Commande FERRAILLAGE automatique	44
V.10 - Sous-Commande LITS	47
V.11 - Sous-Commande POINTS	48
V.12 - Commande EDITER SECTION	51
Chapitre VI - Commandes de Calcul	52
VI.1 - Commande SOLlicitations - Béton armé/Charpente	53
VI.2 - Commande SOLlicitations - béton précontraint	57
VI.3 - Commande SOLlicitations avec Phasage	61
VI.4 - Commande JUSTIFICATION	66
VI.5 - Commande DIMENSIONNEMENT	67
VI.6 - Commande INTERACTION SECTION	69
Chapitre VII - Commandes avancées	71
VII.1 - Commande MATERIAU BETON	71
VII.2 - Sous-commande SITUATION du matériau Béton	73
VII.3 - Commande MATERIAU ACIER	77
VII.4 - Sous-commande SITUATION du matériau ACIER	79
VII.5 - Commande MATERIAU PRECONTRAINT	83
VII.6 - Sous-commande SITUATION du matériau PRECONTRAINT	84
VII.7 - Commande MATERIAU CHARPENTE	88
VII.8 - Sous-commande SITUATION du matériau CHARPENTE	89
VII.9 - Commande MATERIAU SPECIFIQUE	92
Chapitre VIII - Commandes de Cisaillement	95
VII.10 - Notion de Morphologie des sections à contours	95
VII.11 - Sous-Commande MORPHOLOGIE	98
VII.12 - Commande CISAILLEMENT	101
Chapitre IX - Conventions	103
VIII.1 - Repère de définition	103

VIII.2 -	Repère des sollicitations	103
VIII.3 -	Sollicitations	103
VIII.4 -	Plan de déformation	104
VIII.5 -	Conventions de signe pour les résultats des calculs	104
VIII.6 -	Conventions de signe pour le dessin des lois	104
VIII.7 -	Unités employées	105
Chapitre X -	Méthodes et hypothèses de calcul sous sollicitations normales	106
IX.1 -	Flexion composée déviée en béton armé	106
IX.2 -	Sollicitations internes dues au béton	106
IX.3 -	Sollicitations internes dues aux aciers passifs	107
IX.4 -	Déformation de la section à l'équilibre	108
IX.5 -	Dimensionnement des aciers passifs	108
IX.5.1 -	Contrôle de la variation des sections d'aciers	108
IX.5.2 -	Contrôle du respect des déformations limites	109
IX.5.3 -	Matrice tangente de la section	109
IX.5.4 -	Utilisation de l'algorithme du Simplexe	109
IX.5.5 -	Critère d'arrêt	109
IX.6 -	Flexion composée déviée en béton précontraint par post-tension	110
IX.6.1 -	Présentation générale	110
IX.1.1 -	Calcul BP - Pondération de la loi	110
IX.1.2 -	Méthode du retour à l'état 0 – option INSTANTANE	111
IX.1.3 -	Méthode du retour à l'état 0 – Option IDENTIQUE	113
IX.1.4 -	Inclinaison des câbles sur la normale à la section	113
IX.7 -	Flexion composée déviée en béton précontraint par pré-tension	113
Chapitre XI -	Justification aux Eurocodes	114
X.1 -	Lois de comportement du Béton	114
X.1.1 -	Calcul ELU	114
X.1.2 -	Calcul ELS	116
X.2 -	Lois de comportement des aciers passifs	119
X.2.1 -	Calcul ELU	119
X.2.2 -	Calcul ELS	119
X.3 -	Lois de comportement des aciers de précontrainte	120
X.3.1 -	Calcul ELU	120
X.3.2 -	Calcul ELS	121
X.4 -	Adhérence des aciers	121
X.5 -	Justification du pivot 3	122
X.6 -	Justification de la zone d'enrobage de la précontrainte	122
X.7 -	Limitation simplifiée de la fissuration	122
X.8 -	Justification simplifiée à la fatigue	122
X.9 -	Justification à la rupture fragile de la précontrainte	123
Chapitre XII -	Théorie des parois minces	124
XII.1 -	Présentation	124
XII.2 -	Hypotheses générales	124
XII.3 -	Notations	124
XII.4 -	Champ de cisaillement de Torsion pure	125
XII.5 -	Effort tranchant	131
XII.6 -	Torsion Non uniforme ou gênée[2]	133
XII.7 -	Bibliographie	136
Annexe A-	Exemple de section BA	137
Annexe B-	Exemple de section BP	139
Annexe C-	Exemple de cisaillement de Caisson	142
Annexe D-	Exemple de cisaillement de Charpente	144

Description générale du logiciel

Ce programme vérifie ou dimensionne le ferrailage des sections de béton armé et/ou précontraint soumises à la flexion composée déviée dans l'hypothèse de conservation des sections planes et dans le cadre des Eurocodes. Il traite également les aciers de charpente indépendants ou les sections mixtes : Béton/Aciers de charpente. Il permet l'étude au cisaillement des sections selon la théorie des parois minces.

CDS traite les sections composées de plusieurs contours éventuellement évidés et/ou des profils de charpente.

L'utilisateur définit successivement :

- Les caractéristiques des matériaux : béton, aciers de charpente, aciers de ferrailage, aciers de précontrainte ou des matériaux particuliers relatifs à son étude,
- La classe d'exposition de chaque matériau dont seront déduites les lois des comportements des matériaux,
- La géométrie du coffrage et son découpage éventuel en fonction des classes d'exposition,
- Les câbles de précontrainte en post ou pré tension éventuels,
- Les profils des aciers de charpente,
- Le positionnement des lits de ferrailage ou les options de ferrailage automatique,
- Les efforts appliqués par situation de projet et état limite et éventuellement les tensions de câbles concomitantes.
- Un phasage éventuel des zones actives et des efforts associés.
- La morphologie d'une section à contours pour une de cisaillement en parois minces.
- Des efforts de cisaillement pour une étude de cisaillement en parois minces.

Le logiciel justifie le béton et/ou dimensionne selon les besoins les aciers de ferrailage.

Il permet en particulier de déterminer :

- Les caractéristiques mécaniques brutes, nettes et homogénéisées, les repères principaux et le centre de gravité,
- Les caractéristiques sectorielles de cisaillement de la section,
- L'état des déformations et des contraintes dans la section,
- Les courbes d'interaction des efforts appliqués,
- Les informations indispensables à l'analyse de l'intégrité des matériaux.

Les justifications conduites par le logiciel dépendent des options choisies par l'utilisateur. Par défaut, les justifications proposées sont les suivantes :

- Equilibre de la section conforme aux limites des matériaux,
- Limites des matériaux liées au calcul simplifié de la fatigue,
- Limites des matériaux liées au calcul simplifié de l'ouverture des fissures
- Justification à posteriori des zones d'enrobage,
- Justification à posteriori du pivot C.

Le fonctionnement du logiciel est piloté par un fichier de commandes qui est renseigné par l'utilisateur.

Deux niveaux de commandes sont proposés :

- Un niveau élémentaire qui convient à la plupart des études et qui s'appuie sur des valeurs par défaut couramment en usage.

- Un niveau avancé permettant de modifier les valeurs par défaut pour des études plus poussées. Ce niveau avancé permet en particulier de définir les matériaux par leurs lois de comportement.

Le logiciel CDS peut être automatiquement utilisé en post-traitement de CDS. Les commandes sont alors générées automatiquement par PCP pour une justification ou pour un dimensionnement de l'ensemble des sections de PCP.

Chapitre I - Installation et prise en main

I.1 - Installation

- r L'installation est réalisée depuis le setup : Le répertoire standard est : C:\CEREMA\CDS\6.00.
- r Des fichiers exemples sont disponibles dans le répertoire : C:\CEREMA\CDS\6.00\Exemples.
- r Pour la prise en main on trouvera un exemple de calcul Ba et un exemple de calcul Bp.
- r Pour éviter tout problème de droit on copiera le répertoire Exemples dans un répertoire non administrateur et l'on pourra lancer les calculs comme indiqué ci-dessous.
- r L'exécution classique de Cds consiste à glisser/lâcher le fichier de commandes « nom_fichier.cds » sur le raccourci de CDS. Après exécution, le fichier de sortie « nom_fichier.Html » contient la note de calcul au format « html ». Elle est créée dans le répertoire contenant le fichier CDS. Un fichier « Nom_fichier.txt » contient la note de calcul au format txt. Les différents dessins de la note de calcul sont également présents dans le répertoire Svg au format « svg ».
- r De manière générale, pour éviter tout conflit de nom on travaillera dans un répertoire dédié aux calculs Cds en plaçant les fichiers de données cds dans ce répertoire.
- r On évitera de créer un nom de fichier contenant des espaces.
- r Pour une utilisation, sous Pspad (Copyright (C) 2001-2015 Jan Fiala), une fois le freeware installé on pourra :
 - o Copier le fichier Cds.ini présent dans le répertoire d'installation de Cds dans le répertoire « syntax » de Pspad pour bénéficier de la complétion automatique des commandes via le « shortcut Ctrl J ».
 - o Copier le fichier Cds.def présent dans le répertoire d'installation de Cds dans le répertoire « context » de Pspad pour bénéficier de modèles de commandes via le « shortcut Ctrl espace ».
- r Pour bénéficier des couleurs prédéfinies de CDS et des touches d'exécution adaptées:
 1. Placer ou Remplacer **AVEC UN EDETEUR AUTRE QUE PSPAD** le contenu du fichier Pour_pspad.ini présent dans le répertoire d'installation de Cds dans le fichier C:\Users\xxxxxx\AppData\Roaming\PSpad\PSpad.ini.
 2. Ouvrir Pspad, sélectionner Options/Colorations syntaxiques personnalisées et sélectionner le fichier cds.ini.
 3. Revenir au menu principal de pspad et sélectionner ! Options de colorations syntaxiques, puis sélectionner l'onglet filtre, dans la partie gauche en bas de sélections.
 4. Affecter à une ligne <not assigned> un surlignage personnalisé situé à droite, cocher la case à coté de CDS une fois la sélection faite, sinon le langage n'est pas active dans Pspad.
 5. La coloration syntaxique doit être activée explicitement via le menu « Affichage ».
 6. Le lancement automatique de CDS est obtenu via l'option Ctrl F9 de PSPAD.
 7. L'affichage du fichier de résultats est obtenu via l'option Alt F9 de PSPAD.
 8. L'affichage de la documentation de CDS est obtenu via l'option F9 de PSPAD.
 9. Si la touche f9 ne fonctionne pas il faut vérifier que dans "Paramètres/paramétrage coloration syntaxique" du menu paramètres pour CDS et dans les onglets "Applications externes" et "Compilateur" le bon chemin de CDS est spécifié.

I.2 - Prise en main

Pour la prise en main on trouvera un exemple de calcul Ba, un exemple de calcul Bp et un exemple de section mixte dans le répertoire d'installation : Exemples. On trouvera un exemple de phasage transversal en béton armé et un en béton précontraint. Pour éviter tout problème de droit on copiera le répertoire Exemples dans un répertoire non administrateur et l'on pourra lancer les calculs comme indiqué ci-dessus.

Chapitre II - Conventions simplifiées

II.1 - Présentation des commandes

Les paramètres de chaque commande sont présentés de la manière suivante :

- r Le caractère '/' indique un choix.
- r () : indique un choix obligatoire de termes exclusifs dans une liste.
- r *() : indique un choix ou plusieurs choix de termes dans une liste sans répétition.
- r **() : indique un choix ou plusieurs choix de termes dans une liste avec répétition éventuelle.
- r La paire de crochets [] indique un terme optionnel.
- r (A /B /C /D /E) : Les options/paramètres A B C D et E sont exclusifs entre eux. L'ordre est quelconque. S'ils sont entre crochets ils sont optionnels.
- r *(A /B /C /D /E) : Les options/paramètres A B C D et E sont obligatoires et ne sont pas exclusifs entre eux et peuvent être combinés sans répétition. L'ordre est quelconque.
- r **(A /B /C /D /E) : Les options/paramètres A B C D et E sont obligatoires et ne sont pas exclusifs entre eux et peuvent être combinés avec répétition. L'ordre est quelconque.
- r [A] : A est optionnel.
- r ([A] / [B] / [C] / [D] / E) : A B C et D sont optionnels.
- r [(A /B /C /D /E)] : la liste est optionnelle.
- r Les options par défaut sont indiquées par des mots clefs soulignés.
- r La casse des mot clefs est indifférente et le mélange des casses dans un même mot est tolérée. Néanmoins pour des considérations de lisibilité on écrira les mots-clefs avec des majuscules et les noms liés au projet avec des minuscules.

Exemples

OPTION (PONDERATION_LOI/RETOUR_ETAT_0) peut s'écrire :

OPTION PONDERATION_LOI ou OPTION RETOUR_ETAT_0

SYMETRIE (Y/Z/YZ) peut s'écrire :

SYMETRIE Y ou SYMETRIE Z ou SYMETRIE YZ

**(CONTOUR --- FIN_CONTOUR) peut s'écrire :

CONTOUR -----FIN_CONTOUR

CONTOUR -----FIN_CONTOUR

CONTOUR -----FIN_CONTOUR

II.2 - Format des commandes

- r Les commandes sont introduites au format libre dans une limite de 200 caractères.
- r Les commentaires sont précédés du caractère # .
- r Les caractères spéciaux autres que lettres, chiffres, souligné et apostrophes simples ou doubles sont interdits dans les noms et dans les titres.
- r En particulier, sont interdits : les accents, les point-virgule, deux-points, etc.

- r Toutes les commandes sont optionnelles mais toute référence à une entité doit être précédée par la définition de l'entité.
- r Les mots clefs sont décodés sur quatre caractères mais il est conseillé d'utiliser la complétion automatique de l'éditeur : « Ctrl+espace » pour faciliter la lecture.
- r Les valeurs numériques peuvent être introduites sous forme d'expressions entre parenthèses (Cf. PCP ou ST1).

II.3 - Unités et signes

- r Longueur en mètre sauf pour les épaisseurs de profils, diamètres, enrobages, aires et ouvertures des fissures qui sont en mm ou mm².
- r Les forces sont exprimées en Méga-Newtons.
- r Les contraintes sont en Méga-Pascals.
- r L'effort normal N est positif s'il s'agit d'une compression.
- r Le moment de flexion M_y est positif s'il comprime les fibres situées du côté des z positifs.
- r Le moment de flexion M_z est positif s'il comprime les fibres situées du côté des y négatifs.
- r La déformation membranaire unitaire est négative pour un allongement.
- r La rotation unitaire Ω_y est positive pour une flexion simple et un moment M_y positif.
- r La rotation unitaire Ω_z est positive pour une flexion simple et un moment M_z positif.

Chapitre III - Commandes générales

III.1 - Commande CDS

CDS

FIN_CDS

Paramètres

- r Pas de paramètres.

Fonctions

Cette commande débute et termine un calcul CDS.

Conditions d'emploi

- r Doit figurer au début du fichier de commandes et à la fin.

III.2 - Commande TITRE

Libellé

TITRE 'libellé du titre'

Paramètres

- r Le libellé du titre.

Fonctions

Cette commande optionnelle permet de structurer la note de calcul en différentes parties. Elle est utile si l'on réalise de nombreux calculs de section au sein d'un même fichier de commandes.

Conditions d'emploi

- r Cette commande peut être répétée plusieurs fois dans le fichier de commandes.

Exemple

CDS

Titre 'exemple de titre'

FIN_CDS

III.3 - Commande OPTION

Libellé

OPTION (PONDERATION_LOI/RETOUR_ETAT_0 [IDENTIQUE/INSTANTANE])

Paramètres

- r PONDERATION_LOI : la méthode de calcul des sections précontraintes est la méthode de pondération de la loi. C'est l'option par défaut.
- r RETOUR_ETAT_0 : la méthode de calcul des sections précontraintes est la méthode du retour à l'état 0. Avec l'option INSTANTANE le retour à l'état 0 et le chargement final sont réalisés avec le module INSTANTANE du béton que l'on soit en SITUATION EXPLOTATION SERVICE ou EXPLOITATION INFINIE. Avec l'option IDENTIQUE on utilise la même loi pour le retour et le chargement final que la loi utilisée pour le chargement permanent. C'est l'option par défaut de CDS.

Fonctions

Cette commande indique l'option de calcul des sections précontraintes. Ces options sont présentées dans le chapitre: Méthodes de calcul.

Conditions d'emploi

- r Cette commande doit précéder les commandes de calcul.

Exemple

```
CDS
OPTION RETOUR_ETAT_0
-----
FIN_CDS
```

Chapitre IV - Commandes Matériaux (simplifiés)

Ces commandes présentées ici sont une version simplifiée des commandes complètes présentées dans un chapitre suivant. Elles permettent de traiter 80% des cas rencontrés usuellement.

IV.1 - Commande MATERIAU BETON

Libellé

MATERIAU

BETON nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

FCK fck

PRECONTRAIN (OUI/NON)

Optionnels

[HUMIDITE_RELATIVE hum]

[RAYON_MOYEN rm]

[SECTION NORMALE/PIEU/CAISSON]

[FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE (COMPRESSION/TRACTION/TOUS)
OUI/NON]

[TYPE NORMAL/AVEC_FUMEE_DE_SILICE/SANS_FUMEE_DE_SILICE]

[CIMENT N/R/S]

[EXPOSITION (X0/XD1/2/3 XC1/2/3/4/ XS1/2)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fck : résistance caractéristique du béton en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.
- r hum : Humidité relative de l'air en pourcentage (70 par défaut).
- r rm : Rayon moyen de la section en mètres (0.25 par défaut).

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type béton. Les valeurs hum et rm permettent de déterminer la loi de comportement au temps infini utilisé pour l'équilibre de la section. Il en va de même pour la fumée de silice et la classe de Ciment.

Le critère de FATIGUE SIMPLIFIEE consiste à limiter la compression du béton à $0.6 f_{ck}$ en caractéristique et la traction du béton précontraint à zéro en fréquent. Si l'on sélectionne NON en COMPRESSION ou en

TRACTION l'autre option reste à OUI par défaut. Si l'on sélectionne OUI en COMPRESSION ou en TRACTION l'autre option bascule à NON.

La classe d'EXPOSITION est utilisée pour appliquer les règles de limitation des contraintes conformément au tableau 7.101NF de l'annexe Française et à l'article EC-2 7.2(102) de l'EC2-2. La classe d'EXPOSITION est en particulier utilisée pour prendre en compte la limitation de la fissuration dans les zones d'enrobage de la précontrainte et limiter la contrainte de compression dans le béton aux ELS caractéristiques (cf. EC-2 7.2(102) et paragraphe VIII.2). La classe d'exposition à considérer pour le matériau est la classe d'EXPOSITION de la situation de projet EN EXPLOITATION. La classe XF n'est pas disponible ici car elle n'est pas pertinente pour la limitation de la fissuration.

Le TYPE de section intervient dans les limitations relatives aux contraintes et déformations. Pour une section du type PIEU, la limitation concerne la contrainte de compression comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Pour la section du type caisson le pivot B est ramené au pivot C : la valeur de ϵ_{c3} est fixée égale à ϵ_{c2} conformément à l'EC2 pour lequel les hourdis doivent être soumis au pivot C.

Les valeurs par défaut des paramètres relatifs aux bétons sont indiquées dans la version avancée de cette commande et peuvent être surchargées par l'utilisateur (Cf. paragraphes VIII.1 et VIII.2).

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Si la section est soumise à une exposition différente selon la zone considérée, l'utilisateur devra définir plusieurs matériaux et les affecter à des contours différents de la section correspondant chacun à une exposition différente.
- r Si des efforts en situation de projet EN CONSTRUCTION sont envisagés et que la classe d'EXPOSITION pour celle-ci est moins sévère que celle en EXPLOITATION, elle peut être prise en compte en modifiant directement, les paramètres avancés relatifs à la zone d'enrobage dans la version avancée de la sous commande SITUATION EN CONSTRUCTION (Cf. paragraphes VIII.1 et VIII.2) : COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT ENROBAGE_TRAC et COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT ENROBAGE_TRAC.

Exemple

CDS

MATERIAU BETON1 B_40 FCK 40 TITRE "béton Fck 40 " FIN_MATERIAU

MATERIAU BETON2 B_50 FCK 50 TITRE "béton Fck 50 "

PRECONTRAINTE OUI

HUMIDITE_RELATIVE 50

SECTION CAISSON

CIMENT R

EXPOSITION XC3

TYPE AVEC_FUMEE_DE_SILICE

FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE TOUS OUI

FIN_MATERIAU

FIN_CDS

IV.2 - Commande MATERIAU ACIER

Libellé

MATERIAU

ACIER nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

FYK fyk

[TYPE T_A/T_B/T_C]

[SECTION NORMALE/PIEU/CAISSON]

[CONFINE OUI/NON]

[FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI/NON]

[FISSURATION_CRITERE_SIMPLIFIE (BA/BP) OUI/NON]

[EXPOSITION (X0/XD1/2/3 XC1/2/3/4/ XS1/2 XF1/2/3/4)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fyk : résistance caractéristique de l'acier en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type acier.

Un Acier CONFINE est pris en compte en compression alors que ce n'est pas le cas s'il est non CONFINE. Par défaut, les aciers sont NON CONFINE, donc on ne prend pas en compte leur raideur en compression. Pour passer à CONFINER OUI, et tenir compte de la raideur en compression des aciers, ce qui réduit les contraintes de compression dans le béton adjacent, il faut satisfaire les dispositions constructives de l'article A4.1,2 du BAEL « Les armatures longitudinales ne sont prises en compte dans les calculs de résistance que si elles sont entourées tous les 15 diamètres au plus par des armatures transversales ... », repris dans l'Eurocode 2, dans les autres dispositions constructives pour les armatures longitudinales, EN1992-1-1 9.2.1.2(3) « Il convient de maintenir toute armature longitudinale comprimée (de diamètre phi) prise en compte dans le calcul de résistance au moyen d'armatures transversales espacées au plus de 15 phi ».

Le critère de FATIGUE SIMPLIFIEE consiste à limiter la traction des aciers à 300 Mpa en ELS caractéristique. En choisissant NON, aucun critère de fatigue n'est appliqué aux aciers.

Le critère de FISSURATION SIMPLIFIEE consiste à limiter la contrainte dans les aciers à 1000w avec w ouverture maximum des fissures déterminée en fonction de la classe d'exposition et de l'option BA/BP conformément au tableau 7.101NF de l'annexe Française de l'EC2. En choisissant NON, aucun critère de fissuration n'est appliqué à la section.

La classe d'EXPOSITION est exclusivement utilisée pour limiter la contrainte de traction selon le critère de fissuration simplifiée. L'utilisateur définira autant d'aciers passifs que de classes d'exposition auxquelles est soumise la section. La classe d'exposition à considérer est la classe d'exposition de la situation de projet EN EXPLOITATION.

Le TYPE d'acier intervient dans la détermination du coefficient k et de ε_{uk} après plastification. Ce sont les valeurs par défaut de l'annexe C de l'EC2 qui sont prises par défaut pour ces valeurs.

Le type de SECTION intervient dans les limites de traction aux ELS.

L'utilisateur a la possibilité de surcharger les valeurs par défaut en utilisant les paramètres définis dans le chapitre Commande Avancées (cf. paragraphes VIII.3 et VIII.4).

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Le cas du tirant pour lequel la valeur du coefficient 1000 est ramenée à 600 conformément à la note 7.3.3 (101) de l'annexe nationale doit être traité en modifiant directement le facteur correspondant dans la version avancée de cette commande COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION et COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION (cf. paragraphes VIII.3 et VIII.4).
- r Si des efforts en situation de projet EN CONSTRUCTION sont envisagés et que la classe d'exposition pour celle-ci est moins sévère que celle en EXPLOITATION, elle peut être prise en compte en modifiant directement, la valeur w dans la version avancée de la sous-commande SITUATION EN_CONSTRUCTION (cf. paragraphes VIII.3 et VIII.4).
- r Si la section comporte uniquement des câbles de précontrainte en pré-tension et aucun acier passif, la vérification de la limitation de la fissuration de la section - conformément à la note 7.3.3 (101) de l'annexe nationale - incombe alors à l'utilisateur par un contrôle visuel de la surtension dans la note de calcul.

Exemple

CDS

```

MATERIAU ACIER acier_passif_500
  TITRE "acier passif Fyk 500 "
  FYK 500
  TYPE T_C
  CONFINE NON
  FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI
  FISSURATION_CRITERE_SIMPLIFIE BA OUI
  EXPOSITION XC1
FIN_MATERIAU
-----
FIN_CDS
  
```

IV.3 - Commande MATERIAU PRECONTRAINTE

Libellé

MATERIAU

PRECONTRAINTE nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

FP01K fp01k

FPK fpk

[TYPE (TORON/FIL/BARRE)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fp01k : Limite élastique conventionnelle en Mpa.
- r fpk : résistance caractéristique de l'acier de précontrainte en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type acier de précontrainte avec toutes les options prises par défaut.

L'utilisateur a la possibilité de surcharger les valeurs par défaut en utilisant les paramètres définis dans le chapitre Commande Avancées : Matériau Précontrainte.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```
CDS
MATERIAU Precontrainte  acier_precontrainte_
  TITRE "acier de precontrainte Fp01k 1500 "
FP01K 1640
FPK   1860
FIN_MATERIAU
-----
FIN_CDS
```

IV.4 - Commande MATERIAU CHARPENTE

Libellé

MATERIAU

CHARPENTE nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

FY fy

FU fu

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fy : limite élastique de l'acier en Mpa.
- r fu : limite de rupture de l'acier en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type Acier de charpente.

L'utilisateur a la possibilité de surcharger les valeurs par défaut en utilisant les paramètres définis dans le chapitre Commande Avancées : Matériau Charpente. Les coefficients pris par défaut correspondent aux classes de vérification I et II des aciers de charpente. L'utilisateur doit donc vérifier que le voilement de la section ne fait pas basculer la justification de la section en classe III ou IV.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```
CDS
MATERIAU CHARPENTE ac_charpente_355
  TITRE "acier de charpente S355 N/NL "
  FY 355
  FU 490
FIN_MATERIAU
-----
FIN_CDS
```

IV.5 - Commande EDITER

Libellé

EDITER MATERIAU (nom_materiau / TOUS)

Paramètres

nom_materiau : nom du matériau à éditer.

Fonctions

Cette commande édite dans la note de calcul les données d'un matériau ou de tous les matériaux définis.

Conditions d'emploi

- r Au moins un matériau doit être défini.

Chapitre V - Commandes Section

V.1 - Commande SECTION

Libellé

SECTION nom_section

TITRE "titre de la section "

[SYMETRIE (Y/Z/YZ)]

**(CHARPENTE--- FIN_CHARPENTE)

**(CONTOUR

Définition du contour

[(

CONTOUR --- FIN_CONTOUR/

CHARPENTE --- FIN_CHARPENTE/

FERRAILLAGE --- FIN_FERRAILLAGE/

GAINE

**(PRECONTRAINTES --- FIN_PRECONTRAINTES)

FIN_GAINE/

PRECONTRAINTES --- FIN_PRECONTRAINTES/

EVIDEMENT --- FIN_EVIDEMENT

)]

FIN_CONTOUR)

FIN_SECTION

Paramètres

- r nom_section : nom de la section.
- r " titre de la section " : titre affecté à la section.
- r Y,Z,YZ : Axes de symétrie. Par défaut : Aucune symétrie.
- r Définition des contours, charpentes, gaines et précontrainte : voir sous commandes ci-après.

Fonctions

Cette commande définit une section. Une section peut être constituée d'un ou plusieurs contours ou de charpentes. Chaque contour peut lui-même être constituée de contours, de charpentes, de gaines de précontrainte, de ferrillages et d'évidements. Les axes de symétrie s'appliquent à toutes les entités de la section : contours, évidements, ferrillage gaine et précontrainte sous réserve que ces zones soient déclarées PARTIELLES.

Lors de l'édition des caractéristiques de la section (Cf EDITER SECTIONS), les caractéristiques brutes, nettes et homogénéisées sont éditées :

- r Les caractéristiques brutes donnent les caractéristiques du coffrage sans déduire les gaines et sans prendre en compte le ferrillage et les câbles.
- r En section nette, les diamètres de gaine sont déduits.
- r En section homogénéisée les aciers passifs sont pris en compte dans les caractéristiques de la section avec un coefficient d'équivalence égal à 15.
- r En présence de charpentes, les caractéristiques brutes de la charpente viennent s'ajouter aux autres caractéristiques brutes. Les caractéristiques homogénéisées sont prises en compte avec un coefficient d'équivalence égal à 15.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section ne doit pas être défini préalablement dans le fichier CDS.
- r Une section dont le contour est typé ne peut pas être déclarée avec une SYMETRIE.
- r Une inclusion syntaxique d'un contour ou d'une charpente dans un contour doit correspondre à une inclusion géométrique (vérifié par CDS).
- r Une inclusion géométrique d'un contour ou d'une charpente dans une autre contour doit correspondre à une inclusion syntaxique (non vérifié par CDS) car sinon la zone incluse est comptée deux fois.
- r Le découpage d'une SECTION en contours doit être conduit en fonction des matériaux de chaque contour mais également des classes d'exposition de la section. Ainsi, si une section constituée d'un seul matériau est soumise à plusieurs classes d'exposition alors, il faudra découper la section en autant de contours que nécessaire de façon à disposer les contours dans la section conformément à leur exposition : Extrados versus Intrados par exemple.

V.2 - Sous-Commande CONTOUR type

Libellé

CONTOUR nom_contour

TITRE "titre contour "

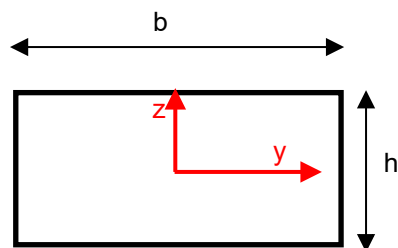
MATERIAU nom_materiau

paramètres non optionnels exclusifs

(RECTANGULAIRE

HAUTEUR h LARGEUR b

FIN_RECTANGULAIRE/



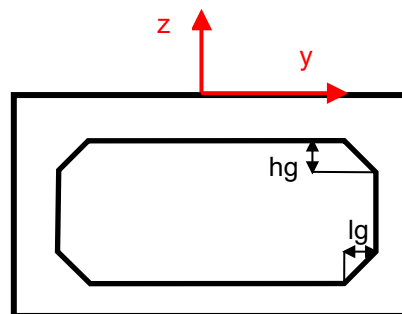
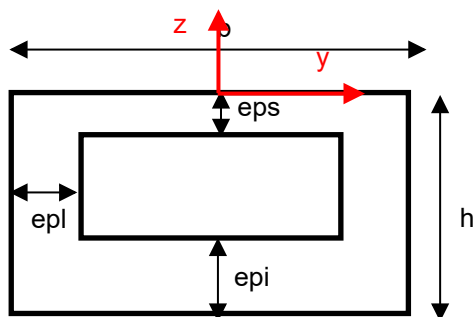
REC_EVIDE

HAUTEUR h LARGEUR b

EP_EXTRADOS eps EP_INTRADOS epi EP_LATERALE epl

[H_GOUSSET hg L_GOUSSET lg]

FIN_REC_EVIDE/

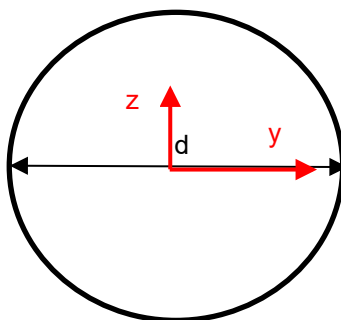


CIRCULAIRE

DIAMETRE d

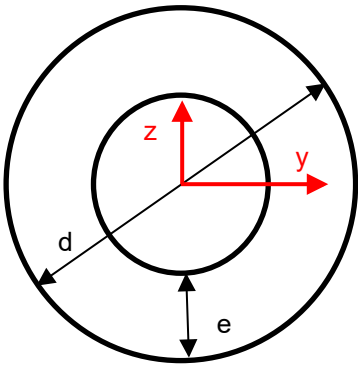
[NOMBRE n]

FIN_CIRCULAIRE/



TUBE

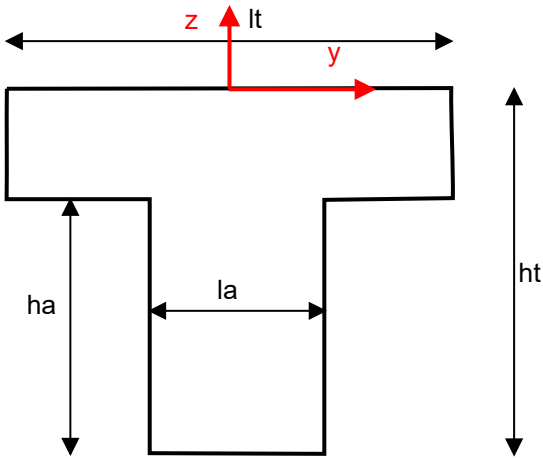
DIAMETRE d
[NOMBRE n]
EPAISSEUR e



FIN_TUBE/

TE

H_TOTALE ht L_TOTALE lt
H_AME ha L_AME la

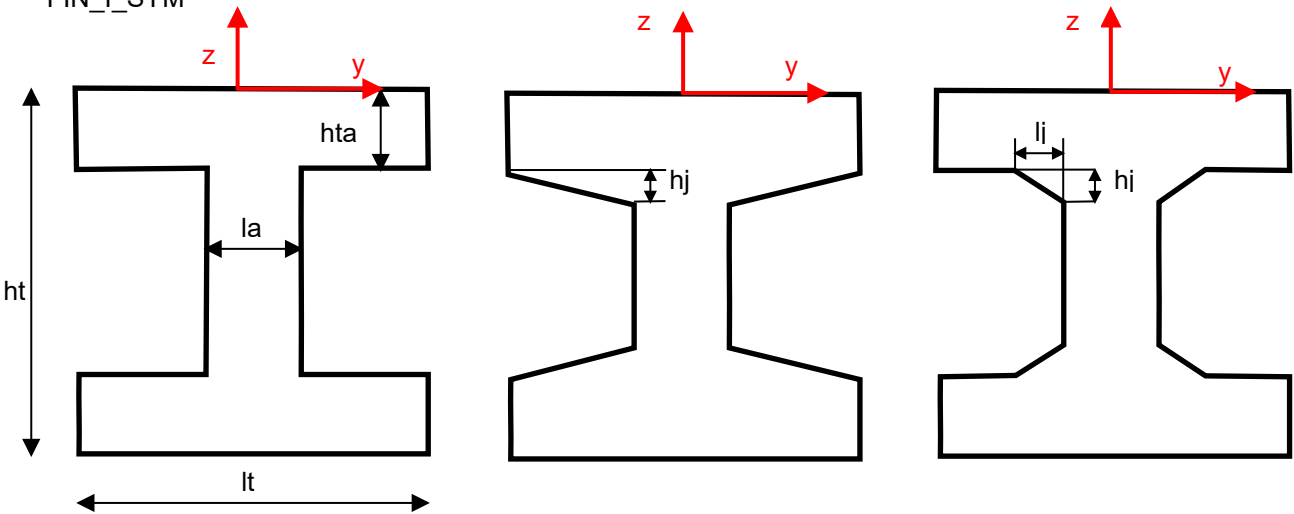


FIN_TE/

I_SYMETRIQUE

H_TOTALE ht L_TOTALE lt
H_TABLE hta L_AME la
[H_JOUE hj [L_JOUE lj]]

FIN_I_SYM



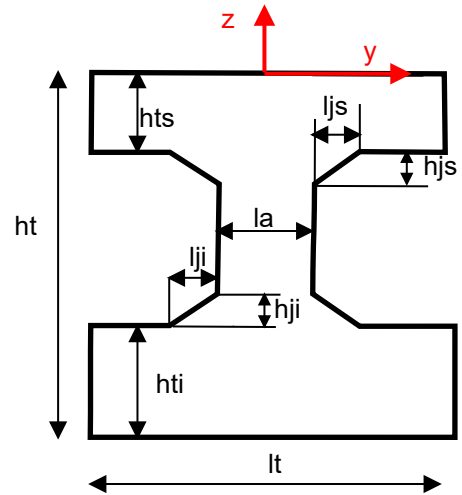
I_NON_SYMETRIQUE

H_TOTALE ht L_AME la

LT_SUP lts LT_INF lti HT_SUP has HT_INF hai

[HJ_SUP hjs HJ_INF hji [LJ_SUP ljs LJ_INF lji]]

FIN_I_NON_SYMETRIQUE/



TE_ENCORBELLEMENT

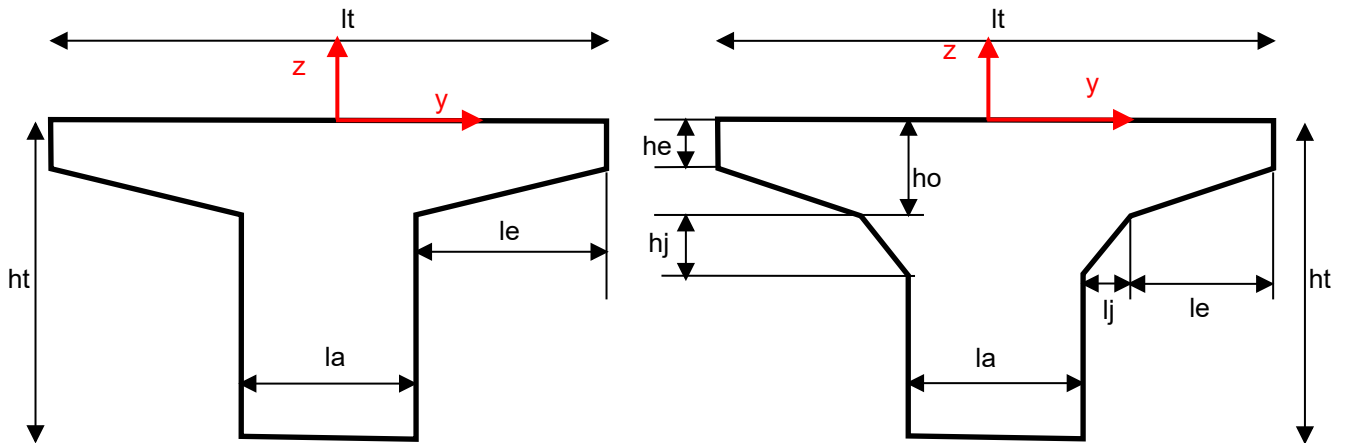
H_TOTALE ht L_TOTALE lt

H_EXTREMITÉ_ENCORBELLEMENT he

H_ORIGINE_ENCORBELLEMENT ho

L_ENCORBELLEMENT le [H_JOUE hj L_JOUE lj]

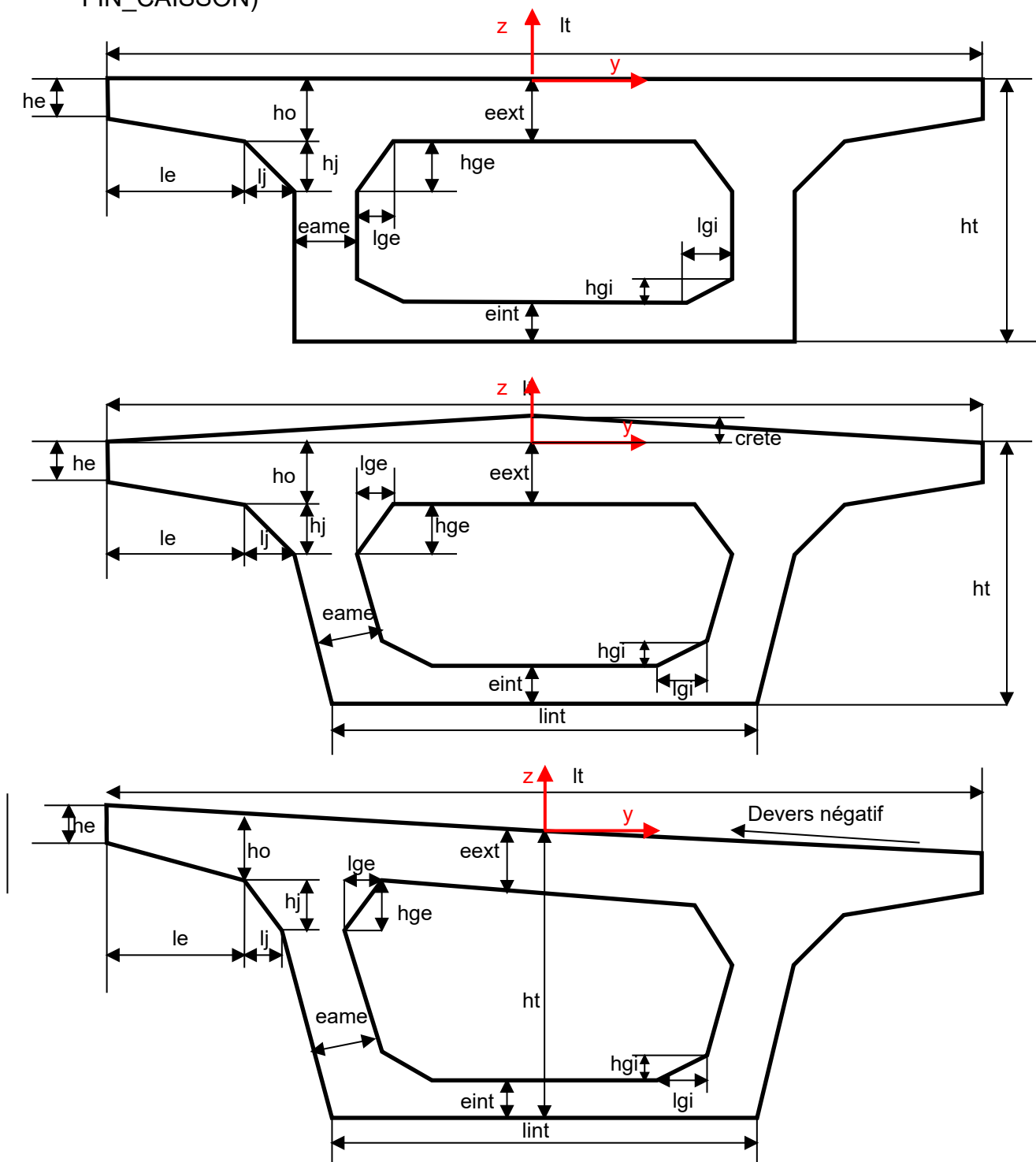
FIN_TE_ENCORBELLEMENT/



CAISSON

H_TOTALE ht L_TOTALE lt H_EXTREMITÉ_ENCORBELLEMENT he
H_ORIGINE_ENCORBELLEMENT ho L_ENCORBELLEMENT le
E_EXTRADOS eext E_INTRADOS eint E_AME eame [L_INTRADOS lint]
[CRETE crete] [DEVERS devers] [L_GI lgi H_GI hgi] [L_GE lge H_GE hge]
[H_JOUE hj L_JOUE lj]

FIN_CAISSON)



paramètres optionnels

```
[**(
  CONTOUR ---- FIN_CONTOUR/
  CHARPENTE ---- FIN_CHARPENTE/
  GAINÉ ---- FIN_GAINÉ/
  FERRAILLAGE ---- FIN_FERRAILLAGE/
  PRECONTRAINTÉ ---- FIN_PRECONTRAINTÉ
)]
```

FIN_CONTOUR

Paramètres

- r nom_contour : nom affecté au contour.
- r "titre du contour" : titre affecté au contour.
- r nom_materiau : Nom du matériau constitutif préalablement défini.
- r h : Hauteur de la section rectangulaire.
- r b : Largeur de la section rectangulaire.
- r d : Diamètre de la section circulaire.
- r e : Epaisseur du tube.
- r eps, epi, epl : épaisseurs supérieures, inférieures et latérales.
- r ha : Hauteur de l'âme de la section en té.
- r la : Largeur de l'âme de la section en té.
- r ht : Hauteur totale de la section.
- r lt : Largeur totale de la section.
- r he : Hauteur extrémité encorbellement.
- r ho : Hauteur origine encorbellement.
- r le : Largeur encorbellement.
- r hj : Hauteur joue.
- r lj : Largeur joue.
- r hta : Hauteur table.
- r la : Largeur âme.
- r hjs,hji : Hauteurs joues supérieure et inférieure.
- r ljs,lji : Largeurs joues supérieure et inférieure.
- r hts,hti : hauteurs tables supérieure et inférieure.
- r Eint : Epaisseur intrados.
- r Eext : Epaisseur extrados.
- r Eame : Epaisseur âmes.

- r Lint : Largeur totale intrados.
- r Lgi, Lge : largeurs goussets intrados et extrados.
- r Hgi, Hge : Hauteurs goussets intrados et extrados.
- r Crete : valeur de la crête au dessus de l'intrados.
- r Devers : valeur du devers en pourcentage (positif si y positif soulevé).
- r n : Nombre de points de définition du contour. Par défaut, n = 25.

Fonctions

Cette commande définit un contour typé. Le contour peut être RECTANGULAIRE, CIRCULAIRE, un TUBE, en I, en TE, en ENCORBELLEMENT ou un CAISSON. Le repère choisi par CDS est le CDG pour les contours rectangulaires et circulaires et le point central de l'extrados dans les autres cas, crête non comprise pour le caisson. En cas de dévers, seuls les point du hourdis du caisson sont modifiés en cote z. Le contour peut contenir des gaines, des câbles ou des aciers passifs.

Le contour peut contenir des charpentes, des évidements, des gaines, des câbles ou des aciers passifs. Il peut également être constitué de contours qui constituent alors des sous contours dont les matériaux diffèrent du contour initial.

Conditions d'emploi

- r Le nom du contour ne doit pas être déjà utilisé dans la section.
- r Le matériau affecté doit être préalablement défini.
- r Si un contour ou une charpente est syntaxiquement inclus dans un autre contour, son emprise est déduite du contour concerné.
- r Si un contour ou une charpente est inclus géométriquement dans un autre contour mais non syntaxiquement, son emprise n'est pas déduite du contour concerné.
- r Tous les points d'un contour inclus dans un autre contour doivent être géométriquement inclus dans le contour concerné.

Exemple

```
CONTOUR Contour_circulaire
  TITRE "contour circulaire de diametre 0.50"
  CIRCULAIRE DIAMETRE 0.50 FIN_CIRCULAIRE
  MATERIAU be40
  -----
FIN_CONTOUR
```

V.3 - Sous-Commande CONTOUR quelconque

Libellé

CONTOUR nom_contour [PARTIEL]

TITRE "titre contour "

MATERIAU nom_materiau

paramètres non optionnels

POINTS ----- FIN_POINTS

paramètres optionnels

[**(

CONTOUR ---- FIN_CONTOUR/

CHARPENTE ---- FIN_CHARPENTE/

EVIDEMENT ---- FIN_EVIDEMENT/

GAINE ---- FIN_GAINE/

FERRAILLAGE ---- FIN_FERRAILLAGE/

PRECONTRAINTTE ---- FIN_PRECONTRAINTTE

)]

FIN_CONTOUR

Paramètres

- r nom_contour : nom affecté au contour.
- r "titre du contour" : titre affecté au contour.
- r nom_materiau : Nom du matériau constitutif préalablement défini.

Fonctions

Cette commande définit un contour. Le contour est défini par des points du contour (cf. sous commande POINTS ci-dessous). Les points sont définis dans un repère choisi arbitrairement par l'utilisateur et définis dans le sens inverse des aiguilles d'une montre.

L'ordre des points est donné par sa position et non par son numéro. Le contour ne doit pas être fermé car il est complété automatiquement : le dernier point défini est relié automatiquement au premier point par CDS.

Le contour peut contenir des charpentes, des évidements, des gaines, des câbles ou des aciers passifs. Il peut également être constitué de contours qui constituent alors des sous contours dont les matériaux diffèrent du contour initial.

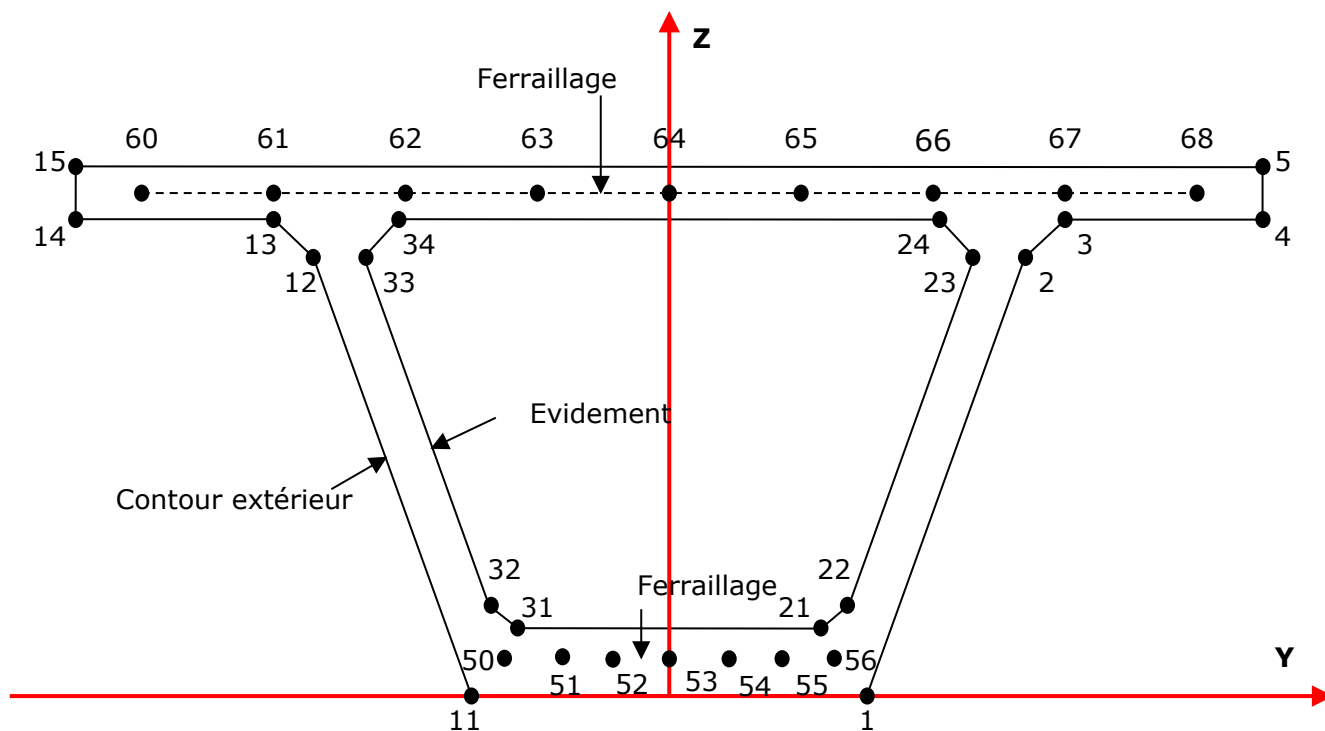


Figure 1 : Exemple de section avec un contour et un évidement

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE les contours sont définis partiellement et sont complétés automatiquement par CDS. Par défaut, tous les points du contour doivent être définis.

Conditions d'emploi

- r Le nom du contour ne doit pas être déjà utilisé dans la section.
- r Le matériau affecté doit être préalablement défini et être du type BETON, CHARPENTE ou SPECIFIQUE.
- r La numérotation des points doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.
- r La numérotation des points doit être comprise entre 1 et 9999.
- r Si un contour (ou une charpente) est inclus(e) syntaxiquement dans un autre contour, son emprise est déduite du contour concerné.
- r Si un contour (ou une charpente) est inclus(e) géométriquement dans un autre contour mais non syntaxiquement, son emprise n'est pas déduite du contour concerné.
- r Un contour (ou une charpente) doit être inclus(e) syntaxiquement dans un autre contour, si et seulement si, il (ou elle) est inclus(e) géométriquement dans ce contour.
- r Tous les points d'un contour ou d'une charpente inclus syntaxiquement dans un autre contour doivent être géométriquement inclus dans le contour concerné.
- r Le mot clef PARTIEL ne s'applique qu'aux contours d'une SECTION déclarée avec SYMETRIE. Il doit toujours être placé après le nom du CONTOUR.
- r En cas de symétrie YZ : les points sont à définir dans le quadrant YZ >0.

Exemple

```
# contour défini par points
CONTOUR Dalle
  TITRE "contour dalle défini explicitement"
  POINTS
    NUMERO 1 Y 10 Z 0.0
    NUMERO 2 Y -10 Z 0.0
    NUMERO 3 Y -10 Z -0.30
    NUMERO 4 Y 10 Z -0.30
  FIN_POINTS
  MATERIAU be40
  -----
FIN_CONTOUR
# contour dalle défini par symétrie
SYMETRIE YZ
CONTOUR dalle
  PARTIELLE
  TITRE "contour dalle symétrique"
  POINTS
    NUMERO 1 Y 10 Z 0.15
  FIN_POINTS
  MATERIAU be40
  -----
FIN_CONTOUR
# deux contours emboites
CONTOUR un RECTANGLE LARGEUR 2 HAUTEUR 1 FIN_RECTANGLE
  MATERIAU beton_1
  CONTOUR deux RECTANGLE LARGEUR 1.85 HAUTEUR 0.85 FIN_RECTANGLE
    MATERIAU beton_2
  FIN_CONTOUR
FIN_CONTOUR
```

V.4 - Sous-Commande EVIDEMENT

Libellé

```
EVIDEMENT nom_evidement [PARTIEL]
TITRE "titre evidement"
POINTS ----- FIN_POINTS
# autres paramètres optionnels
[**(PRECONTRAINTES ---- FIN_PRECONTRAINTES)]
```

FIN_EVIDEMENT

Paramètres

- r nom_evidement : nom affecté à l'évidement.
- r "titre de l'evidement" : titre affecté à l'évidement.

Fonctions

Cette commande définit un évidement. Les points de contour définissant l'évidement sont définis dans le repère de la section et dans le sens inverse des aiguilles d'une montre. L'ordre des points est donné par sa position et non par son numéro. Un évidement peut contenir un ou plusieurs câbles de précontrainte extérieurs. Ces câbles de précontrainte devront être déclarés non injectés (Non vérifié par CDS).

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE les évidements sont définis partiellement et sont complétés automatiquement par CDS. Par défaut, tous les points de l'évidement doivent être définis.

Conditions d'emploi

- r Le nom de l'évidement ne doit pas être utilisé dans toute la section pour définir une autre zone de la section.
- r La numérotation des points est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.
- r La numérotation des points doit être comprise entre 1 et 9999.
- r Les évidements ne doivent pas déborder de la zone qui les contient.
- r CDS vérifie que tous les points de l'évidement sont intérieurs au contour concerné.
- r Le mot clef PARTIEL ne s'applique qu'aux contours d'une SECTION déclarée avec SYMETRIE.
- r En cas de symétrie YZ : les points sont à définir dans le quadrant YZ >0.

Exemple

```
EVIDEMENT evi_circulaire
TITRE "Evidement circulaire de diametre 0.50"
POINTS
CERCLE
Y_CENTRE 0.00
```

```
      Z_CENTRE 0.00
      DIAMETRE 0.50
      NOMBRE 20
      NUMERO_DEBUT 100
    FIN_CERCLE
  FIN_POINTS
FIN EVIDEMENT
```

V.5 - Sous-Commande CHARPENTE

Libellé

CHARPENTE nom_charpente [PARTIEL]

TITRE "titre charpente"

[MATERIAU nom_materiau]

POINTS ----- FIN_POINTS

PROFILS

NUMERO no ORIGINE pt_ori EXTREMITE pt_ext EPAISSEUR ep [MATERIAU
nom_materiau]

FIN_PROFILS

FIN_CHARPENTE

Paramètres

- r nom_charpente : nom affecté à la charpente.
- r "titre de la charpente" : titre affecté à la charpente.
- r nom_materiau : Nom du matériau constitutif préalablement défini et/ou affecté directement aux profils.
- r no : Numéro du profil compris entre 1 et 9999.
- r pt_ori : numéro du point origine du profil de la charpente.
- r pt_ext : numéro du point extrémité du profil de la charpente.
- r Ep : Epaisseur du profil en mm.

Fonctions

Cette commande définit une charpente. Les points de la charpente sont les extrémités des profils de la charpente. Les points doivent précéder les profils. Un même point peut définir l'extrémité ou l'origine de plusieurs profils.

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE la charpente est définie partiellement au sens où l'ensemble des profils sera symétrisé. C'est-à-dire que chaque profil génèrera un profil symétrique. Si un profil coupe un axe de symétrie, il faudra définir un point de jonction sur l'axe de symétrie.

Le matériau peut être défini de trois manières :

- r Avant les profils pour être affecté à tous les profils,
- r Au niveau de chaque profil,
- r Avant les profils mais surchargé pour certains profils.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la charpente ne doit pas être utilisé dans toute la section pour définir une autre zone de la section.
- r Le matériau doit être du type CHARPENTE ou SPECIFIQUE.
- r La numérotation des points et des profils est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point ou profil de la section ne doit porter le même numéro.
- r La numérotation des points et des profils doit être comprise entre 1 et 9999.
- r Les charpentes ne doivent pas déborder de la zone qui les contient.
- r Si une charpente est incluse syntaxiquement dans un contour, son emprise sera déduite du contour.
- r Si une charpente est incluse géométriquement dans un contour mais non syntaxiquement, son emprise ne sera pas déduite du contour.
- r Une charpente est incluse syntaxiquement dans un contour si et seulement si elle est incluse géométriquement dans le contour.
- r Le mot clef PARTIEL ne s'applique qu'aux contours d'une SECTION déclarée avec SYMETRIE.

Exemple

```
CHARPENTE Caisson
  TITRE "Caisson metallique d epaisseur 10mm"
  MATERIAU Ac_charpente
  POINTS
    NUMERO 1 Y 1 Z 1
    NUMERO 1 Y -1 Z 1
    NUMERO 1 Y -1 Z -1
    NUMERO 1 Y 1 Z -1
  FIN_POINTS
  PROFILS
    NUMERO 1 ORIGINE 1 EXTREMITE 2 EPAISSEUR 10
    NUMERO 1 ORIGINE 2 EXTREMITE 3 EPAISSEUR 10
    NUMERO 1 ORIGINE 3 EXTREMITE 4 EPAISSEUR 10
    NUMERO 1 ORIGINE 4 EXTREMITE 1 EPAISSEUR 10
  FIN_PROFILS
FIN CHARPENTE
```

V.6 - Sous-Commande GAINÉ

Libellé

GAINES nom_gaines

TITRE "titre gaines"

[PARTIELLES]

DIAMETRE dg

POINTS ----- FIN_POINTS

autres paramètres optionnels

[**(PRECONTRAINTE ---- FIN_PRECONTRAINTE)]

FIN_GAINES

Paramètres

- r nom_gaines : nom affecté aux gaines.
- r "titre des gaines" : titre affecté aux gaines.
- r dg : Diamètre des gaines en mm.

Fonctions

Cette commande définit une famille de gaines ayant toutes le même diamètre. Les points de contour définissant le centre des gaines sont définis dans le repère de la section.

Les gaines peuvent éventuellement contenir des câbles de précontrainte.

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE les gaines sont définies partiellement et sont complétées automatiquement par CDS. Par défaut, tous les gaines doivent être définis.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la famille de gaines ne doit pas être utilisé dans toute la section pour définir une zone de la section.
- r La numérotation des points est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.
- r La numérotation des points doit être comprise en 1 et 9999.
- r Les gaines ne doivent pas déborder de la zone qui les contient (vérifié par CDS).
- r Les gaines doivent vérifier les conditions d'enrobage (non vérifié par CDS).
- r Si les gaines contiennent des câbles ceux-ci doivent être définies avec la sous-commande PRECONTRAINTÉ.
- r Le mot clef PARTIEL ne s'applique qu'aux gaines d'une SECTION déclarée avec SYMETRIE.

Exemple

GAINES Gaines_cablage

```
TITRE "Definition des gaines et des cable"
DIAMETRE 100
POINTS
  NUMERO 100 Y -1.00 Z -0.55
  NUMERO 101 Y  0.00 Z -0.55
  NUMERO 102 Y  1.00 Z -0.55
FIN_POINTS
PRECONTRAINTE Cablage
  TITRE "Definition du cablage"
  MATERIAU Acier_actif
  AIRE 2500
  POINTS
    NUMERO 200 Y -1.00 Z -0.55
    NUMERO 201 Y  0.00 Z -0.55
    NUMERO 202 Y  1.00 Z -0.55
  FIN_POINTS
FIN_PRECONTRAINTE
FIN_GAINES
```

V.7 - Sous-Commande PRECONTRAINTE

Libellé

PRECONTRAINTE nom_précontrainte

TITRE "titre précontrainte"

[PARTIELLE]

AIRE ap

POINTS ----- FIN_POINTS

MATERIAU nom_acier_precontrainte

FIN_PRECONTRAINTE

Paramètres

- r nom_précontrainte : nom affecté à la précontrainte.
- r nom_acier_precontrainte : Doit correspondre à un acier de précontrainte préalablement défini.
- r "titre précontrainte" : titre affecté à la précontrainte.
- r ap : aire des aciers de précontrainte en mm².

Fonctions

Cette commande définit une famille de câbles de précontrainte ayant tous la même aire.

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE les gaines sont définies partiellement et sont complétées automatiquement par CDS. Par défaut, tous les gaines doivent être définis.

Si cette sous commande est incluse dans une zone de type GAINES tous les câbles de cette seront déclarés intérieurs aux gaines. CDS ne vérifie pas que c'est géométriquement le cas.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la famille de câbles de précontrainte ne doit pas être utilisé dans toute la section pour définir une zone de la section.
- r La numérotation des points est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.
- r La numérotation des points doit être comprise en 1 et 9999.
- r La numérotation des câbles est indépendante de celle des gaines éventuelles.
- r Les câbles de précontrainte ne doivent pas déborder de la zone qui les contient : gaine, contour ou évidement (vérifié par CDS).
- r Les câbles doivent vérifier les conditions d'enrobage (non vérifié par CDS).
- r Une précontrainte par post tension doit être défini dans une gaine.
- r Une précontrainte par pré-tension doit directement être définie dans le contour qui la contient.
- r Une précontrainte extérieure d'un caisson doit être définie dans l'évidement du caisson.
- r Le mot clef PARTIEL ne s'applique qu'aux câbles d'une SECTION déclarée avec SYMETRIE.

Exemple

```
PRECONTRAINTE Cablage
  TITRE "Definition du cablage"
  MATERIAU Acier_actif
  AIRE 2500
  POINTS
    NUMERO 100 Y -1.00 Z -0.55
    NUMERO 101 Y  0.00 Z -0.55
    NUMERO 102 Y  1.00 Z -0.55
  FIN_POINTS
FIN_PRECONTRAINTE
```

V.8 - Sous-Commande FERRAILLAGE explicite

Libellé

FERRAILLAGE nom_ferraillage

TITRE "titre ferraillage"

DIAMETRE d

[PARTIEL]

[LITS ----- FIN_LITS]

[** (POINTS ----- FIN_POINTS)]

MATERIAU nom_acier_passif

[DIMENSIONNABLE OUI/NON]

FIN_FERRAILLAGE

Paramètres

- r nom_ferraillage : nom affecté à la famille de ferraillage.
- r nom_acier_passif : Doit correspondre à un acier passif préalablement défini.
- r "titre ferraillage" : titre affecté à la famille de ferraillage.
- r d : Diamètre des aciers en mm.

Fonctions

Cette commande définit une famille de ferraillage explicite c'est-à-dire une famille dont les diamètres et les positions sont explicitement définies. Une famille de ferraillage est constituée en général d'un ou plusieurs lits d'aciers positionnés le long d'une ou plusieurs parois de la section. Une famille de ferraillage fait l'objet d'un dimensionnement global relatif à tous les aciers qui la composent si elle est déclarée DIMENSIONNABLE. Pour obtenir le ferraillage optimal d'une section, il faut donc définir autant de ferraillages que de zones à ferrailler : intrados, extrados et cotés.

En cas de section déclarée avec SYMETRIE, avec l'option PARTIELLE le ferraillage est défini partiellement et est complété automatiquement par CDS. Par défaut, tous les aciers doivent être définis. Cette option est interdite en présence de LITS.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la famille de ferraillage ne doit pas être utilisé dans toute la section pour définir une zone de la section.
- r Les aciers de ferraillage ne doivent pas déborder de la zone qui les contient (vérifié par CDS).
- r Les aciers de ferraillage doivent vérifier les conditions d'enrobage (non vérifié par CDS).
- r La numérotation des points est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.

- r Une seule liste de LITS peut être définie dans une famille: soit les LITS supérieurs soit les LITS inférieurs de la section.
- r Des lits ne peuvent pas être définis dans le cas d'une contour circulaire.
- r La numérotation des points doit être comprise en 1 et 9999.

Exemple

FERRAILLAGE Intrados

TITRE "Ferrailage de l intrados comportant 10 aciers de 101 a 110"

MATERIAU acier_500

DIAMETRE 16

POINTS

DROITE

Y_ORIGINE -1

Y_EXTREMITE 1

Z_ORIGINE -0.96

Z_EXTREMITE -0.96

NOMBRE 10

NUMERO_DEBUT 101

FIN_DROITE

FIN_POINTS

FIN_FERRAILLAGE

FERRAILLAGE Extrados

TITRE "Ferrailage de l extrados comportant 10 aciers"

MATERIAU acier_500

DIAMETRE 10

LITS SUPERIEUR 1

ENROBAGE 30

NOMBRE 10

FIN_LITS

DIMENSIONNABLE NON

FIN_FERRAILLAGE

V.9 - Sous-Commande FERRAILLAGE automatique

Libellé

FERRAILLAGE nom_ferraillage

TITRE "titre ferraillage"

MATERIAU nom_acier_passif

OPTIONS_FERRAILLAGE_AUTOMATIQUE

*(

DISPOSITION

(SUPERIEURS/INFERIEURS/LATERALE/PERIPHERIQUE)

(STRICTE/PAROIS)

Options

[SELECTION_ACIER

(P_6/8/10/12/14/16/20/25/32)

FIN_SELECTION_ACIER]/

[ENROBAGE_MINIMAL enrobage]/

[LITS nb_lits DISTANCE_LITS d_lits]/

[E_MAX $e_{\max}$]/

[E_MIN $e_{\min}$]/

[GROUPE ng]/

Options avancées

DEVIATION_ANGULAIRE_HORIZONTALE_MAX devap)

FIN_OPTIONS_FERRAILLAGE_AUTOMATIQUE

FIN_FERRAILLAGE

Paramètres

- r nom_ferraillage : nom affecté à la famille de ferraillage.
- r nom_acier_passif : Doit correspondre à un acier passif préalablement défini.
- r "titre ferraillage" : titre affecté à la famille de ferraillage.
- r enrobage : Enrobage minimal des aciers en mm. La valeur par défaut 30mm .
- r $e_{\max}$: Espacement maximal des entre-axes des aciers en m. La valeur par défaut est 0.20m.
- r $e_{\min}$: Espacement minimal des entre-axes des aciers en m. La valeur par défaut 0.05m.
- r Nb_lits : nombre de lits de ferraillage. La valeur par défaut est 1.

- r D_lits : Distance entre les axes des lits en mm. La valeur par défaut est 30 mm.
- r Ng : Nombre de barres groupées. La valeur par défaut est 1.
- r Devap : déviation angulaire maximale des parois horizontales en degrés par rapport à l'horizontale (22.5° par défaut).

Fonctions

Cette commande définit les règles de dimensionnement des aciers passifs. La SELECTION_ACIERs fournit la liste ordonnée croissante du choix préférentiel des diamètres des aciers. Tous les aciers auront le même diamètre. Par défaut, cette liste est la suivante : P_20, P_25.

La première ligne de ferrailage est excentrée de l'enrobage minimal augmenté de la moitié du diamètre maximal des aciers de la liste ordonnée.

Si l'option GROUPE est fixée, alors les aciers sont groupés horizontalement, verticalement ou en cercle selon le type de section et la disposition.

La disposition des aciers peut être prévue en fibre SUPERIEURE, INFERIEURE, LATERALE ou PERIPHERIQUE. Avec l'option STRICTE seul le pourtour extérieur est ferrailé. Avec l'option PAROIS se sont les deux côtés des parois qui sont ferrailés : le coté EVIDEMENT et le coté CONTOUR. Avec l'option PERIPHERIQUE la quantité d'acier nécessaire est répartie régulièrement sur toute la périphérie du contour.

Pour une quantité d'acier nécessaire supérieure à celle obtenue en plaçant l'acier minimal disposé avec les espacements maximums : ce sont d'abord les diamètres qui sont augmentés jusqu'à atteindre le diamètre maximal puis si nécessaire les espacements sont réduits jusqu'à atteindre l'espacement minimal.

Conditions d'emploi

- r Dans un même contour, plusieurs ferrailages automatiques peuvent être définis pour permettre de spécifier les différentes zones de ferrailage.
- r Le choix des zones à ferrailer doit être judicieux pour qu'il soit optimal en séparant les zones distinctes au sens de la reprise des efforts.
- r Il ne faut pas oublier des zones nécessaires à l'équilibre de la section pour éviter un échec du processus d'optimisation.

Exemple

```
FERRAILLAGE extrados
  TITRE "titre ferrailage de l'extrados "
  MATERIAU nom_acier_passif
  OPTIONS_FERRAILLAGE
  SELECTION P_20 P_25 P_32 FIN_SELECTION
  ENROBAGE_MINIMAL 40
  E_MAXI 0.200
  E_MINI 0.070
  DISPOSITION SUPERIEURE STRICTE
  FIN_OPTIONS_FERRAILLAGE
FIN_FERRAILLAGE
FERRAILLAGE intrados
  TITRE "titre ferrailage de l'intrados "
  MATERIAU nom_acier_passif
```

```
    OPTIONS_FERRAILLAGE
    SELECTION P_20 P_25 P_32 FIN_SELECTION
    ENROBAGE_MINIMAL 50
    E_MAXI 0.20
    E_MINI 0.07
    LITS 2 DISTANCE_LITS 16
    DISPOSITION INFERIEURE STRICTE
  FIN_OPTIONS_FERRAILLAGE
FIN_FERRAILLAGE
FERRAILLAGE lateral
  TITRE "titre ferrailage lateral "
  MATERIAU nom_acier_passif
    OPTIONS_FERRAILLAGE
    SELECTION P_10 FIN_SELECTION
    ENROBAGE_MINIMAL 40
    E_MAXI 0.20
    E_MINI 0.07
    DISPOSITION LATERALE STRICTE
  FIN_OPTIONS_FERRAILLAGE
FIN_FERRAILLAGE
# Exemple de ferrailage de Pieu
CONTOUR CIRCULAIRE DIAMETRE 1.00 FIN_CIRCULAIRE
  FERRAILLAGE peripherique
    TITRE "titre ferrailage lateral "
    MATERIAU nom_acier_passif
      OPTIONS_FERRAILLAGE
      SELECTION P_10 FIN_SELECTION
      ENROBAGE_MINIMAL 40
      E_MAXI 0.20
      E_MINI 0.07
      DISPOSITION PERIPHERIQUE STRICTE
    FIN_OPTIONS_FERRAILLAGE
  FIN_FERRAILLAGE
FIN_CONTOURE
```

V.10 - Sous-Commande LITS

Libellé

LITS (SUPERIEUR/INFERIEUR) nb_lits

*(NOMBRE n/
parametres optionnels
[ENROBAGE enrobage]/
[DISTANCE_LITS d_lits]/
[E_MAX e_{max}]/
[E_MIN e_{min}]/
[GROUPE ng])

FIN_LITS

Paramètres

- r n : nombre de barres par lit.
- r enrobage : Enrobage minimal des aciers en mm. La valeur par défaut 30mm .
- r e_{max} : Espacement maximal des entre-axes des aciers en m. La valeur par défaut est 0.20m.
- r e_{min} : Espacement minimal des entre-axes des aciers en m. La valeur par défaut 0.05m.
- r Nb_lits : nombre de lits de ferrailage. La valeur par défaut est 1.
- r D_lits : Distance entre les axes des lits en mm. La valeur par défaut est 30 mm.
- r ng : nombre de barres dans le groupe. La valeur par défaut est 1.

Fonctions

Cette commande définit un ou plusieurs lits de ferrailage. Les valeurs e_{max} et un e_{min} sont utilisées uniquement en dimensionnement comme pour un ferrailage automatique.

Si l'option GROUPE est fixée, alors les aciers sont groupés horizontalement et le nombre total d'aciers disposés est nb_lits*ng*nombre aciers.

Conditions d'emploi

- r Cette sous commande ne peut être utilisée que pour définir un ferrailage explicite.

Exemple

```
# exemple de 2 lits inferieurs constitues de 10 groupes de 2 barres soit en
# tout 40 barres
LITS INFERIEUR 2
      NOMBRE 10 ENROBAGE 40 DISTANCE_LITS 50
      GROUPES 2
FIN_LITS
```

V.11 - Sous-Commande POINTS

Libellé

POINTS

**(NUMERO nu_point Y y Z z/

DROITE

Y_ORIGINE y_1

Z_ORIGINE z_1

Y_EXTREMITE y_2

Z_EXTREMITE z_2

NOMBRE n

[GROUPE ng]

NUMERO_DEBUT nu_point

FIN_DROITE/

ARC

Y_CENTRE y_c

Z_CENTRE z_c

DIAMETRE d

ORIGINE $teta_1$

EXTREMITE $teta_2$

NOMBRE n

[GROUPE ng]

NUMERO_DEBUT nu_point

FIN_ARC/

CERCLE

Y_CENTRE y_c

Z_CENTRE z_c

DIAMETRE d

NOMBRE n

[GROUPE ng]

NUMERO_DEBUT no_debut

FIN_CERCLE)

FIN_POINTS

Paramètres

- r nu_point : Numéro affecté au point (> 0 et < 10000).
- r y : Coordonnée y du point dans le repère local de la section.
- r z : Coordonnée z du point défini dans le repère local de la section.
- r y₁ : Coordonnée y du point origine dans le repère local de la section.
- r z₁ : Coordonnée z du point origine défini dans le repère local de la section.
- r y₂ : Coordonnée y du point extrémité dans le repère local de la section.
- r z₂ : Coordonnée z du point extrémité défini dans le repère local de la section.
- r y_c : Coordonnée y du centre de l'arc ou du cercle défini dans le repère local de la section.
- r z_c : Coordonnée z du centre de l'arc ou du cercle défini dans le repère local de la section.
- r d : diamètre du cercle ou de l'arc.
- r n : nombre de points à placer.
- r ng : nombre de barres dans le groupe. La valeur par défaut est 1.
- r Nu_debut : numéro de début de la numérotation des points (> 0 et < 10000-ng).
- r Teta₁ : Angle en degrés de début de l'arc par rapport à l'axe y (positif dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).
- r Teta₂ : Angle en degrés de fin de l'arc par rapport à l'axe y (positif dans le sens inverse des aiguilles d'une montre).

Fonctions

Cette commande définit une liste de points comme une succession de points ou/et de points portés par des droites, courbes, cercles. Le nombre de points à placer dépend du contexte. Pour les contours ou les évidements courbes il faut que les points soient suffisamment rapprochés pour approximer correctement le contour.

L'option GROUPE permet de définir des groupes d'aciers disposés suivant le profil indiqué. Le nombre d'aciers placés est alors égal à nombre*ng.

Conditions d'emploi

- r La numérotation des points est arbitraire mais doit être unique pour toute la section : Aucun point de la section ne doit porter le même numéro.
- r Dans les autres cas, les numéros doivent être inférieurs à 10000.
- r Tous les points d'un même contour et des zones à l'intérieur de celui-ci doivent être disjoints géométriquement sauf en ce qui concerne les câbles de précontrainte vis-à-vis de leur gaine.

Exemple

```
# exemple de section carrée (on peut avantageusement utiliser le contour type
# correspondant)
CONTOUR carre
```

TITRE 'EXEMPLE DE SECTION CARREE'

POINTS

NUMERO 1 Y 1.00 Z 0.00

NUMERO 2 Y -1.00 Z 0.00

NUMERO 3 Y -1.00 Z -1.00

NUMERO 4 Y 1.00 Z -1.00

FIN_POINTS

FIN_CONTOUR

autre exemple : section de pieux (on peut avantageusement utiliser le contour
type correspondant)

CONTOUR pieu

TITRE 'EXEMPLE DE SECTION CIRCULAIRE'

POINTS

CERCLE

Y_CENTRE 0.00

Z_CENTRE 0.00

DIAMETRE 0.50

NOMBRE 20

NUMERO_DEBUT 1

FIN_CERCLE

FIN_POINTS

FIN_CONTOUR

V.12 - Commande EDITER SECTION

Libellé

EDITER SECTION (nom_section / TOUTES)

Paramètres

- r nom_section : nom de la section à editer.

Fonctions

Cette commande édite les données d'une section ou de toutes les sections définies dans la note de calcul. Sont éditées la définition de toutes les entités renseignées et des caractéristiques usuelles : brutes, nettes et homogénéisées.

Conditions d'emploi

- r La section à éditer doit exister.

Chapitre VI - Commandes de Calcul

VI.1 - Commande SOLLICITATIONS - Béton armé/Charpente

Libellé

SOLLICITATIONS nom_sollicitation SECTION Nom_section
 TITRE "titre"
 [PONDERATIONS
 *(ETAT_LIMITE etat_limite SITUATION situation EFFORT G/P/Q
 FAVORABLE vf DEFAVORABLE vd)
 FIN_PONDERATIONS]
 REPERE_EFFORTS (BRUT/GEOMETRIQUE/Y y Z z ANGLE alpha)
 *(ETAT_LIMITE etat_limite SITUATION situation (PONDERES/A_PONDERER)
 *(EFFORTS GQ/G/Q TITRE "titre efforts"
 *(N n/MY my/MZ mz)
 FIN_EFFORTS
 MEMES_EFFORTS G/Q
 QUE etat_limite_id EN Situation_id
 FIN_MEMES_EFFORTS)
 FIN_ETAT_LIMITE)
 FIN_SOLLICITATIONS

Paramètres

- r nom_sollicitation : nom de la sollicitation.
- r nom_section : nom de la section sollicitée.
- r " titre de la sollicitation " : titre affecté à la sollicitation.
- r vf et vd : coefficients de pondération des efforts favorables et défavorables.
- r y et z : coordonnées du centre du repère de sollicitation défini dans le repère de définition de la section.
- r alpha : angle de rotation en degrés du repère positif de y vers z.
- r etat_limite :
 - o ELS (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/QUASIPERMANENT
 - o ELS_NON_FISSURE (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/QUASIPERMANENT)
 - o ELU (DURABLE/ACCIDENTEL)
- r Situation :

- EXPLOITATION SERVICE
 - EXPLOITATION INFINIE
 - CONSTRUCTION
 - ACCIDENTELLE
 - SEISME
- r n : effort normal positif en compression.
- r m_y : moment autour de l'axe y positif en comprimant $z > 0$.
- r m_z : moment autour de l'axe z positif en comprimant $y < 0$.
- r Etat_limite_id et Situation_id : Identifiants d'un état limite (cf. etat_limite) et d'une situation (cf. situation) dont les efforts sont déjà renseignés et qui doivent être repris ici dans un nouveau contexte.

Fonctions

Cette commande définit un ensemble de sollicitations appliqué à une section comportant du béton et/ou des aciers de charpente. Une sollicitation est composée d'un ou plusieurs états limites. Chaque état limite est associé à une situation de projet et à une série d'efforts qui peuvent être du type G, Q ou GQ. Chaque effort Q sera ajouté successivement à chacun des efforts G définis.

Les efforts renseignés sont soit déjà PONDERES par l'utilisateur soit A_PONDERER auquel cas CDS leur applique le coefficient adéquat indiqué dans le tableau ci-dessous éventuellement surchargé par l'option PONDERATION. Les options PONDERES ou A_PONDERER peuvent être choisies indépendamment de la présence ou non de l'option PONDERATION. Cette dernière option ne concerne que la SOLLICITATION courante. L'utilisation d'efforts préalablement définis dans la même sollicitation (cf. MEMES_EFFORTS) ne peut être utilisée que dans le cadre A_PONDERER. Les valeurs à PONDERER qu'il faut renseigner sont des valeurs probables pour G et Q Caractéristique.

Les efforts sont définis soit dans le repère BRUT, soit dans le repère GEOMETRIQUE de définition de la section soit dans une repère défini par l'utilisateur. Le repère BRUT est le repère principal de la section brute dont l'origine est fixée sur le centre de gravité de la section brute. L'utilisateur peut définir un repère quelconque de sollicitation par rapport au repère de définition géométrique de la section.

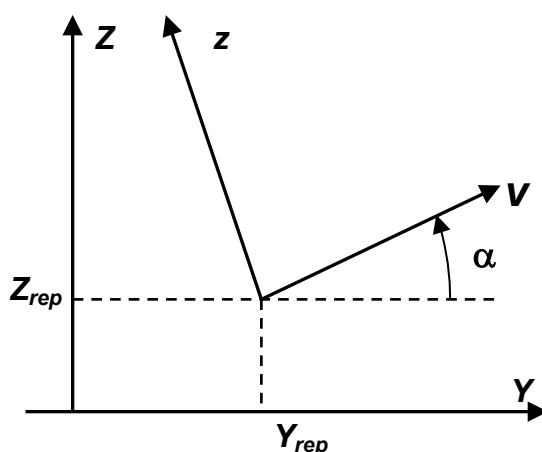


Figure 2 : Changement de repère

Etat limite	G	Q
ELS	0.95/1.05	0/1

ELU DURABLE	0.95/1.35*1.05	0/1.35
ELU ACCIDENTEL	1	0/1(*)

Tableau 1 : Coefficients de pondération par défaut

- (*) Attention : pour les efforts ayant pour origine le vent une pondération différente est à spécifier explicitement.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section doit correspondre à une section préalablement définie.
- r Le nom de la sollicitation ne doit pas être déjà défini pour la section correspondante.
- r Au moins un effort G doit être défini pour chaque état limite.
- r L'option A_PONDERER est interdite pour des efforts du type GQ.
- r La situation et l'état limite doivent être compatibles. Les ELS et les ELU DURABLE sont réservés à la CONSTRUCTION et l'EXPLOITATION. Les ELU ACCIDENTEL aux SEISMES et ACCIDENTS.
- r Les sollicitations peuvent contenir plusieurs états limites successifs ce qui est conseillé lors d'un dimensionnement.

Exemple

exemple avec efforts déjà pondérés

SOLLICITATION ELU SECTION TE

TITRE "sollicitations ELU et ELS"

REPERE_EFFORTS BRUT

ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE PONDERES

EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmax" MY 100 FIN_EFFORTS

EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmin" MY 90 FIN_EFFORTS

EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmax" MY 200 FIN_EFFORTS

EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmin" MY -200 FIN_EFFORTS

FIN_ETAT_LIMITE

ETAT_LIMITE ELS CARACTERISTIQUE SITUATION EXPLOITATION SERVICE PONDERES

EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmax" MY 90 FIN_EFFORTS

EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmin" MY 80 FIN_EFFORTS

EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmax" MY 120 FIN_EFFORTS

EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmin" MY -120 FIN_EFFORTS

FIN_ETAT_LIMITE

FIN_SOLLICITATION

exemple avec efforts non déjà pondérés

SOLLICITATION ELU SECTION TE

TITRE "sollicitations ELU et ELS"

PONDERATION

ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE EFFORT G FAVO 0.95

DEFA (1.35*1.05) # idem celles par défaut donc inutile ici

FIN_PONDERATION

REPERE_EFFORTS BRUT

ETAT_LIMITE ELS CARACTERISTIQUE SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER

```
      EFFORTS G TITRE "sollicitation Gpro" MY 100 FIN_EFFORTS
      EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qpro" MY -200 FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
      MEMES_EFFORTS
      G QUE ELS CARACTERISTIQUE EN EXPLOITATION SERVICE
      FIN_MEMES_EFFORTS
      MEMES_EFFORTS
      Q QUE ELS CARACTERISTIQUE EN EXPLOITATION SERVICE
      FIN_MEMES_EFFORTS
      FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATION
```


VI.2 - Commande SOLLICITATIONS - béton précontraint

Libellé

SOLLICITATIONS nom_sollicitation SECTION Nom_section

TITRE "titre"

[PONDERATIONS -----]

REPERE_EFFORTS -----

PRECONTRAINTE (TOTALE/HYPERSTATIQUE)

(PRETENSION/POSTENSION)

******(ETAT_LIMITE etat_limite SITUATION situation (PONDERES/A_PONDERER)

******(EFFORTS G/**P**/Q/**GP**/GQ

TITRE "titre efforts" *(N n/MY my/MZ mz)

[TENSIONS**(PRECONTRAINTE nom_zone POINT

no TENSION t (INJECTE rho/NON_INJECTES))

FIN_TENSIONS]

FIN_EFFORTS

MEMES_EFFORTS G/**P**/Q

QUE etat_limite_id EN Situation_id

FIN_MEMES_EFFORTS)

FIN_ETAT_LIMITE)

FIN_SOLLICITATIONS

Paramètres

- r nom_sollicitation : nom de la sollicitation.
- r nom_section : nom de la section sollicitée.
- r " titre de la sollicitation " : titre affecté à la sollicitation.
- r etat_limite :
 - o ELS (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/QUASIPERMANENT)
 - o ELS_NON_FISSURE (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/ QUASIPERMANENT)
 - o ELU (DURABLE/ACCIDENTEL)
- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE

- CONSTRUCTION
 - ACCIDENTELLE
 - SEISME
- r n : effort normal positif en compression.
 - r my : moment autour de l'axe y positif en comprimant $z > 0$.
 - r mz : moment autour de l'axe z positif en comprimant $y > 0$.
 - r Nom_zone : nom de la zone précontrainte concernée.
 - r No : Numéro du point définissant le câble de la zone précontrainte.
 - r t : contrainte (> 0) dans le câble en Mpa. C'est la contrainte obtenue après équilibre avec le béton donc après pertes instantanées intrinsèques.
 - r Rho : Facteur de participation de la précontrainte à l'équilibre de la section (compris entre 0 et 1 inclus).
 - r Etat_limite_id et Situation_id : Identifiants d'un état limite et d'une situation dont les efforts et tensions sont déjà renseignés et qui doivent être repris ici dans un nouveau contexte.

Fonctions

Cette commande définit un ensemble de sollicitations appliqué à une section précontrainte comportant ou non des aciers de charpente. Une sollicitation est composée d'un ou plusieurs états limites. Chaque état limite est associé à une situation de projet et à une série d'efforts qui peuvent être du type G, P, Q ou GP. Chaque effort P sera ajouté successivement aux efforts G et chaque effort Q sera ajouté systématiquement aux efforts GP précédents.

La précontrainte P peut être définie TOTALEMENT : efforts isostatiques plus efforts hyperstatiques, soit seul l'effort HYPERSTATIQUE est défini, auquel cas, l'effet isostatique est calculé à partir des tensions. Dans le cas où c'est l'effort P ou GP qui est renseigné les tensions des câbles tendus doivent être renseignées. Un câble de précontrainte dont on ne fournit pas la tension est considéré comme non tendu.

La différence entre une PRECONTRAINTÉ par POSTENSION ou par PRETENSION est le fait que l'action G s'applique après P dans le cas de la PRETENSION alors que dans le cas de la POSTENSION elles sont concomitantes.

Les efforts renseignés sont soit déjà PONDERES par l'utilisateur soit A_PONDERER auquel cas CDS leur applique le coefficient adéquat indiqué dans le tableau ci-dessous éventuellement surchargé par l'option PONDERATION. Les options PONDERES ou A_PONDERER peuvent être choisies indépendamment de la présence ou non de l'option PONDERATION. Cette dernière option ne concerne que la SOLLICITATION courante. Avec l'option GP ou GQ c'est l'option PONDERES qui doit être codée. L'utilisation d'efforts préalablement définis dans la même sollicitation (cf MEMES_EFFORTS) ne peut être utilisée que dans le cadre A_PONDERER. Les valeurs à PONDERER qu'il faut renseigner sont des valeurs probables pour G, Pm pour P et Q Caractéristique.

Les efforts sont définis soit dans le repère BRUT, soit dans le repère GEOMETRIQUE de définition de la section soit dans un repère défini par l'utilisateur. Le repère BRUT est le repère principal de la section brute dont l'origine est fixée sur le centre de gravité de la section brute. L'utilisateur peut définir un repère quelconque de sollicitation par rapport au repère de définition géométrique de la section (Cf. sollicitations BA)

Le coefficient rho dépend de la règle de prise en compte des surtensions dans les câbles. Soit la surtension ne doit pas être considérée et auquel cas rho doit être pris nul, soit elle doit être totalement considérée et auquel cas on fixe rho égal à 1. Une surtension partielle est prise en compte en fixant une

valeur de rho comprise entre 0 et 1. Pour les câbles extérieurs on fixera rho à 0. L'option NON_INJECTES revient à fixer rho à zéro.

Etat limite	G	P	Q
ELS	0.95/1.05	0.90/1.10	0/1
ELU DURABLE	0.95/1.35*1.05	1	0/1.35
ELU ACCIDENTEL	1	1	0/1(*)

Tableau 2 : Coefficients de pondération par défaut

- (*) Attention : pour les efforts ayant pour origine le vent une pondération différente est à spécifier explicitement.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section doit correspondre à une section préalablement définie.
- r Le nom de la sollicitation ne doit pas être déjà défini pour la section correspondante.
- r Au moins un effort G et un effort P ou GP doivent être définis pour chaque état limite en post tension.
- r Au moins un effort P et un effort G ou GQ doivent être définis pour chaque état limite en pré-tension.
- r GQ est interdit en post tension.
- r GP est interdit en pré-tension.
- r Il est interdit de mélanger GP à G ou P dans un même état limite.
- r Les efforts Q sont optionnels.
- r L'option A_PONDERER est interdite pour des efforts du type GP ou GQ.
- r En cas de PRETENSION, l'option INJECTE est obligatoire.
- r La situation et l'état limite doivent être compatibles. Les ELS sont réservés à la CONSTRUCTION et l'EXPLOITATION.
- r Les sollicitations peuvent contenir plusieurs états limites successifs ce qui est conseillé lors d'un dimensionnement.

Exemple

```
# Exemple avec efforts et tensions déjà ponderes
SOLLICITATION ELU SECTION TE
  TITRE "sollicitation ELS CARACTERISTIQUE"
  REPERE_EFFORTS BRUT
  PRECONTRAINTTE TOTALE POST_TENSION
  ETAT_LIMITE ELS CARACTERISTIQUE SITUATION EXPLOITATION SERVICE PONDERES
    EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmax" MY 100 FIN_EFFORTS
    EFFORTS G TITRE "sollicitation Gmin" MY 90 FIN_EFFORTS
    EFFORTS P TITRE "sollicitation Pmax" N 2200 MY 220
    TENSION
      PRECONTRAINTTE preco POINT 100 TENSION 1100 INJECTE 1
      PRECONTRAINTTE preco POINT 101 TENSION 1100 INJECTE 1
```

```

    FIN_TENSION
  FIN_EFFORTS
  EFFORTS P TITRE "sollicitation Pmin" N 1800 MY 180
    TENSION
      PRECONTRAINTTE preco POINT 100 TENSION 900 INJECTE 1
      PRECONTRAINTTE preco POINT 101 TENSION 900 INJECTE 1
    FIN_TENSION
  FIN_EFFORTS
  EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmax" MY 200 FIN_EFFORTS
  EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qmin" MY -200 FIN_EFFORTS
  FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATION

# Exemple avec efforts et tensions non déjà ponderes
SOLLICITATION ELU SECTION TE
  TITRE "sollicitation ELS CARACTERISTIQUE"
  REPERE_EFFORTS BRUT
  PRECONTRAINTTE TOTALE POST_TENSION
  ETAT_LIMITE ELS CARACTERISTIQUE SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
    EFFORTS G TITRE "sollicitation Gpro" MY 100 FIN_EFFORTS
    EFFORTS P TITRE "sollicitation Pm" N 2200 MY 220
      TENSION
        PRECONTRAINTTE preco POINT 100 TENSION 1100 INJECTE 1
        PRECONTRAINTTE preco POINT 101 TENSION 1100 INJECTE 1
      FIN_TENSION
    FIN_EFFORTS
    EFFORTS Q TITRE "sollicitation Qpro" MY 200 FIN_EFFORTS
  FIN_ETAT_LIMITE
  ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
    MEMES_EFFORTS
      G QUE ELS CARACTERISTIQUE EN EXPLOITATION SERVICE
    FIN_MEMES_EFFORTS
    MEMES_EFFORTS
      P QUE ELS CARACTERISTIQUE EN EXPLOITATION SERVICE
    FIN_MEMES_EFFORTS
    MEMES_EFFORTS
      Q QUE ELS CARACTERISTIQUE EN EXPLOITATION SERVICE
    FIN_MEMES_EFFORTS
  FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATION

```

VI.3 - Commande SOLLICITATIONS avec Phasage

Libellé

SOLLICITATIONS nom_sollicitation SECTION Nom_section **[PHASEES]**

TITRE "titre"

[PONDERATIONS -----]

REPERE_EFFORTS -----

[PRECONTRAINTE -----]

**(ETAT_LIMITE etat_limite SITUATION situation (PONDERES/A_PONDERER)

**(

PHASE « titre phase » ZONES_ACTIVES zo_act FIN_ZONES_ACTIVES

**(EFFORTS G/P/Q/GP [REPERE_BRUT_ZONE zone_repere/

R_BRUT_ZONES_ACTIVES]

FIN_EFFORTS)

)

FIN_ETAT_LIMITE)

FIN_SOLLICITATIONS

Paramètres

- r nom_sollicitation : nom de la sollicitation.
- r nom_section : nom de la section sollicitée.
- r " titre de la sollicitation " : titre affecté à la sollicitation.
- r etat_limite : (idem Sollicitations BA/BP)
- r Situation : : (idem Sollicitations BA/BP)
- r Titre phase : titre identifiant la phase.
- r Zo_act : Liste des zones du type CONTOUR ou CHARPENTE actives durant la phase.
- r Zone_repere : nom de la zone dont le repère brut est le repère de définition des efforts. Par défaut, il s'agit du repère indiqué par l'option REPERE_EFFORTS ou du repère brut des zones actives : R_BRUT_ZONES_ACTIVES.

Fonctions

Cette commande définit un ensemble de sollicitations appliqué à une section BA, BP ou mixte. Une sollicitation est composée d'un ou plusieurs états limites. Chaque état limite est associé à une situation de projet et à une série de phases qui se succèdent. Chaque phase contient une série d'efforts qui peuvent être

du type G, P, Q ou GP. La précontrainte est définie de la même façon que dans la commande sans phasage. La pondération obéit aux mêmes règles que dans la commande sans phasage.

Les efforts introduits dans chaque phase sont traités de la façon suivante :

- r En Béton armé : les efforts G se cumulent d'une phase à une autre.
- r En Béton précontraint par POST TENSION : les efforts P éventuels sont cumulés aux efforts G de la phase **courante** sans pertes élastiques et aux efforts des phases précédentes.
- r En Béton précontraint par PRE TENSION : les efforts G sont cumulés aux efforts P de la phase **précédente**.
- r En présence d'efforts Q : ceux-ci sont ajoutés uniquement aux efforts de la phase courante et ne sont pas pris en compte dans les phases ultérieures.
- r Lorsque dans une même phase, plusieurs efforts de même nature (G ou P) sont renseignés, chacun de ces efforts interviendra dans l'historique du phasage de façon indépendante ce qui donnera lieu à un arborescence d'efforts ayant pour nœuds chacun des efforts ainsi introduits (Cf. exemple ci-dessous). Ceci est également le cas avec l'option A_PONDERER pour laquelle deux efforts sont générés avec les deux coefficients de pondération définis par défaut. Par exemple, si l'utilisateur introduit un effort Gmax et un effort Gmin, ces deux efforts donneront lieu à deux séries de calculs avec pour point de départ respectivement Gmax et Gmin et ainsi de suite.

L'utilisateur indique pour chaque phase les zones actives. Deux types de phases transversales peuvent être définies :

- r Une phase « **indépendante** » consistant à ajouter une zone (ou un ensemble de zones contiguës) avec son (leur) propre effort avant mise en continuité avec le reste de la section : auquel cas, seule la zone est active (seules ces zones sont actives) et l'effort est appliqué à cette seule zone (à ces seules zones) puis pris en compte en tant que tel pour les phases ultérieures.
- r Une phase « **continue** » consistant à ajouter une zone aux zones présentes dans les phases précédentes et charger l'ensemble avec un nouvel effort, auquel cas, c'est l'ensemble des zones dans la phase courante qui sont déclarées actives.

La phase « **indépendante** » correspond au cas courant où les efforts ont été calculés séparément dans un premier temps par un calcul de structure du type poutre échelle et que les efforts sont alors spécifiques à chaque zone. Dans une phase ultérieure, un calcul de structure de la poutre assemblée permet de fournir les efforts globaux complémentaires.

La phase « **continue** » correspond au cas où ce sont toujours les efforts globaux qui sont connus par l'utilisateur.

Dans le cas de CONTOURS ou CHARPENTES inclus dans un CONTOUR, ce dernier déclaré actif, active tous les CONTOURS ou CHARPENTES fils. Si l'on veut éviter cette récursivité - qui empêche un certain type de phasage - il faut déclarer les zones filles en dehors du CONTOUR initial, auquel cas, il ne faut pas oublier de remplacer celle-ci par un évidement dans le contour initial car dans le cas contraire la zone incluse serait comptée deux fois.

Les efforts peuvent être définis dans le REPERE_EFFORTS associé à la SOLlicitation, dans le repère associé à une zone définie par l'option REPERE_BRUT_ZONE ou dans le repère brut de l'ensemble des zones actives : R_BRUT_ZONES_ACTIVES. Dans le cas d'une phase « indépendante » ce sera souvent cette option qui sera utilisée puisque le calcul en poutre échelle fournit les efforts dans le repère brut de la zone concernée.

En ce qui concerne, les mises en tensions de câbles, celles-ci pourront se faire simultanément dans une phase ou progressivement d'une phase à une autre. Un câble non tendu sera considéré comme absent de la section et n'interviendra donc pas dans la résistance de la section.

Toutes les surtensions éventuelles sont calculées en fonction des options d'injection de chaque câble.

En mode POSTENSION l'effort P doit toujours accompagner de l'effort G concomitant pour éviter que des surtensions abusives soient calculées par CDS. En Effet, en post tension les tensions dans les câbles sont celles obtenues après équilibre sous G et P, il n'y a donc pas lieu de prendre en compte un effet de G sur cette tension.

En mode PRETENSION l'effort P doit toujours être séparé de l'effort G pour éviter que les surtensions de G sur P soient ignorées par CDS. En Effet, en pré tension les tensions dans les câbles sont celles obtenues avant application de G, il y a donc lieu de prendre en compte un effet de G sur cette tension.

Lors d'un phasage, les déformations acquises lors d'une phase sont reprises dans les phases ultérieures. Ceci signifie qu'un différentiel de déformations entre zones activées lors de phases différentes est conservée d'une phase à une autre.

Conditions d'emploi

- r Il est interdit de tendre un câble déjà tendu dans une phase antérieure.
- r Les efforts renseignés sont les incréments d'efforts et non les efforts totaux.
- r Une zone présente dans une phase précédente doit être présente dans la phase courante s'il s'agit d'une phase « continue ».
- r Une zone présente dans une phase précédente ne peut pas apparaître dans la phase courante s'il s'agit d'une phase « Indépendante ».
- r En post tension, une phase doit référencer au moins un effort G, P ou GP et il est interdit de mélanger dans une même phase : GP et G ou P.
- r En post tension G peut être introduit seul dans une phase.
- r En post tension si P est présent il doit être accompagné de G.
- r En pré-tension, une phase ne peut pas référencer simultanément un effort P et un effort G. Chacun de ces efforts devra apparaître dans une phase séparée.
- r En pré-tension, une phase ne peut pas référencer d'effort GP.
- r Il est interdit de référencer un effort GQ lors d'un phasage.
- r Les efforts Q ne sont pas obligatoires ni en phase terminale ni dans les phases intermédiaires.
- r L'option MEMES_EFFORTS est interdite avec l'option PHASEES.
- r Plusieurs états limites successifs peuvent être définis : Ceci est conseillé lors d'un dimensionnement.
- r Les sollicitations avec phasage peuvent être utilisées en DIMENSIONNEMENT ou en JUSTIFICATION.
- r En mode DIMENSIONNEMENT, il est conseillé de surdimensionner les aciers pour passer les phases intermédiaires sans rupture. Le dimensionnement réduira automatiquement la quantité nécessaire.

Exemples

```
# Etude ELS et ELU d'une poutre précontrainte par post tension complétée par un
# hourdis (voir fichier exemple correspondant dans le répertoire des exemples).
# Les efforts sont les valeurs probables à pondérer. Ils sont fournis dans le
# repère brut de la poutre puis dans le repère global: poutre + hourdis.
```

```
SOLLICITATIONS sol_els SECTION poutre_hourdis PHASEES
```

```

TITRE "sollicitations ELS service"
REPERE_EFFORTS BRUT
PRECONTRAINTES HYPERSTATIQUE POSTENSION
ETAT_LIMITE ELS FREQUENT SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
  PHASE "Poutre seule" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
    EFFORTS P REPERE_BRUT_ZONE Poutre TITRE "P Probable" MY 0
      TENSIONS
      PRECONTRAINTES P1 POINT 2 TENSION 878 INJECTE 0.5
      FIN_TENSIONS
    FIN_EFFORTS
    EFFORTS G TITRE "G probable " MY -0.1 FIN_EFFORTS
  PHASE "Poutre et hourdis" ZONES_ACTIVES poutre hourdis FIN_ZONES_ACTIVES
    EFFORTS G TITRE "G Hourdis+super structures" MY -0.2 FIN_EFFORTS
    EFFORTS Q TITRE "Q" MY 0.1 FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
  PHASE "Poutre seule" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
    EFFORTS P REPERE_BRUT_ZONE Poutre TITRE "P Probable" MY 0
      TENSIONS
      PRECONTRAINTES P1 POINT 2 TENSION 878 INJECTE 0.5
      FIN_TENSIONS
    FIN_EFFORTS
    EFFORTS G TITRE "G probable " MY -0.1 FIN_EFFORTS
  PHASE "Poutre et hourdis" ZONES_ACTIVES poutre hourdis FIN_ZONES_ACTIVES
    EFFORTS G TITRE "G Hourdis+super structures" MY -0.2 FIN_EFFORTS
    EFFORTS Q TITRE "Q" MY 0.1 FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATIONS
# Etude ELS et ELU d'une poutre précontrainte par pre-tension complétée par un
# hourdis (voir fichier exemple correspondant dans le répertoire des exemples).
# Les efforts sont les valeurs probables à pondérer. Ils sont fournis dans le
# repère brut de la poutre: P et G, puis le repère brut du hourdis: G puis « G
# superstructure » est appliqué sur: poutre + hourdis.

SOLlicitATIONS sol_els SECTION poutre_hourdis PHASEES
TITRE "sollicitations ELS service"
REPERE_EFFORTS BRUT
PRECONTRAINTES HYPERSTATIQUE PRETENSION
ETAT_LIMITE ELS FREQUENT SITUATION EXPLOITATION SERVICE A_PONDERER
  PHASE "Poutre seule" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
    EFFORTS P REPERE_BRUT_ZONE ACTIVE TITRE "P Probable" MY 0
      TENSIONS
      PRECONTRAINTES P1 POINT 2 TENSION 878 INJECTE 0.5
      FIN_TENSIONS
    FIN_EFFORTS

```



```
PHASE "Poutre seule + G" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
      EFFORTS  G TITRE "G probable " MY -0.1    FIN_EFFORTS
PHASE "Poutre et hourdis" ZONES_ACTIVES poutre hourdis FIN_ZONES_ACTIVES
      EFFORTS  G TITRE "G Hourdis+super structures" MY -0.2    FIN_EFFORTS
      EFFORTS  Q TITRE "Q" MY  0.1    FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
ETAT_LIMITE ELU DURABLE      SITUATION EXPLOITATION SERVICE  A_PONDERER
PHASE "Poutre seule" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
      EFFORTS  P REPERE_BRUT_ZONE Poutre TITRE "P Probable" MY 0
      TENSIONS
      PRECONTRAINTE P1 POINT 2 TENSION 878  INJECTE 0.5
      FIN_TENSIONS
      FIN_EFFORTS
PHASE "Poutre seule + G" ZONES_ACTIVES poutre FIN_ZONES_ACTIVES
      EFFORTS  G TITRE "G probable " MY -0.1    FIN_EFFORTS
PHASE "Poutre et hourdis" ZONES_ACTIVES poutre hourdis FIN_ZONES_ACTIVES
      EFFORTS  G TITRE "G Hourdis+super structures" MY -0.2    FIN_EFFORTS
      EFFORTS  Q TITRE "Q" MY  0.1    FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATIONS
```

VI.4 - Commande JUSTIFICATION

Libellé

JUSTIFICATION nom_section

#options prealables

[INTERACTIONS [FIXER (N/MY/MZ) valeur]]

[DEFORMATION BORNEES/NON_BORNEES]

[PIVOT_C NON_JUSTIFIER/JUSTIFIER]

liste des sollicitations

**(SOLLICITATION nom_sollicitation)

FIN_JUSTIFICATION

Paramètres

- r nom_section : nom de la section sollicitée.
- r nom_sollicitation : nom de la sollicitation.
- r Valeur : Valeur de la composante fixée ($M_z = 0$ par défaut).

Fonctions

Cette commande lance les calculs de justification de la section nom_section sous les sollicitations spécifiées. Avec l'option DEFORMATION BORNEES l'équilibre est recherché sans dépasser les limites de comportement des matériaux. C'est l'option par défaut. Si l'équilibre est atteint, il le sera en respectant ces limites. Avec l'option DEFORMATION NON_BORNEES l'équilibre est recherché même en dépassant les limites en cours d'itérations et au final mais s'il y a équilibre les zones ou les limites sont dépassées sont signalées.

Avec l'option PIVOT_C JUSTIFIER, CDS vérifie également que le pivot C n'est pas dépassé au niveau du centre de gravité de la section. C'est l'option par défaut.

Si l'équilibre a pu être atteint, le fichier des résultats indique alors pour chaque point défini par l'utilisateur, les valeurs des contraintes et déformations dans les différents matériaux.

Avec l'option INTERACTION le diagramme des interactions est affiché ainsi que les efforts appliqués pour chaque état limite. Le diagramme prend en compte la présence éventuelle des câbles de précontrainte avec leur tension.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section doit correspondre à une section préalablement définie.
- r Le nom de la sollicitation doit correspondre à une sollicitation préalablement définie.
- r En cas de NON EQUILIBRE avec l'option DEFORMATIONS BORNEES basculer en mode DEFORMATIONS NON BORNEES pour confirmer le non équilibre. En effet, il arrive que pour obtenir un équilibre BORNE le logiciel dépasse lors des itérations les bornes pour ensuite revenir dans un équilibre BORNE. Ces dépassements étant purement virtuels et non réels, il n'y a aucun inconvénient à les dépasser lors du processus itératif.

- Si la JUSTIFICATION est demandée après un DIMENSIONNEMENT, la JUSTIFICATION se fait avec les aciers trouvés lors du DIMENSIONNEMENT.

Exemple

```
JUSTIFICATION SECTION TE
  PIVOT_C JUSTIFIER
  DEFORMATIONS BORNEES
  SOLlicitATIONS elu1
  SOLlicitATIONS elu2
  SOLlicitATIONS elu3
  SOLlicitATIONS fre1
  SOLlicitATIONS fre2
FIN_JUSTIFICATION
```

VI.5 - Commande DIMENSIONNEMENT

Libellé

```
DIMENSIONNEMENT nom_section [ITERATIONS nb_iter_max]
  **(SOLlicitATION nom_sollicitation)
FIN_DIMENSIONNEMENT
```

Paramètres

- nom_section : nom de la section sollicitée.
- nom_sollicitation : nom de la sollicitation.
- nb_iter_max : nombre d'itérations maximal pour optimiser en BP. La valeur par défaut est 50.

Fonctions

Cette commande lance les calculs de dimensionnement du ferrailage de la section nom_section sous les sollicitations spécifiées.

En présence de ferrailages explicites, la répartition des aciers est inchangée mais la quantité totale d'acier à placer par zone de ferrailage est indiquée dans la note de calcul. A charge pour l'utilisateur de répartir cette quantité d'acier dans la zone correspondante.

En présence de lits de ferrailage, les écartements des aciers de chaque lit sont réduits ou augmentés jusqu'à atteindre l'équilibre.

En présence de ferrailage automatique, le diamètre des aciers est augmenté jusqu'à atteindre l'équilibre en puisant dans la liste des aciers disponibles. Si cela n'est pas suffisant les écartements des aciers sont réduits jusqu'à atteindre les écartements minimaux.

Si plusieurs sollicitations sont spécifiées, CDS prend l'enveloppe des quantités d'aciers nécessaires. On observera que le résultat ne sera pas identique entre un dimensionnement pour une sollicitation regroupant tous les efforts et plusieurs dimensionnements successifs dont on prend l'enveloppe. Dans le premier cas l'optimisation est globale et garantit la justification finale. Alors que dans le deuxième cas, les aciers ne sont pas optimaux et ne garantissent pas la justification finale. En effet si les aciers travaillent en compression un

surcroît d'acier peut rendre une section non justifiée contrairement à l'intuition courante. Cette possibilité est néanmoins offerte pour permettre initialement à l'utilisateur d'identifier les effets de chaque sollicitation.

L'échec du dimensionnement peut provenir d'une insuffisance de béton ou d'une insuffisance dans la disposition du ferrailage.

La note de calcul indique la disposition de ferrailage proposée en mode FERRAILLAGE AUTOMATIQUE ou la quantité d'acier en mode FERRAILLAGE EXPLICITE.

Pour une section précontrainte, l'utilisateur peut préciser le nombre d'itérations maximal pour assurer un ferrailage optimal. En effet, la mise en place de la précontrainte et la charge Q sont phasées. Le dimensionnement porte sur le ferrailage sous Q (ou GQ en pré-tension) alors qu'il est déjà présent sous GP (ou P en pré-tension). Pour prendre en compte, le nouveau ferrailage dans la première étape, il est nécessaire d'itérer. Ces itérations permettent de réduire la quantité d'acier finale à mettre en place. Néanmoins, elles peuvent dans certains cas produire à un échec de l'optimisation. Auquel cas, il faut réduire le paramètre nb_iter_max à 1.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section doit correspondre à une section préalablement définie.
- r Le nom de la sollicitation doit correspondre à une sollicitation préalablement définie.
- r L'option ITERATION est interdite en B.A..

Exemple

```
DIMENSIONNEMENT SECTION TE
      SOLLICITATIONS elu_car
FIN_DIMENSIONNEMENT
```

VI.6 - Commande INTERACTION SECTION

Libellé

INTERACTION nom_diagramme SECTION nom_section

[TITRE « titre diagramme »]

SITUATION situation

ETAT_LIMITE etat_limite

[FIXER N/My/Mz valeur]

FIN_INTERACTION

Paramètres

- r Nom_diagramme : nom affecté au diagramme
- r nom_section : nom de la section sollicitée.
- r Titre diagramme : titre du diagramme.
- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE
 - o CONSTRUCTION
 - o ACCIDENTELLE
 - o SEISME
- r etat_limite :
 - o ELS (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/QUASIPERMANENT)
 - o ELS_NON_FISSURE (FREQUENT/CARACTERISTIQUE/ QUASIPERMANENT)
 - o ELU (DURABLE/ACCIDENTEL)
- r valeur : valeur de la sollicitation fixée.

Fonctions

Cette commande lance le calcul du diagramme d'interaction entre deux composantes pour une valeur de composante fixée pour l'état limite donné et la situation correspondante. Par défaut, c'est la composante Mz qui est fixée égale à 0. Le repère de référence pour les moments est le repère Brut. Les câbles de précontraintes ne sont pas pris en compte ni du point de vue de leur tension ni du point de vue de leur résistance. Pour que celles-ci soient prises en compte il faut que le diagramme soit demandé dans la cadre d'une JUSTIFICATION. Le diagramme est affiché dans la note de calcul.

Conditions d'emploi

- r Le nom de la section doit correspondre à une section préalablement définie.

Exemple

INTERACTION MYMZ SECTION TE

TITRE ` MY/MZ avec N=0 - ELS CARA en exploitation à la mise en service'

SITUATION EXPLOITATION SERVICE
ETAT_LIMITE ELS CARACTERISTIQUE
FIXER N 0 FIN_INTERACTION

Chapitre VII - Commandes avancées

VII.1 - Commande MATERIAU BETON

Libellé

MATERIAU

BETON nom_matériau

FCK fck

TITRE "titre du matériau"

PRECONTRAIN (OUI/NON)

Optionnels

[HUMIDITE_RELATIVE hum]

[RAYON_MOYEN rm]

[SECTION NORMALE/PIEU/CAISSON]

[FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE (COMPRESSION/TRACTION/TOUS)

OUI/NON]

[TYPE NORMAL/AVEC_FUMEE_DE_SILICE/SANS_FUMEE_DE_SILICE]

[CIMENT N/R/S]

[EXPOSITION (X0/XD1/2/3 XC1/2/3/4/ XS1/2)]

[**(SITUATION -----FIN_SITUATION)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau .
- r fck : résistance caractéristique du béton en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau
- r hum : Humidité relative de l'air en pourcentage (70 par défaut).
- r rm : Rayon moyen de la section en mètres (0.25 par défaut).

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type béton. Les valeurs hum et rm permettent de déterminer la loi de comportement au temps infini utilisé pour l'équilibre de la section. Il en va de même pour la fumée de silice et la classe de Ciment.

Le critère de FATIGUE SIMPLIFIEE consiste à limiter la compression du béton à $0.6 f_{ck}$ en caractéristique et la traction du béton précontraint à zéro en fréquent. Si l'on sélectionne NON en COMPRESSION ou en TRACTION l'autre option reste à OUI par défaut. Si l'on sélectionne OUI en COMPRESSION ou en TRACTION l'autre option bascule à NON.

La classe d'EXPOSITION est utilisée pour appliquer les règles de limitation des contraintes conformément au tableau 7.101NF de l'annexe Française et à l'article EC-2 7.2(102) de l'EC2-2. La classe d'EXPOSITION est en particulier utilisée pour prendre en compte la limitation de la fissuration dans les zones d'enrobage de la précontrainte et limiter la contrainte de compression dans le béton aux ELS caractéristiques (cf. EC-2 7.2(102)). La classe d'exposition à considérer pour le matériau est la classe d'EXPOSITION de la situation de projet EN EXPLOITATION. La classe XF n'est pas disponible ici car elle n'est pas pertinente pour la limitation de la fissuration.

Le TYPE de section intervient dans les limitations relatives aux contraintes et déformations. Pour une section du type PIEU, la limitation concerne la contrainte de compression comme indiqué dans le tableau ci-dessous. Pour la section du type caisson le pivot B est ramené au pivot C : la valeur de ϵ_{c3} est fixée égale à ϵ_{c2} conformément à l'EC2 pour lequel les hourdis doivent être soumis au pivot C.

Les options avancées de la sous-commande SITUATION sont présentées ci-dessous.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Si la section est soumise à une exposition différente selon la zone considérée, l'utilisateur devra définir plusieurs matériaux et les affecter à des contours différents de la section correspondant chacun à une exposition différente.
- r Si des efforts en situation de projet EN CONSTRUCTION sont envisagés et que la classe d'EXPOSITION pour celle-ci est moins sévère que celle en EXPLOITATION, elle peut être prise en compte en modifiant directement, les paramètres avancés relatifs à la zone d'enrobage dans la version avancée de la sous commande SITUATION EN CONSTRUCTION (Cf. paragraphe VIII.2) : COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT ENROBAGE_TRAC et COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT ENROBAGE_TRAC.

Exemple

```
MATERIAU BETON beton_40
  Fck 40
  TITRE "béton Fck 40"
  SECTION PIEU
  FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI
  EXPOSITION XD1
FIN_MATERIAU
```


VII.2 - Sous-commande SITUATION du matériau Béton

Libellé

MATERIAU

BETON nom_matériau

*(SITUATION situation

TITRE "titre de la situation"

Optionnels

[PONDERATION_CT_LT pond]

[ELU PARABOLE/BILINEAIRE]

[ELS PARABOLE/LINEAIRE/(EQUIVALENT n_equi)]

optionnels avances

[PARAMETRES_AVANCES

*(ALPHA_COMPRESSION_CC alpha_cc/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE TRACTION c/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE ENROBAGE_TRAC c/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT ENROBAGE_TRACTION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT ENROBAGE_TRAC c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELU PARABOLIQUE PARTIEL g_p/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE PARTIEL g_p/

DEFORMATION ELU PARABOLIQUE PIC e/

DEFORMATION ELU PARABOLIQUE RUPTURE e/

DEFORMATION ELU BILINEAIRE PIC e/

DEFORMATION ELU BILINEAIRE RUPTURE e/

DEFORMATION ELS PARABOLIQUE PIC e/
 DEFORMATION ELS PARABOLIQUE RUPTURE e/
 DEGRE ELU PARABOLIQUE LOI n/
 DEGRE ELS PARABOLIQUE LOI n)
 FIN_PARAMETRES_AVANCES]
 FIN_SITUATION)
 FIN_MATERIAU

Paramètres

- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE
 - o CONSTRUCTION
 - o ACCIDENTELLE
 - o SEISME
- r n_equi : Coefficient d'équivalence à utiliser pour la situation concernée.
- r Pond : coefficient de pondération définissant la proportion entre charge permanente et charge de courte durée lors de la construction de la loi de comportement du matériau par pondération entre la loi instantanée et la loi au temps infinie. La valeur par défaut est 0.25 soit 25% de charge de courte durée et 75% de charge de longue durée.
- r Alpha_cc : coefficient α_{cc} prenant en compte les effets de longue durée (1 par défaut).
- r c : Coefficient inférieur ou égal à 1 qui s'applique à la contrainte f_{ck} ou à la contrainte f_{ctm} pour obtenir la contrainte limite correspondante.
- r g_p : Coefficient partiel γ_c du béton à l'ELU.
- r e : Déformation ϵ_c de pic et ϵ_{cu} de rupture.
- r n : exposant de la loi parabolique (évalué selon le tableau 3.1 de l'EC2 par défaut).

Fonctions

Cette sous commande permet de définir les paramètres avancés utilisés pour définir les lois associées à la situation concernée. Les valeurs par défaut prises par CDS sont indiquées ci-dessous. Les options ELS en traction concernent à la fois les ELS_FISSURE et ELS_NON_FISSURE. Les valeurs relatives aux types de loi ELS ou ELU doivent être en accord avec le type de loi : BILINEAIRE ou PARABOLIQUE.

Avec l'option ELS EQUIVALENT la loi de comportement béton est déduite de celle de l'acier en appliquant un coefficient d'équivalence n_equi tel que le module du béton est $200\,000/n_{equi}$ en Mpa.

Le tableau ci-dessous indique les valeurs fixées pour les paramètres avancées en fonction des données renseignées. On observera que pour une même situation de projet les critères pour les ELS sont toujours par ordre de sévérité croissants en partant des ELS Caractéristiques jusqu'aux ELS quasi-permanents même si l'Eurocode ne le stipule pas explicitement. Il s'agit ici de considérer qu'un critère qui doit être vérifié aux ELS caractéristiques doit à fortiori être vérifié aux ELS fréquents et qu'un critère qui doit être vérifié aux ELS fréquents doit à fortiori être vérifié aux ELS quasi-permanents.

	EXPLOITATION	CONSTRUCTION	ACCIDENT	SEISME
c : ELS caractéristique traction	1 en BP	1 en BP	SO	SO
c : ELS caractéristique enrobage traction	1 en BP	1 en BP	SO	SO
c : ELS caractéristique compression	1 (0.6 fat.simp) (0.6 XD XF XS) (0.3 pieu)	1 (0.6 fat. simp) (0.6 XD XF XS) (0.3 pieu)	SO	SO
c : ELS fréquent traction	0 si Fat. simp. et BP Ou idem cara.	SO	SO	SO
c : ELS fréquent enrobage traction	0 si XD ou XS et BP ou idem cara.	SO	SO	SO
c : ELS fréquent compression	Idem cara.	SO	SO	SO
c: ELS quasi permanent traction	Idem freq.	0.7siBP(Céréma) ou idem fréq.	SO	SO
c : ELS quasi permanent enrobage traction	0 si XC2 XC3 XC4 et BP ou idem fréq.	0.7siBP(Céréma) 0 si XC XD XS Ou idem fréq	SO	SO
c : ELS quasi permanent compression	0.45	Idem fréq	SO	SO
gp : ELU parabolique partiel	1.5	1.5	1.2	1.3
gp : ELU bilinéaire partiel	1.5	1.5	1.2	1.3
e : ELU parabolique pic (Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{c2}	ϵ_{c2}	ϵ_{c2}	ϵ_{c2}
e : ELU parabolique rupture (Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}
e : ELU bilinéaire pic (Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}
e : ELU bilinéaire rupture (Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{cu3}	ϵ_{cu3}	ϵ_{cu3}	ϵ_{cu3}
e : ELS parabolique pic (Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}	ϵ_{cu2}
e : ELS parabolique rupture(Cf tableau 3.1 de EC2)	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}	ϵ_{c3}

Tableau des valeurs par défaut (NR : Non renseigné, SO : Sans objet)

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Les paramètres de traction ne concernent que le béton précontraint.

Exemple

```
MATERIAU BETON beton_40
  Fck 40
  TITRE "béton Fck 40 "
  SECTION PIEU
  PRECONTRAINTE NON
  FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI
  EXPOSITION XD1
  SITUATION EXPLOITATION SERVICE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    ELU BILINIEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      ALPHA_COMPRESSION_CC 0.85
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
  SITUATION EXPLOITATION INFINIE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    PONDERATION_CT_LT 0.60
    ELU BILINIEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      ALPHA_COMPRESSION_CC 0.85
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU
```

VII.3 - Commande MATERIAU ACIER

Libellé

MATERIAU

ACIER nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

FYK fyk

[TYPE T_A/T_B/T_C]

[SECTION NORMALE/PIEU/CAISSON]

[CONFINE OUI/NON]

[FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI/NON]

[FISSURATION_CRITERE_SIMPLIFIE (BA/BP) OUI/NON]

[EXPOSITION (X0/XD1/2/3 XC1/2/3/4/ XS1/2 XF1/2/3/4)]

[**(SITUATION ----- FIN_SITUATION)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fyk : résistance caractéristique de l'acier en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type acier.

Un Acier CONFINE est pris en compte en compression alors que ce n'est pas le cas s'il est non CONFINE.

Le critère de FATIGUE SIMPLIFIEE consiste à limiter la traction des aciers à 300 Mpa en ELS caractéristique.

Le critère de FISSURATION SIMPLIFIEE consiste à limiter la contrainte dans les aciers à 1000w avec w ouverture maximum des fissures déterminée en fonction de la classe d'exposition et de l'option BA/BP conformément au tableau 7.101NF de l'annexe Française de l'EC2.

La classe d'EXPOSITION est exclusivement utilisée pour limiter la contrainte de traction selon le critère de fissuration simplifiée. L'utilisateur définira autant d'aciers passifs que de classes d'exposition auxquelles est soumise la section. La classe d'exposition à considérer est la classe d'exposition de la situation de projet EN EXPLOITATION.

Le TYPE d'acier intervient dans la détermination du coefficient k et de ϵ_{uk} après plastification. Ce sont les valeurs par défaut de l'annexe C de l'EC2 qui sont prises par défaut pour ces valeurs.

Le type de SECTION intervient dans les limites de traction aux ELS.

Les options avancées de la sous-commande SITUATION sont présentées ci-dessous.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Le cas du tirant pour lequel la valeur du coefficient 1000 est ramenée à 600 conformément à la note 7.3.3 (101) de l'annexe nationale doit être traité en modifiant directement le facteur correspondant dans la version avancée de cette commande COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION et COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION (cf. paragraphes VIII.3 et VIII.4).
- r Si des efforts en situation de projet EN CONSTRUCTION sont envisagés et que la classe d'exposition pour celle-ci est moins sévère que celle en EXPLOITATION, elle peut être prise en compte en modifiant directement, la valeur w dans la version avancée de la sous-commande SITUATION EN CONSTRUCTION (cf. paragraphes VIII.3 et VIII.4).
- r Si la section comporte uniquement des câbles de précontrainte en pré-tension et aucun acier passif, la vérification de la limitation de la fissuration de la section - conformément à la note 7.3.3 (101) de l'annexe nationale - incombe alors à l'utilisateur par un contrôle visuel de la surtension dans la note de calcul.

Exemple

CDS

```
MATERIAU ACIER acier_passif_500
  TITRE "acier passif Fyk 500 "
  FYK 500
  TYPE T_C
  CONFINE NON
  FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE OUI
  FISSURATION_CRITERE_SIMPLIFIE BA OUI
  EXPOSITION XC1
```

FIN_MATERIAU

FIN_CDS

VII.4 - Sous-commande SITUATION du matériau ACIER

Libellé

MATERIAU

ACIER nom_matériau

[**(SITUATION Situation

TITRE "titre de la situation"

Optionnels

FISSURE_MAX (FREQUENTE/QUASIPERMANENTE) wmax

ELU PARFAITE/BILINEAIRE

ELS BILINEAIRE/LINEAIRE

optionnels avances

[PARAMETRES_AVANCES

*(MODULE m/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE TRACTION c/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE CONTRAINTE_ULTIME k/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE DEFORMATION_ADMISSIBLE
cud /

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE PARTIEL gs/

DEFORMATION ELU BILINEAIRE RUPTURE euk /

DEFORMATION ELU PARFAIT RUPTURE euk/

COEFFICIENT ELU PARFAIT PARTIEL gs)

FIN_PARAMETRES_AVANCES]

FIN_SITUATION)

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE
 - o CONSTRUCTION
 - o ACCIDENTELLE
 - o SEISME
- r wmax : valeur maximale de l'ouverture de fissure en mm. La valeur par défaut est déterminée en fonction de la classe d'exposition et de l'option BA/BP correspondante en application du tableau 7.101NF de l'annexe nationale de IEC2-2.
- r m : Module d'élasticité de l'acier passif en Mpa. La valeur par défaut est 200 000Mpa.
- r c : Coefficients appliqués à f_{yk} pour déterminer les limites en contraintes correspondantes.
- r cud : rapport $\epsilon_{ud} / \epsilon_{uk}$
- r k : Coefficient k de l'annexe C.
- r gs : Coefficient partiel γ_s de l'acier à l'ELU (Par défaut : 1.00 en ACCIDENT ou SEISME, 1.15 sinon).
- r euk : Déformation de rupture ϵ_{uk} .

Fonctions

Cette sous commande permet de définir les paramètres avancés utilisés pour définir les lois associées à la situation concernée. Les valeurs par défaut prises par CDS sont indiquées dans le tableau ci-dessous. La valeur de gp est fixée à 1.15.

FISSURES_MAX : La valeur wmax par défaut est prise égale à 0.3mm en BA et 0.2mm en BP pour les classes d'exposition XO et XC sous combinaison fréquente et par extension sous combinaison quasi permanente (*). Elle est fixée à 0.2mm en BA pour les classes d'exposition XD et XS sous combinaison fréquente et par extension sous combinaison quasi permanente (*)(**). Ces valeurs peuvent être modifiées par l'utilisateur en introduisant directement la valeur de l'ouverture de fissure max avec l'option FISSURE_MAX en précisant si elle s'applique sous combinaison fréquente ou sous combinaison quasi-permanente. C'est ainsi que l'utilisateur pourra modifier la valeur de wmax pour le cas de la situation de projet EN CONSTRUCTION en dérogation de la valeur EN EXPLOITATION.

PARAMETRES_AVANCES : Le tableau ci-dessous indique les valeurs par défaut prises par les paramètres avancés. Si l'utilisateur surcharge un de ces coefficients de la sous-commande PARAMETRES_AVANCES c'est la valeur fixée par ce paramètre indépendamment des autres options qui sera utilisée comme contrainte limite.

Par exemple si l'on veut déroger à la valeur de 300 Mpa due à la fatigue simplifiée, il suffira de modifier le coefficient qui appliqué à f_{yk} donnera la valeur souhaitée par exemple 0.5 pour obtenir 250Mpa ou 0.8 pour obtenir 400 Mpa.

(*) Il s'agit ici de considérer qu'un critère qui doit être vérifié aux ELS caractéristiques doit à fortiori être vérifié aux ELS fréquents et qu'un critère qui doit être vérifié aux ELS fréquents doit à fortiori être vérifié aux ELS quasi-permanents.

(**) La non décompression est une vérification propre au béton et n'est donc pas traitée ici mais lors du traitement de la commande relative au Béton.

	EXPLOITATION	CONSTRUCTION	ACCIDENT	SEISME
c : ELS caractéristique traction	0.80 ⁽¹⁾ (2/3 pour pieux)	0.80 ⁽¹⁾ (2/3 pour pieux)	SO	SO
c : ELS caractéristique compression	0.80 (2/3 pour pieux)	0.80 (2/3 pour pieux)	SO	SO
c : ELS fréquent traction	Idem Cara ⁽²⁾	SO	SO	SO
c : ELS fréquent compression	NR	SO	SO	SO
c : ELS quasi permanent traction	Idem Cara ⁽²⁾	Idem Cara ⁽²⁾	SO	SO
c : ELS quasi permanent compression	NR	NR	SO	SO
k : ELU bi-linéaire - contrainte ultime	1.05 (A) 1.08 (B) 1.15 (C)	1.05 (A) 1.08 (B) 1.15 (C)	1.05 (A) 1.08 (B) 1.15 (C)	1.05 (A) 1.08 (B) 1.15 (C)
cud : ELU bilinéaire – rapport $\epsilon_{ud} / \epsilon_{uk}$	0.90	0.90	0.90	0.90
gs : ELU bi-linéaire coefficient partiel	1.15	1.15	1	1
euk : ELU bi-linéaire – déformation rupture	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)
euk : ELU parfait - déformation rupture	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)	2.5/100 (A) 5/100 (B) 7.5/100 (C)
gs : ELU parfait coef. partiel	1.15	1.15	1	1

Tableau des valeurs par défaut (NR : Non renseigné, SO : Sans objet)

⁽¹⁾ : La valeur de la contrainte limite est obtenue en prenant la valeur minimale obtenue en considérant l'ensemble des critères applicables : fatigue, fissuration ou coefficient c appliqué à f_{yk} .

⁽²⁾ : Un critère qui doit être vérifié aux ELS caractéristiques doit à fortiori être vérifié aux ELS fréquents et un critère qui doit être vérifié aux ELS fréquents doit à fortiori être vérifié aux ELS quasi-permanents.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```
MATERIAU ACIER acier_passif_500
  TITRE "acier passif Fyk 500 "
  Fyk 500
  CONFINE OUI
  SECTION PIEUX
  TYPE C
  SITUATION EXPLOITATION SERVICE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    ELU BILINIEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      MODULE 190000
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
  SITUATION EXPLOITATION INFINIE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    ELU BILINEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      MODULE 190000
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU
```

VII.5 - Commande MATERIAU PRECONTRAINTE

Libellé

MATERIAU

PRECONTRAINTE nom_matériau

FP01K fp01k

FPK fpk

TITRE "titre du matériau"

Optionnels

[TYPE TORON/FIL/BARRE]

[**(SITUATION ----- FIN_SITUATION)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fp01k : Limite élastique conventionnelle en Mpa.
- r fpk : résistance caractéristique de l'acier de précontrainte en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type précontrainte. Le type TORON/FIL/BARRE intervient dans l'affectation du module d'élasticité (Cf. Tableau ci-dessous).

Les options avancées de la sous-commande SITUATION sont présentées ci-dessous.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```
MATERIAU Precontrainte FILl
  TITRE "Précontrainte fil "
  FP01K 1640
  FPK   1860
FIN_MATERIAU
```

VII.6 - Sous-commande SITUATION du matériau PRECONTRAINT

Libellé

MATERIAU

PRECONTRAINT nom_matériau

[**(SITUATION Situation

TITRE "titre de la situation"

Optionnels

[ELU PARFAITE/BILINEAIRE]

[ELS BILINEAIRE/LINEAIRE]

optionnels avances

[PARAMETRES_AVANCES

*(MODULE m

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE TRACTION c/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE CONTRAINTE_ULTIME k/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE DEFORMATION_ADMISSIBLE
cud/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE PARTIEL gp/

DEFORMATION ELU BILINEAIRE RUPTURE euk/

CONTRAINT ELU PARFAIT COMPRESSION s/

CONTRAINT ELU PARFAIT TRACTION s/

COEFFICIENT ELU PARFAIT PARTIEL gp)

FIN_PARAMETRES_AVANCES]

FIN_SITUATION)

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE
 - o CONSTRUCTION
 - o ACCIDENTELLE
 - o SEISME
- r m : Module d'élasticité de l'acier de précontrainte en Mpa. La valeur par défaut est 205 000Mpa sauf pour les TORONS qui est alors de 195 000.
- r c : Coefficients appliqués à fpk pour déterminer les limites en contraintes correspondantes.
- r cud : rapport $\epsilon_{ud} / \epsilon_{uk}$
- r k : Coefficient k de l'annexe C.
- r gp : Coefficient partiel γ_p de l'acier de précontrainte à l'ELU (Par défaut : 1.00 en ACCIDENT ou SEISME, 1.15 sinon).
- r euk : Déformation de rupture ϵ_{uk} .
- r s : contrainte limite en Mpa.

Fonctions

Cette sous commande permet de définir les paramètres avancés utilisés pour définir les lois associées à la situation concernée. Les valeurs par défaut prises par CDS sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

	EXPLOITATION	CONSTRUCTION	ACCIDENT	SEISME
C : ELS caractéristique traction	NR	NR	SO	SO
C : ELS caractéristique compression	0.80 fpk	Min(0 ; 77 fpk 0.87 fp01k)	SO	SO
C : ELS fréquent traction	0.80 fpk	Min(0 ; 77 fpk 0.87 fp01k)	SO	SO
C : ELS fréquent compression	NR	NR	SO	SO
C : ELS quasi permanent traction	0.80 fpk	Min(0 ; 77 fpk 0.87 fp01k)	SO	SO
C : ELS quasi permanent compression	NR	NR	SO	SO
k : ELU bi-lineaire rapport contrainte ultime	1.1	1.1	1.1	1.1
cud : ELU bi-lineaire – rapport	0.90	0.90	0.90	0.90

$\epsilon_{ud} / \epsilon_{uk}$				
gp : ELU bi-lineaire coefficient partiel	1.15	1.15	1	1
euk : ELU bi-lineaire rapport rupture	0.02/0.9	0.02/0.9	0.02/0.9	0.02/0.9
s : ELU parfait – Contrainte limite compression/traction	fpok	fpok	fpok	fpok
gp : ELU parfait - coefficient partiel	1.15	1.15	1	1

Tableau des valeurs par défaut (NR : Non renseigné, SO : Sans objet)

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r Les paramètres de traction ne concernent que le béton précontraint.

Exemple

```

MATERIAU PRecontrainte FILl
  TITRE "Précontrainte fil "
  FP01K 1640
  FPK 1860
  TYPE FIL
  SITUATION EXPLOITATION SERVICE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    ELU BILINIEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      MODULE 190000
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
  SITUATION EXPLOITATION INFINIE
    TITRE ` EXPLOITATION EN SERVICE `
    ELU BILINIEAIRE
    PARAMETRES_AVANCES
      MODULE 190000
    FIN_PARAMETRES_AVANCES
  FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU

```

VII.7 - Commande MATERIAU CHARPENTE

Libellé

MATERIAU

CHARPENTE nom_matériau

FY fy

FU fu

TITRE "titre du matériau"

Optionnels

[**(SITUATION ----- FIN_SITUATION)]

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r fy : Limite élastique de l'acier en Mpa.
- r fu : Limite de rupture de l'acier en Mpa.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.

Fonctions

Cette commande définit un matériau du type Acier de charpente.

L'utilisateur a la possibilité de surcharger les valeurs par défaut en utilisant les paramètres définis ci-dessous. Les coefficients pris par défaut correspondent aux classes de vérification I et II. L'utilisateur doit donc vérifier que le voilement de la section ne fait pas rentrer la justification de la section en classe III ou IV.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.
- r La section ne subit pas de voilement.

Exemple

```
MATERIAU CHARPENTE ac_charpente_355
  TITRE "acier de charpente S355 N/NL "
  Fy 355
  Fu 490
FIN_MATERIAU
```

VII.8 - Sous-commande SITUATION du matériau CHARPENTE

Libellé

MATERIAU

CHARPENTE nom_matériau

[**(SITUATION Situation

TITRE "titre de la situation"

Optionnels

ELU PARFAITE/BILINEAIRE

optionnels avances

[PARAMETRES_AVANCES

*(MODULE m/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE TRACTION c/

COEFFICIENT ELS CARACTERISTIQUE COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS FREQUENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT TRACTION c/

COEFFICIENT ELS QUASIPERMANENT COMPRESSION c/

COEFFICIENT ELU BILINEAIRE PARTIEL gs/

DEFORMATION ELU BILINEAIRE RUPTURE euk :

DEFORMATION ELU PARFAIT RUPTURE euk/

COEFFICIENT ELU PARFAIT PARTIEL gs)

FIN_PARAMETRES_AVANCES]

FIN_SITUATION)

FIN_MATERIAU

Paramètres

r Situation :

- EXPLOITATION SERVICE
- EXPLOITATION INFINIE
- CONSTRUCTION

- ACCIDENTELLE
 - SEISME
- r m : Module d'élasticité de l'acier passif en Mpa. La valeur par défaut est 210 000Mpa.
- r c : Coefficients appliqués à f_y pour déterminer les limites en contraintes correspondantes.
- r gs : Coefficient partiel γ_s de l'acier à l'ELU (Par défaut : 1.00).
- r euk : Déformation de rupture ϵ_{uk} .

Fonctions

Cette sous commande permet de définir les paramètres avancés utilisés pour définir les lois associées à la situation concernée. Les valeurs par défaut prises par CDS sont indiquées ci-dessous.

	EXPLOITATION	CONSTRUCTION	ACCIDENT	SEISME
c : ELS caractéristique traction	1	1	SO	SO
c : ELS caractéristique compression	1	1	SO	SO
c : ELS fréquent traction	1	1	SO	SO
c : ELS fréquent compression	1	1	SO	SO
c : ELS quasi permanent traction	1	1	SO	SO
c : ELS quasi permanent compression	1	1	SO	SO
gs : ELU bi-lineaire coefficient partiel	1	1	1	1
euk : ELU bi-lineaire – déformation rupture	15*Fy/E	15*Fy/E	15*Fy/E	15*Fy/E
euk : ELU parfait - déformation rupture	15*Fy/E	15*Fy/E	15*Fy/E	15*Fy/E
gs : ELU parfait coef. partiel	1	1	1	1

Tableau des valeurs par défaut (NR : Non renseigné, SO : Sans objet)

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```
MATERIAU CHARPENTE ac_charpente_355
TITRE "acier de charpente S355 N/NL "
```

```
Fy 355
Fu 490
SITUATION EXPLOITATION SERVICE
  TITRE 'EXPLOITATION EN SERVICE '
  ELU BILINEAIRE
  PARAMETRES_AVANCES
    MODULE 200000
  FIN_PARAMETRES_AVANCES
FIN_SITUATION
SITUATION EXPLOITATION INFINIE
  TITRE 'EXPLOITATION EN SERVICE '
  ELU BILINEAIRE
  PARAMETRES_AVANCES
    MODULE 200000
  FIN_PARAMETRES_AVANCES
FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU
```

VII.9 - Commande MATERIAU SPECIFIQUE

Libellé

MATERIAU

SPECIFIQUE nom_matériau

TITRE "titre du matériau"

**(SITUATION Situation

TITRE "titre de la situation"

*(ELU/CARACTERISTIQUE/FREQUENT/QUASIPERMANENT

[MAX eps_max]

[MIN eps_min]

**(INTERVALLE

EPSILON eps *(A0 a₀/A1 a₁/A2 a₂/A3 a₃)

FIN_INTERVALLE)

FIN_ELU/FIN_CARAFIN_FREQUENT/FIN_QUASIPERMANENT)

FIN_SITUATION)

FIN_MATERIAU

Paramètres

- r nom_matériau : nom du matériau.
- r "titre du matériau" : titre affecté au matériau.
- r Situation :
 - o EXPLOITATION SERVICE
 - o EXPLOITATION INFINIE
 - o CONSTRUCTION
 - o ACCIDENTELLE
 - o SEISME
- r Eps_max : valeur maximale limite de la déformation du matériau au-delà de laquelle le matériau ne présente plus de raideur. Pas de limite par défaut.
- r Eps_min : valeur minimale limite de la déformation du matériau en-deçà de laquelle le matériau ne présente plus de raideur. Pas de limite par défaut.
- r Eps : déformation du début de l'intervalle.
- r a_i : valeur du coefficient correspondant (0 par défaut).

Fonctions

Cette commande définit un matériau spécifique pour lequel les lois de comportement sont directement définies. Les intégrations effectuées étant analytiques, et non numériques, la loi déformation – contrainte est décrite sur un ensemble d'intervalles et prend, sur chacun de ceux-ci, la forme d'un polynôme de degré inférieur ou égal à 3. Le nombre d'intervalles n'étant pas limité, on peut ainsi approcher de manière aussi précise que voulu n'importe quelle loi de comportement.

Les lois de comportement doivent être définies pour les situations et les états limites auxquels sera soumis le matériau. Les lois de comportement doivent être définies une fois leurs coefficients partiels éventuels appliqués ainsi que leurs coefficients d'affinité. Toutes les situations doivent être envisagées pour chacun des matériaux constitutifs de la section même si certains matériaux ont le même comportement d'une situation à une autre. Par exemple, l'acier a le même comportement à la mise en service et au temps infini mais les deux situations seront définies.

La loi de comportement est définie par des cubiques pour des intervalles de déformation consécutifs. Chaque intervalle est défini par une déformation de début d'intervalle et les coefficients de la cubique correspondante : $\sigma = a_0 + a_1x + a_2x^2 + a_3x^3$ avec x valeur de la déformation au point considéré. Par défaut, les coefficients sont égaux à 0.

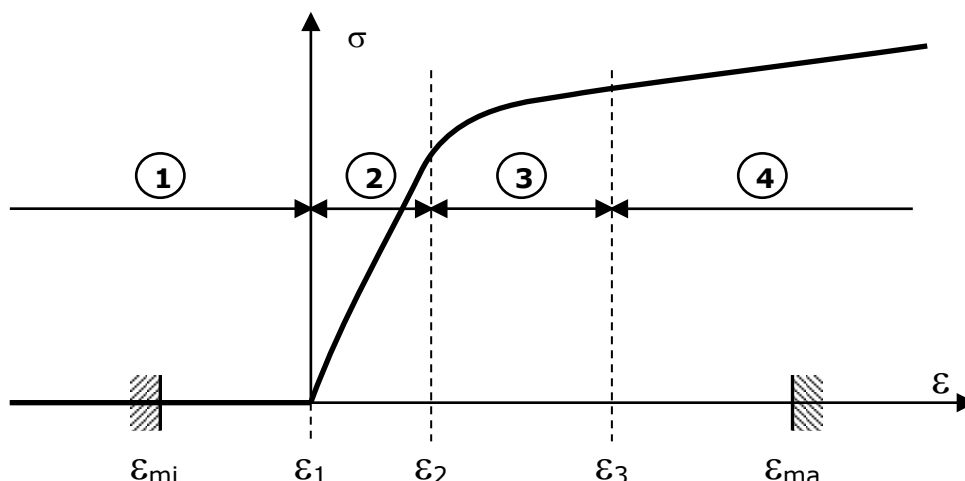


Figure 3 : Exemple de loi avec 4 intervalles

La première cubique et la dernière cubique sont prolongées sur l'intervalle infini correspondant. Le premier intervalle va de moins l'infini à la valeur de déformation du début du deuxième intervalle. Le dernier intervalle est défini jusqu'à la valeur infinie de la déformation. La première déformation du premier intervalle n'est donc pas utilisée par CDS.

Les unités sont le Mpa pour les contraintes et les déformations sont positives en compression.

Les valeurs max et min indiquent les valeurs limites au sens des Eurocodes des comportements des matériaux. Au-delà de ces limites le matériau n'est plus pris en compte dans la partie résistante de la section et soit la section sera déclarée rompue soit ce dépassement sera signalé après recherche de l'équilibre en fonction du choix de l'utilisateur. Par défaut, le matériau n'a pas de limites.

Conditions d'emploi

- r Le nom du matériau ne doit pas être déjà utilisé.

Exemple

```

MATERIAU SPECIFIQUE FIL
  TITRE "FIL lineaire bornee en cara et plastique parfait aux ELU"
  SITUATION EXPLOITATION SERVICE
    TITRE " SITUATION EXPLOITATION SERVICE "
    FREQUENT
      INTERVALLE EPSILON 0 A1 100000 FIN_INTERVALLE
    FIN_FREQUENT
  CARACTERISTIQUE
    MAX 0.002
    MIN -0.002
    INTERVALLE EPSILON 0 A1 100000 FIN_INTERVALLE
  FIN_CARACTERISTIQUE
  ELU
    INTERVALLE EPSILON -100 A0 -200 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON -0.002 A1 100000 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON 0.002 A0 200 FIN_INTERVALLE
  FIN_ELU
  FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU

# exemple de BFUP
SITUATION EXPLOITATION SERVICE
  TITRE "ELU"
  # certains parametres dependent de la hauteur de la section
  ELU
    MAX 2.84E-3
    MIN -6E-2
    INTERVALLE EPSILON -0.01 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON -6.0E-2 A0 -5.33 A1 -8.88e+1 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON -4.62E-3 A0 -4.92 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON -8.94E-5 A0 0.0 A1 5.5e+4 FIN_INTERVALLE
    INTERVALLE EPSILON 1.80E-3 A0 99.2 FIN_INTERVALLE
  FIN_ELU
  FIN_SITUATION
FIN_MATERIAU

```

Chapitre VIII - Commandes de Cisaillement

Le Cisaillement des sections dans CDS concerne des sections comportant un contour extérieur ou bien une charpente. C'est le cisaillement sous les efforts tranchants et sous la torsion qui est envisagé. Cds calcule les éléments de réduction propres à ces sollicitations dans le cadre de la théorie des parois minces. Il fournit en particulier les caractéristiques sectorielles nécessaires à une étude dans le cadre de la torsion non uniforme ou gênée.

Le calcul du cisaillement des sections à parois minces suppose la connaissance des parois de la section. Dans le cas d'une section comportant des éléments de charpente, celles-ci sont données directement. Par contre, dans le cas d'une section définie par contours, la détermination des parois minces suppose la connaissance d'informations complémentaires afin que Cds puisse en déduire les parois équivalentes. Ces données complémentaires sont désignées sous le terme de morphologie. Une sous commande de la commande SECTION permet de définir cette morphologie.

VII.10 - Notion de Morphologie des sections à contours

Pour déduire, les parois équivalentes d'une section définie par contours, il faut déterminer la ligne moyenne de la section. Cette détermination passe par la désignation par l'utilisateur de NŒUDS reliés par des branches et de BRANCHES PENDANTES dont une des extrémités ne comporte pas de NŒUD. Une section à contours est donc formée de BRANCHES qui relient des NŒUDS ou de BRANCHES PENDANTES.

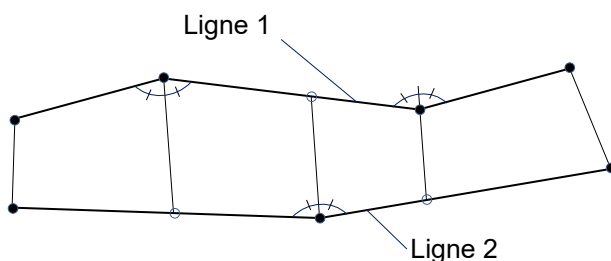
Le calcul des parois équivalentes se fait en trois étapes :

- Traitement de chaque branche reliant deux nœuds,
- Traitement des branches pendantes,
- Traitement des nœuds.

Traitement des branches

Une branche est délimitée par deux lignes brisées orientées dans le même sens et comportant chacune un certain nombre de points intermédiaires fournis par l'utilisateur.

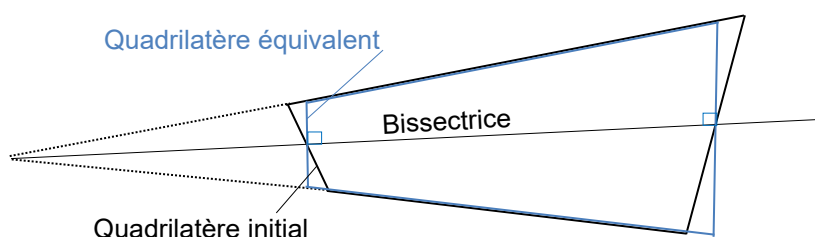
Dans un premier temps, Cds élimine sur chaque ligne les points trop proches de leurs voisins à une tolérance géométrique près. Ensuite, Cds mène depuis chaque point intermédiaire de chacune des deux lignes ainsi réduites des bissectrices qui génèrent sur la ligne opposée des points supplémentaires ou homologues. A l'issue de ce traitement Cds élimine à nouveau sur chaque ligne les points trop proches de leurs voisins à une tolérance près. Si à l'issue de ce traitement chaque ligne possède le même nombre de points que sa vis-à-vis alors le traitement de la paroi est déclaré correct, sinon la ligne moyenne est déclarée indéterminée et un message d'erreur est affiché.



- Points fournis
- Points déterminés sur la bissectrice de l'angle opposé

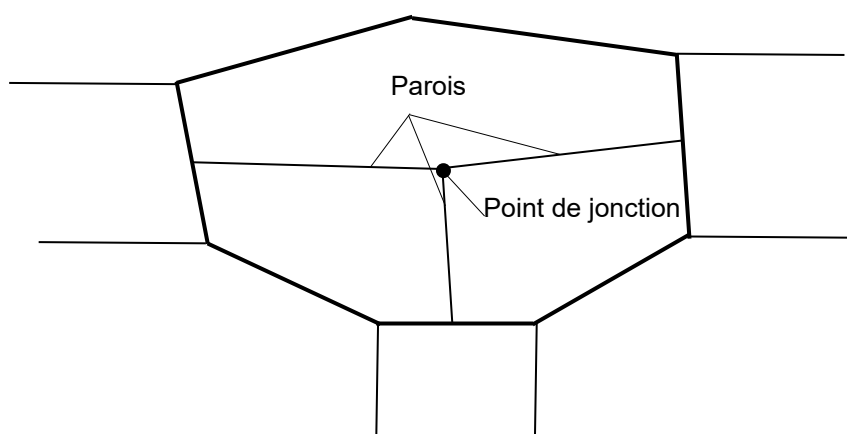
Le découpage ainsi mis en œuvre transforme la branche en une suite de quadrilatères connectés par un de leurs côtés.

Pour chaque quadrilatère, Cds trace la bissectrice entre les deux lignes en vis-à-vis et son intersection avec les extrémités de chaque quadrilatère définit les points de jonction de la paroi équivalente. Un quadrilatère équivalent en est déduit en considérant le trapèze isocèle formé par les perpendiculaires à la bissectrice et les lignes en vis-à-vis. Les épaisseurs origine et extrémité de la paroi équivalente sont déterminées de façon à conserver l'aire du quadrangle initial ainsi que le rapport des épaisseurs mesurées sur la bissectrice.



Traitement des nœuds

Le traitement des branches a permis de déterminer sur la frontière de chaque nœud, un nombre p de points de la ligne moyenne égal au nombre de branches connecté par le nœud. Le point de jonction de chacune de ces extrémités de branches est déterminé comme étant le centre de gravité du nœud. Les épaisseurs associées à chaque paroi interne au nœud sont calculées de manière à conserver l'aire globale du nœud.



VII.11 - Sous-Commande MORPHOLOGIE

Libellé

MORPHOLOGIE

```
[**(NŒUD No_Noeud
      (**CONTOUR nom_contour POINT no_point)
```

```
FIN_NOEUD)]
```

```
[**(BRANCHES_PENDANTES
      (**CONTOUR nom_contour POINT no_point)
```

```
FIN_BRANCHES_PENDANTES)]
```

FIN_MORPHOLOGIE

Paramètres

- r No_noeud : Numéro affecté au noeud .
- r Nom_contour : nom du contour auquel appartient le point no_point.
- r No_point : Numéro du point définissant le noeud morphologique ou la branche pendante.

Fonctions

Cette sous-commande de la commande SECTION permet de définir la morphologie d'une section, c'est-à-dire les éléments géométriques complémentaires permettant à CDS de déduire une ligne moyenne de la section à partir des contours. Les notions de NŒUDS et de BRANCHE PENDANTES sont précisées dans le paragraphe « Détermination des parois minces » du chapitre Théorie des parois Minces ».

Les Nœuds et les branches pendantes sont définis en pointant sur des points de contour identifiés par le nom du contour et le numéro du point de ce contour.

Dans le cas des nœuds, le parcours des points est réalisé dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Cf. figure ci-dessous).

Dans le cas des branches pendantes c'est le premier point rencontré sur l'extrémité de la branche dans un parcours dans le sens inverse des aiguilles d'une montre (Cf. figure ci-dessous).

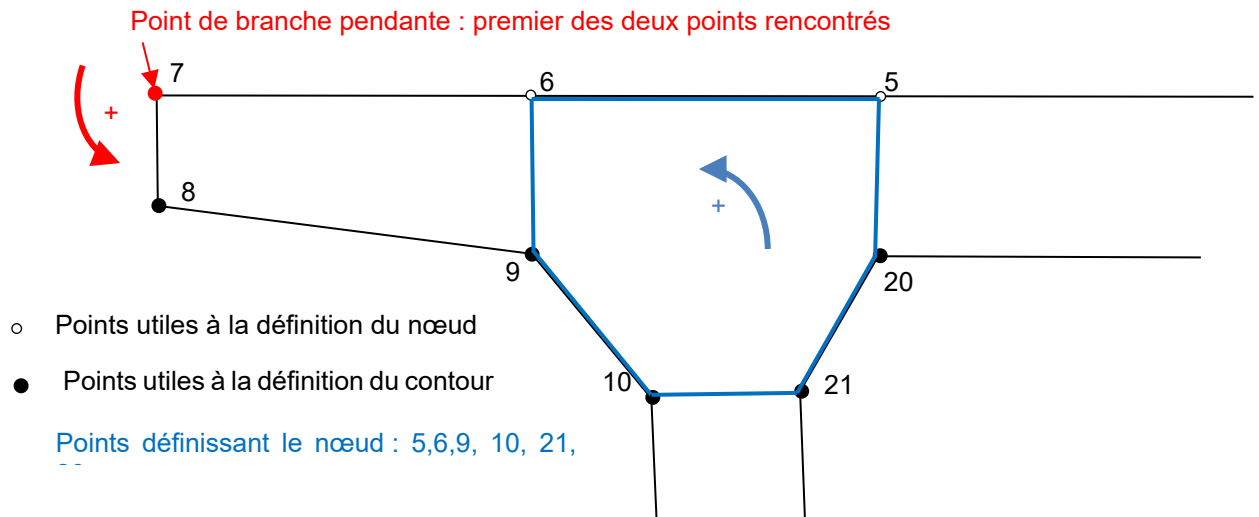
Conditions d'emploi

- r Cette sous commande ne concerne qu'une section comportant un seul contour extérieur et aucune Charpente.
- r Une morphologie doit comporter au moins une branche pendante ou un nœud.
- r Une seule morphologie peut être définie pour une section.
- r Les nœuds sont numérotés de façon quelconque mais sans doublons.
- r Les branches pendantes peuvent être introduites dans n'importe quel ordre.

Conseils méthodologiques

Les NŒUDS de la morphologie ont pour fonction de séparer les branches et de permettre à CDS de faire un traitement correct de celles-ci sans message d'erreur.

A cet effet, l'utilisateur identifiera sur sa section les nœuds en englobant dans le nœud les goussets éventuels s'ils ont une longueur du même ordre que l'épaisseur des branches connectés par le nœud. Puis il ajoutera dans la définition par contours les points nécessaires à la délimitation du nœud sur le contour.



Exemple

Exemple de SECTION comportant quatre nœuds et deux branches pendantes tels qu'indiqués sur la figure précédente.

SECTION

..... *

MORPHOLOGIE

NŒUD 1

CONTOUR context POINT 5
 CONTOUR context POINT 6
 CONTOUR context POINT 9
 CONTOUR context POINT 10
 CONTOUR contint POINT 21
 CONTOUR contint POINT 20

FIN_NOEUD

NŒUD 2

FIN NŒUD

NŒUD 3

FIN NŒUD

NŒUD 4

FIN NEUD

BRANCHES_PENDANTES
CONTOUR context POINT 7
CONTOUR context POINT x
FIN_BRANCHES_PENDANTE

FIN_MORPHOLOGIE
FIN_SECTION

VII.12 - Commande CISAILLEMENT

Libellé

```
CISAILLEMENT SECTION nom_section
    [TITRE 'titre de la commande']
    [DISCRETISATION pas_discretisation]
    [REPERE_EFFORTS (BRUT/GEOMETRIQUE)]
    [**(EFFORTS 'titre' FY fy FZ fz MX mx)]
FIN_CISAILLEMENT
```

Paramètres

- r Nom_section : nom de la section concernée .
- r Pas_discretisation : valeur du pas de discrétisation des parois. Par défaut, il n'y a aucune discrétisation.
- r Fy, fz et mx : valeurs des efforts de cisaillement et de torsion appliqués à la section en considérant le torseur de droite et le repère défini précédemment.

Fonctions

Cette commande permet de demander à CDS de calculer les caractéristiques de cisaillement d'une section et les contraintes sous des sollicitations tangentes.

Les caractéristiques calculées et éditées sont les suivantes :

- le centre de torsion,
- les inerties de torsion symétrique et antisymétrique,
- les sections réduites d'effort tranchant,
- l'inertie sectorielle principale,
- l'inertie polaire tangente,
- les aires sectorielles,
- les flux de cisaillement unitaires,
- la torsion antisymétrique,
- les contraintes de cisaillement sous les efforts appliqués.

Le pas de discrétisation permet d'obtenir des valeurs curvilignes en plusieurs points le long des parois.

Le repère de définition des efforts est soit le repère BRUT soit le repère GEOMETRIQUE de définition de la section.

Conditions d'emploi

- r Cette commande ne s'applique qu'à une section comportant soit un seul contour extérieur soit une Charpente.
- r Dans le cas d'une section à contours, une morphologie de la section devra être définie.

Exemple

```
CISAILLEMENT SECTION Sect
  TITRE ` etude du cisaillement avec un pas de 10 cm`
  DISCRETISATION 0.10
  REPERE_EFFORTS Brut
  EFFORTS `titre1` FY 2 FZ 10 MX 20
  EFFORTS `titre2` FY 1 FZ 15 MX 25
FIN_CISAILLEMENT
```

Chapitre IX - Conventions

VIII.1 - Repère de définition

Tous les éléments géométriques de la section courante sont décrits dans un système d'axes Oyz contenu dans son plan et d'origine O quelconque, représenté conventionnellement avec Oy horizontal et orienté de gauche à droite, Oz étant vertical et ascendant. L'axe Ox normal au plan de la section complète le trièdre orthonormé direct Oxyz. **Il n'est pas possible de changer de repère de "définition" pendant l'étude d'une section. Les points définissant les contours doivent être introduits dans le sens inverse de aiguilles d'une montre.**

VIII.2 - Repère des sollicitations

Les sollicitations sont exprimées, fournies et éditées dans un repère qui peut être le repère de définition, le repère principal d'inertie brute, ou un repère quelconque. Le programme donne la possibilité de changer de repère des "sollicitations" en cours de calcul pour la même section.

VIII.3 - Sollicitations

Dans le programme CDS, les sollicitations sont les efforts normaux et les moments de flexion appliqués à la section et projetés selon les axes du repère choisi. Elles comprennent les trois composantes de la résultante totale et les trois composantes du moment résultant.

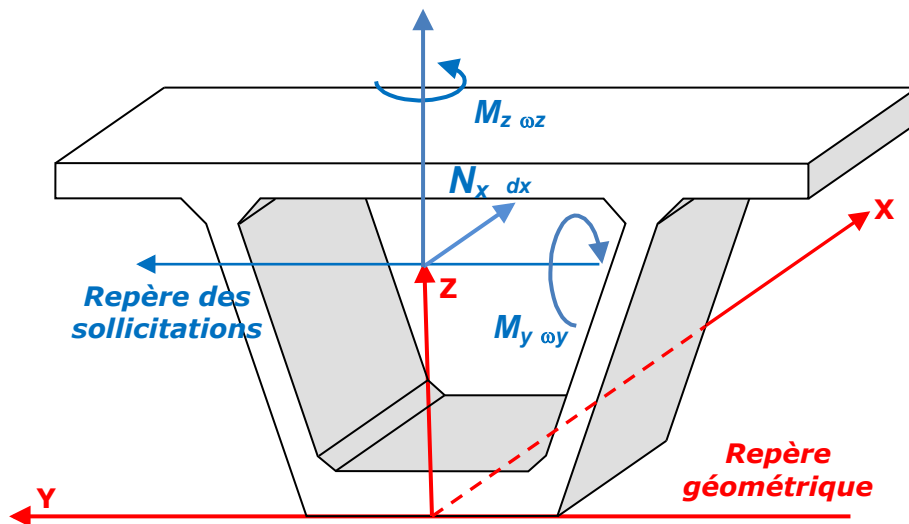


Figure 4 – Conventions de signe des efforts

Pour les calculs en flexion composée déviée, les conventions suivantes sont adoptées, en vue de respecter certains usages de la résistance des matériaux :

- L'effort normal N est positif s'il s'agit d'une compression.
- Le moment de flexion M_y est positif s'il comprime les fibres situées du côté des z positifs.
- Le moment de flexion M_z est positif s'il comprime les fibres situées du côté des y négatifs.
- La déformation unitaire est négative pour un allongement.

- La rotation unitaire Ω_y est positive pour une flexion simple et un moment M_y positif.
- La rotation unitaire Ω_z est positive pour une flexion simple et un moment M_z positif.

L'effort normal et les moments de flexion issus de l'intégration des contraintes normales liées à un état de déformations de la section sont appelés "sollicitations internes", pour les distinguer des sollicitations externes (ou appliquées) qu'on nomme plus simplement "sollicitations".

Toutefois, pour respecter les conventions habituelles du béton précontraint, si l'on tend un câble la variation de tension est positive.

VIII.4 - Plan de déformation

On se place dans l'hypothèse de conservation des sections planes. Le torseur des déformations en un point courant de la section, de coordonnées y et z , se réduit alors à la déformation (longitudinale) unitaire $\varepsilon = \varepsilon_o + z\omega_y - y\omega_z$.

ε_o désigne la déformation unitaire à l'origine, ω_y la rotation unitaire autour de l'axe O_y et ω_z la rotation unitaire autour de l'axe O_z . On peut regrouper ces 3 valeurs en un 'vecteur déformation' δ et écrire :

$$\delta = \begin{Bmatrix} \varepsilon_o \\ \omega_y \\ -\omega_z \end{Bmatrix} \text{ et } \varepsilon = (L_{yz})\delta$$

Si les rotations unitaires ne sont pas toutes deux nulles, il existe un axe neutre d'équation : $\varepsilon=0$.

On peut interpréter le plan de déformation $\varepsilon=f(y,z)$ comme la déformée de la section située en $x + dx$, avec $dx=1.0$ lorsque la section située en x reste fixe.

VIII.5 - Conventions de signe pour les résultats des calculs

Les résultats dans la note de calcul et les résultats graphiques adoptent les conventions suivantes :

- une contrainte positive est une compression,
- une contrainte négative est une traction,
- une déformation positive est un raccourcissement,
- une déformation négative est un allongement.

VIII.6 - Conventions de signe pour le dessin des lois

Le dessin de chaque loi est une représentation physique des contraintes en fonction des déformations.

Les déformations négatives (ou allongements) sont dessinées à gauche de l'axe vertical, les contraintes négatives (ou tractions) sont dessinées au-dessous de l'axe horizontal.

VIII.7 - Unités employées

Longueur	le mètre (m)
Force	le méganewton (MN)
Moment	le méganewton.mètre (MN.m)
Contrainte	le mégapascal (Mpa)
Angle	le degré (sens positif de Oy vers Oz)

Exceptions :

Diamètre nominal d'un acier passif ou d'un câble	le millimètre (mm)
Aire d'un câble ou d'un acier passif	le millimètre carré (mm ²)
Diamètre d'encombrement d'un acier passif	le millimètre (mm)
Diamètre d'encombrement d'un câble	le millimètre (mm)
Diamètre de gaine d'un câble	le millimètre (mm)
Enrobage minimum d'un câble ou d'un acier passif	le millimètre (mm)
Ouverture fissure max	le millimètre (mm)

Chapitre X - Méthodes et hypothèses de calcul sous sollicitations normales

IX.1 - Flexion composée déviée en béton armé

On présente ci-dessous la manière d'aborder le calcul en élasticité non linéaire d'une section de béton armé sollicitée normalement et supposée demeurer plane après déformation. On se reportera au chapitre 2 CONVENTIONS pour certaines hypothèses et notations.

Compte tenu des hypothèses relatives aux lois de comportement des matériaux, on sait calculer analytiquement les intégrales représentant les sollicitations induites par une déformation donnée. Dans la formulation, on distingue le béton qui a une répartition de surface et les aciers passifs considérés comme ponctuels, pour lesquels les formules se simplifient.

Le problème inverse d'étude de l'équilibre d'une section sous sollicitations imposées n'est soluble que numériquement, par une méthode itérative.

Les sollicitations, ainsi que les sollicitations internes déduites des contraintes dans le béton et les aciers passifs peuvent se mettre globalement sous la forme :

$$S = \begin{bmatrix} N \\ M_y \\ -M_z \end{bmatrix}; R_b = \begin{bmatrix} N_b \\ M_{yb} \\ -M_{zb} \end{bmatrix}; R_s = \begin{bmatrix} N_s \\ M_{ys} \\ -M_{zs} \end{bmatrix}$$

Pour alléger les formules, on pose :

$$\delta = \begin{bmatrix} \varepsilon_o \\ \omega_y \\ -\omega_z \end{bmatrix}; L_{yz} = \begin{bmatrix} 1 & z & y \end{bmatrix}; C_{yz} = \begin{bmatrix} 1 \\ z \\ y \end{bmatrix}; M_{yz} = C_{yz} L_{yz} = \begin{bmatrix} 1 & z & y \\ z & z^2 & zy \\ y & yz & y^2 \end{bmatrix}$$

Le caractère plan des déformations et les hypothèses retenues permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} e &= L_{yz} d \\ e_b &= -e \\ e_s &= e \end{aligned}$$

ε , ε_b et ε_s sont des fonctions linéaires des coordonnées y et z du point courant.

IX.2 - Sollicitations internes dues au béton

Les sollicitations internes s'écrivent :

$$R_b = \int_{\bar{A}_b} \sigma_b (\varepsilon_b) C_{yz} dA_b$$

R_b dépend de δ par l'intermédiaire de σ_b et de la section $\bar{A}_b$. Lorsque δ varie de $d\delta$, R_b varie de dR_b qui, si on néglige la variation de $\bar{A}_b$, s'exprime par :

$$dR_b = \int_{\bar{A}_b} (d\sigma_b / d\varepsilon_b) C_{yz} d\varepsilon_b dA_b$$

Comme $d\varepsilon_b = -L_{yz} d\delta$, dR_b se présente sous la forme du produit d'une intégrale matricielle DR_b par le vecteur $d\delta$:

$$\begin{aligned} dR_b &= DR_b d\delta \\ DR_b &= \int_{\bar{A}_b} (d\sigma_b / d\varepsilon_b) M_{yz} dA_b \end{aligned}$$

Si σ_b est une fonction polynômiale de ε_b (y, z), le calcul de R_b et DR_b se ramène à celui d'intégrale du type :

$$M_i^j = \int_{A_b} y^j z^{(i-j)} dydz \quad \text{avec } 0 \leq i \leq (k+1) \text{ et } k = \text{degré du polynôme } \sigma_b(\varepsilon_b)$$

$(0 \leq j \leq i)$

Pour $i < 2$ les M_i^j correspondent aux caractéristiques mécaniques usuelles de la section $\bar{A}_b$: aire, moments statiques et moments d'inertie dans le repère de définition Oyz.

Il suffit en fait que σ_b soit polynômiale par morceaux. L'intégrale sur $\bar{A}_b$ se remplace alors par une somme d'intégrales sur des surfaces dont chacune est l'intersection de la surface totale de béton A_b par une bande du plan Oyz délimitée par deux droites d'équation $\varepsilon_b = \text{constante}$.

Par exemple, dans le cas de la loi parabole rectangle, $\bar{A}_b$ est constituée de la section A_{bl} correspondant aux déformations ε_b comprises entre zéro et ε_{bp} et la section A_{bll} correspondant aux déformations comprises entre ε_{bp} et ε_{bu} .

On se limite à des lois de comportement $\sigma_b(\varepsilon_b)$ polynômiales définies sur un ou deux intervalles de déformations. Le vecteur R_b et la matrice DR_b se déduisent alors des caractéristiques M_i^j des sections A_{bl} , et A_{bll} s'il y a lieu.

La section étant décrite par contours polygonaux, les sections A_{bl} et A_{bll} sont des polygones décomposables en trapèzes construits à partir des segments de leurs frontières et des projections 2 à 2 des points qui les délimitent sur les axes du repère de définition.

IX.3 - Sollicitations internes dues aux aciers passifs

Par définition, on associe à chaque armature passive, un diamètre nominal Φ_n , une loi de comportement $\sigma_s(\varepsilon_s)$ et un indice qui indique si l'armature comprimée doit être négligée ou non dans les calculs.

Les sollicitations internes dues aux armatures passives peuvent s'écrire globalement sous la forme d'un vecteur R_s défini par :

$$R_s = - \int_{\bar{A}_s} \sigma_s(\varepsilon_s) C_{ys} dA_s$$

$\bar{A}_s$ désigne la section d'armatures passives totale.

R_s dépend de δ par l'intermédiaire de σ_s et de la section $\bar{A}_s$. Lorsque δ varie de $d\delta$, R_s varie de dR_s qui, si on néglige la variation de $\bar{A}_s$, s'exprime par :

$$dR_s = - \int_{\bar{A}_s} (d\sigma_s / d\varepsilon_s) C_{ys} d\varepsilon_s dA_s$$

Comme $d\varepsilon_s = -L_{yz} d\delta$, dR_s se présente sous la forme du produit d'une intégrale matricielle DR_s par le vecteur $d\delta$.

$$dR_s = - DR_s d\delta$$

$$DR_s = - \int_{\bar{A}_s} (d\sigma_s / d\varepsilon_s) M_{yz} dA_s$$

Chaque armature étant considérée comme ponctuelle de section A_{si} , dans les précédentes formules les symboles $\int_{\bar{A}_s} dA_s$ sont remplacés par la sommation : $\sum A_{si}$, on a ainsi :

$$R_s = - \sum_{A_s} A_{si} \sigma_s C_{yz}$$

$$DR_s = - \sum_{A_s} A_{si} (d\sigma_s / d\varepsilon_s) M_{yz}$$

Dans le programme CDS, les armatures passives peuvent aussi être définies par leur diamètre.

IX.4 - Déformation de la section à l'équilibre

L'équation d'équilibre traduit l'égalité entre sollicitations et sollicitations internes :

$$S = R_b + R_s$$

S étant fixé, on recherche le vecteur déformation δ qui correspond à l'équilibre de la section. Puisque nous savons résoudre le problème inverse, c'est-à-dire calculer les sollicitations internes R_b et R_s à vecteur δ donné, nous déterminons la déformation à l'équilibre par itérations selon la méthode de l'application linéaire tangente, en partant d'une déformation δ_0 . A l'étape k , on calcule les sollicitations internes :

$$R(\delta_{k-1}) = R_b(\delta_{k-1}) + R_s(\delta_{k-1})$$

Ainsi que leur gradient :

$$DR(\delta_{k-1}) = DR_b(\delta_{k-1}) + DR_s(\delta_{k-1})$$

On obtient alors localement une valeur approchée des sollicitations internes en posant :

$$R(\delta) = R(\delta_{k-1}) + DR(\delta_{k-1})(\delta - \delta_{k-1})$$

A l'équilibre, les sollicitations internes sont égales à S , d'où :

$$\delta_k = \delta_{k-1} + [DR(\delta_{k-1})]^{-1}(S - R(\delta_{k-1}))$$

Une dizaine d'itérations au maximum suffisent généralement à assurer la convergence.

Si on part d'un vecteur de déformation δ_0 nul, δ_1 correspond à la déformation que subirait la section sous sollicitations S si ses constituants avaient un comportement parfaitement élastique avec des modules d'élasticité égaux aux pentes à l'origine des diagrammes des lois de comportements réelles. Le calcul diverge si $DR(\delta_{k-1})$ n'est pas inversible (exemple : écoulement plastique en compression simple).

IX.5 - Dimensionnement des aciers passifs

L'optimisation des aciers est obtenue en modifiant l'algorithme du gradient de Newton–Raphson utilisé dans la recherche de l'équilibre d'une section sous un effort imposé.

Pour ce faire, on va considérer que les sections d'acier $S_1, \dots, S_n$, des n zones dimensionnables sont susceptibles de varier d'une itération à l'autre et on va commencer par chercher un état de départ avec des valeurs de $S_1, \dots, S_n$, suffisamment grandes pour qu'il soit possible d'équilibrer les N_s sollicitations faisant l'objet de l'optimisation. Si cet état de départ ne peut être trouvé, la section sera déclarée « non dimensionnable » (ce cas n'est pas rare, par exemple, s'il n'existe pas d'aciers là où la reprise de tractions est nécessaire). Dans le cas contraire, les N_s déformations trouvées servent de départ à la suite de l'algorithme.

Ensuite, comme dans la méthode de Newton–Raphson, on se place à l'itération i et on cherche les nouvelles conditions initiales pour l'itération $i+1$. Ces conditions initiales sont données par de nouvelles valeurs des N_s déformations et des n sections d'acier. À chaque itération, l'optimisation des sections d'acier est effectuée par utilisation de l'algorithme du simplexe.

Étant donné que toutes les sollicitations sont traitées de la même manière, on ne s'intéressera dans la suite qu'à l'une quelconque d'entre elles « k » (rappelons qu'à chaque sollicitation correspondent un état limite et à un état de la section particuliers).

IX.5.1 - Contrôle de la variation des sections d'aciers

Soient $\bar{S}_i = \begin{bmatrix} S_{1,i} \\ \dots \\ S_{n,i} \end{bmatrix}$ les sections d'aciers obtenues à l'itération i , et $\overline{\Delta S}_i = \begin{bmatrix} \Delta S_{1,i} \\ \dots \\ \Delta S_{n,i} \end{bmatrix}$ les variations de sections à

l'étape i , on doit évidemment vérifier les n inéquations suivantes :

$$\overline{S}_i + \overline{\Delta S}_i \geq 0 \Leftrightarrow -\overline{\Delta S}_i \leq \overline{S}_i$$

IX.5.2 - Contrôle du respect des déformations limites

Soit j un point de contrôle d'une zone, supposée soumise à une prédéformation D_z , on doit respecter :

$$\varepsilon_{\min} \leq \dot{V}_{yz,j} \cdot (D_i + \Delta D_i + D_z) \leq \varepsilon_{\max} \Leftrightarrow \varepsilon_{\min,j,i} \leq \dot{V}_{yz,j} \cdot \Delta D_i \leq \varepsilon_{\max,j,i}$$

avec :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\min,j,i} &= (\varepsilon_{\min} - \dot{V}_{yz,j} \cdot D_z) - \dot{V}_{yz,j} \cdot D_i \\ \varepsilon_{\max,j,i} &= (\varepsilon_{\max} - \dot{V}_{yz,j} \cdot D_z) - \dot{V}_{yz,j} \cdot D_i \end{aligned}$$

soit un ensemble de $6.N_s.N_p$ inégalités à respecter, N_p étant le nombre total de points de contrôle (d'où l'intérêt de limiter ceux-ci au maximum).

IX.5.3 - Matrice tangente de la section

L'égalité $E_i + R_i \cdot \Delta D_i = E_F$ de la méthode de Newton–Raphson est remplacée pour chaque sollicitation « k » par une égalité plus générale faisant intervenir la variation des sections d'acier :

$$E_i + M_{A,i} \cdot \overline{\Delta S}_i + R_i \cdot \Delta D_i = E_F$$

$M_{A,i}$ étant une matrice $3 \times n$, facile à calculer, dont chaque colonne traduit la variation d'efforts internes induite par une variation de la surface de la zone dimensionnable correspondante. Il est à noter que cette variation est réellement linéaire pour D_i fixé, c'est à dire que :

$$\Delta E = M_{A,i} \cdot \overline{\Delta S}_i \quad \forall \overline{\Delta S}_i$$

IX.5.4 - Utilisation de l'algorithme du Simplexe

Si on considère $\Delta S_{1,i}, \dots, \Delta S_{n,i}, \Delta D_{1,i}, \dots, \Delta D_{N_s,i}$, les conditions données ci-dessus constituent un simplexe comportant $n + 3 N_s$ variables, avec $n + 6.N_s.N_p$ inégalités et $3.N_s$ égalités. L'optimisation de ce simplexe pour la fonctionnelle :

$$F = \min (\Delta S_1 + \dots + \Delta S_n)$$

donnera les variations par rapport à l'état initial de l'itération qui retirent le maximum d'acier.

Il est alors possible d'entreprendre l'itération $i + 1$ avec l'état initial :

$$\begin{aligned} - \quad \overline{S}_{i+1} &= \overline{S}_i + \overline{\Delta S}_i \\ - \quad D_{k,i+1} &= D_{k,i} + \Delta D_{k,i} \end{aligned}$$

IX.5.5 - Critère d'arrêt

Théoriquement, les itérations devraient être arrêtées lorsque :

$$\begin{aligned} - \quad |\overline{\Delta S}_i| &\leq 0 \\ - \quad |\Delta D_{k,i}| &\leq \varepsilon \cdot |D_{k,i}| \quad k=1 \dots N_s \end{aligned}$$

En pratique, compte tenu de la propriété de linéarité des matrices $M_{A,i}$ évoquée ci-dessus, seule la seconde condition est nécessaire. En effet, si l'on a trouvé une solution convergente en déformations, c'est à dire telle que :

$$E_i + M_{A,i} \cdot \overline{\Delta S}_i = E_F$$

on sait que pour la section de départ de l'itération suivante $\overline{S}_{i+1} = \overline{S}_i + \overline{\Delta S}_i$, on aura $E_{i+1} = E_F$.

IX.6 - Flexion composée déviée en béton précontraint par post-tension

IX.6.1 - Présentation générale

Dans le cas d'une section précontrainte les sollicitations appliquées sont les sollicitations permanentes G, les sollicitations de précontrainte P et des sollicitations variables Q. G et P sont en général appliqués avec un module instantané ou différé du béton pour obtenir successivement un état permanent de court terme et un état permanent de long terme. Les charges Q doivent, elles, être calculées avec un module instantané. Se pose alors dans le cas d'un état permanent différé, le problème de l'application de la charge Q puisque sous G+P nous utilisons une loi différée et sous Q une loi instantanée. L'Eurocode est muet sur cette problématique alors que le BPEL proposait la méthode du retour à l'état 0. Deux méthodes sont proposées dans le logiciel CDS :

- La méthode de la pondération de la loi qui consiste à utiliser une même loi de comportement du béton sous G+P et Q obtenue par pondération des lois instantanées et des lois différées.
- La méthode BPEL du retour à l'état zéro.

IX.1.1 - Calcul BP - Pondération de la loi

Ce calcul utilise une loi de comportement du béton intermédiaire entre la loi instantanée et la loi différée : ces deux lois sont pondérées à l'aide d'un coefficient égal au rapport entre charges permanentes et charges d'exploitation (cf ci-dessous Module du béton).

Alors un calcul direct de l'état final est conduit à partir de l'état permanent :

- L'état de contrainte déformations existant dans le béton et les aciers passifs à l'état permanent résulte de la recherche de l'équilibre sous G : les armatures de précontrainte ne participent pas à la reprise des efforts permanents dans le cas de la précontrainte étudiée: précontrainte par post-tension.
- A partir de cet état, on recherche les variations de déformations et de contraintes dans le béton, les aciers passifs et les armatures de précontrainte qui permettent d'équilibrer la surcharge Q.

$$\text{En résumé : } 0 \xrightarrow{\text{pond}} G \xrightarrow{\text{pond}} G + Q$$

Durant toutes les étapes de calcul la loi de comportement du béton $f_b(eps)$ est la loi pondérée du béton.

Sous les charges permanentes, on détermine le vecteur déformation (D_x, R_y, R_z) de la section qui permet de calculer la déformation en tous points du béton ou des aciers passifs par $eps(y, z) = D_x + R_y z - R_z y$.

$$G = \iint f_b(eps(y, z)) \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{pmatrix} dA_b + \sum_i f_s(eps(y_i, z_i)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_i \\ -y_i \end{pmatrix} A_{s_i} + \sum_k f_p(eps_{pm}(y_k, z_k)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_k \\ -y_k \end{pmatrix} A_{p_k}$$

Sous l'ajout de surcharges, on calcule la variation de déformation de la section $(\Delta D_x, \Delta R_y, \Delta R_z)$ telle que

$$\begin{aligned}
Q = & \iint (f_b(eps(y,z) + \Delta eps(y,z)) - f_b(eps(y,z))) \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{pmatrix} dA_b \\
& + \sum_i (f_s(eps(y_i, z_i) + \Delta eps(y_i, z_i)) - f_s(eps(y_i, z_i))) \begin{pmatrix} 1 \\ z_i \\ -y_i \end{pmatrix} A_{s_i} \\
& + \sum_k \rho (f_p(eps_{pm}(y_k, z_k) + \Delta eps(y_k, z_k)) - f_p(eps_{pm}(y_k, z_k))) \begin{pmatrix} 1 \\ z_k \\ -y_k \end{pmatrix} A_{p_k}
\end{aligned}$$

Expression qui se réécrit :

$$\begin{aligned}
G + Q = & \iint f_b(eps^*(y,z)) \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{pmatrix} dA_b + \sum_i f_s(eps^*(y_i, z_i)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_i \\ -y_i \end{pmatrix} A_{s_i} \\
& + \sum_k \rho (f_p(eps_{pm}(y_k, z_k) - eps(y_k, z_k) + eps^*(y_k, z_k)) - f_p(eps_{pm}(y_k, z_k))) + f_p(eps_{pm}(y_k, z_k)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_k \\ -y_k \end{pmatrix} A_{p_k}
\end{aligned}$$

avec $eps^*(y,z) = eps(y,z) + \Delta eps(y,z)$

La méthode directe revient donc à effectuer un calcul de type BA, sous les charges totales et avec la participation à la résistance des aciers de précontrainte, mais avec une modification sur la loi de comportement des aciers de précontrainte : $\sigma = f_p(eps)$ est remplacée par $\sigma = \rho (f_p(eps_{pm}(y,z) - eps_G(y,z) + eps(y,z)) - f_p(eps_{pm}(y,z))) + f_p(eps_{pm}(y,z))$.

IX.1.2 - Méthode du retour à l'état 0 – option INSTANTANE

Un équilibre sous charges permanentes à l'aide de la loi différée du béton est conduit. A partir de cet état permanent, une décompression linéaire et instantanée du béton et des aciers passifs est appliquée avant de déterminer l'équilibre final sous charges totales de façon instantanée.

En résumé : $0 \xrightarrow{\text{diff}} G \xrightarrow{\text{decompression inst}} G \xrightarrow{\text{inst}} G + Q$

Les figures présentent les notations adoptées pour chaque état et respectivement pour le béton et pour l'acier.

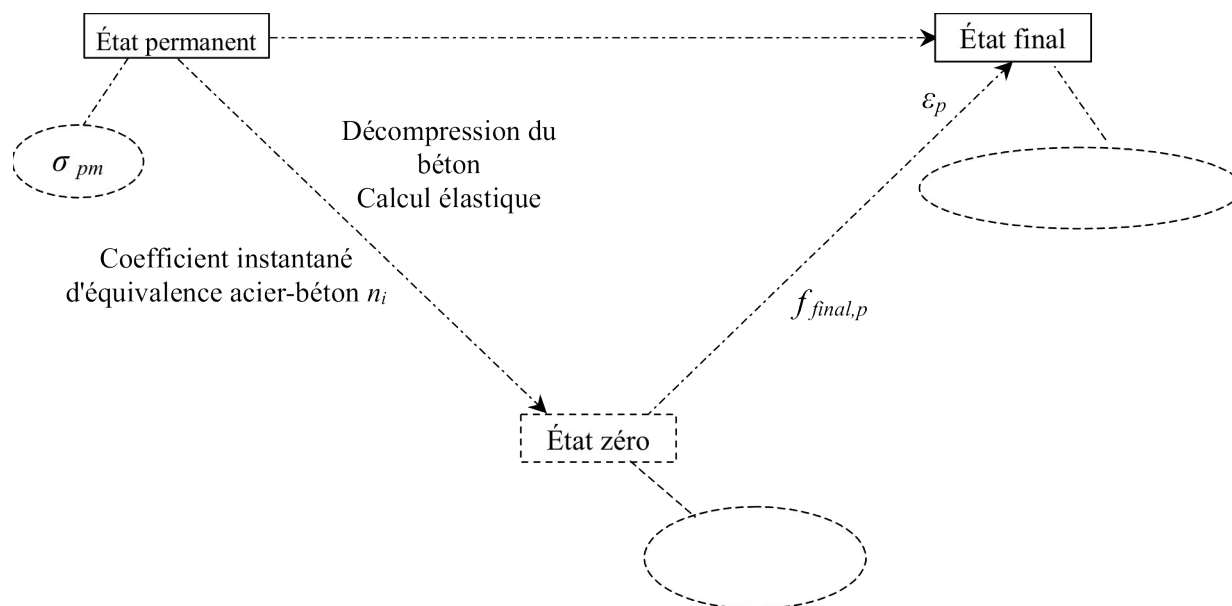


Figure 5 : retour à l'état 0

A l'état zéro, la déformation dans le béton s'annule et la tension dans l'acier de précontrainte est égale à : $\sigma_{pm} - n_i \sigma_{bpm}$ où n_i est le coefficient d'équivalence entre l'acier et le béton quand on considère les lois de comportement instantanées et σ_{bpm} représente la contrainte du béton au droit de l'armature à l'état permanent.

Ce passage par l'état 0 peut s'interpréter de la façon suivante : à partir d'un état permanent sous G+P obtenu avec la loi différée, on applique une sollicitation instantanée S_0 qui annule la déformation du béton. On est alors sous G+P+S₀. A partir de l'état ainsi obtenu (déformation nulle du béton et des aciers passifs) on recherche l'équilibre BA sous Q-S₀ ainsi la totalité des charges appliquées est G+P+Q+S₀-S₀ = G+P+Q. Le passage par l'état 0 permet de considérer :

- un béton initialement non sollicité et affecté d'une loi instantanée,
- des aciers passifs non sollicités initialement.
- Une loi de comportement des aciers de précontrainte décalée.

L'équilibre sous charge permanente est le même que précédemment. Sous les charges permanentes, on obtient le même vecteur déformation (D_x, R_y, R_z) de la section et les mêmes valeurs de déformation en tous points du béton ou des aciers passifs.

$$G = \iint f_b(eps(y,z)) \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{pmatrix} dA_b + \sum_i f_s(eps(y_i, z_i)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_i \\ -y_i \end{pmatrix} A_{s_i} + \sum_k f_p(eps_{pm}(y_k, z_k)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_k \\ -y_k \end{pmatrix} A_{p_k}$$

On calcule la contrainte dans le béton au droit de chacune des armatures de précontrainte : $\sigma_{bpm} = f_b(eps(y_k, z_k))$ puis on actualise la déformation au niveau de l'acier de précontrainte à l'état zéro,

$$\text{après décompression du béton : } eps_{pk}^{(0)}(y_k, z_k) = \frac{f_p(eps_{pm}(y_k, z_k)) - n\sigma_{bpm,k}}{\frac{df_p}{deps}(0)}$$

Dans les formules qui précèdent la loi de comportement du béton $f_b(eps)$ est soit la loi instantanée soit la loi différée selon que l'on fait une justification à la mise en service ou au temps infini, c'est-à-dire avec un module instantané ou avec un module différé.

Enfin, après cette hypothèse de retour à l'état zéro tant en contrainte qu'en déformation, pour le béton et les aciers passifs, on recherche un nouvel équilibre sous G+P+Q :

$$G + Q = \iint f_b(eps^+(y, z)) \begin{pmatrix} 1 \\ z \\ -y \end{pmatrix} dA_b + \sum_i f_s(eps^+(y_i, z_i)) \begin{pmatrix} 1 \\ z_i \\ -y_i \end{pmatrix} A_{s_i} + \sum_k \left(\rho(f_p(eps_{pk}^{(0)}(y_k, z_k) + eps^+(y_k, z_k)) - f_p(eps_{pk}^{(0)}(y_k, z_k))) + f_p(eps_{pk}^{(0)}(y_k, z_k)) \right) \begin{pmatrix} 1 \\ z_k \\ -y_k \end{pmatrix} A_{p_k}$$

Dans cette expression la loi de comportement du béton $f_b(eps)$ est la loi de comportement instantanée du béton puisqu'il s'agit d'un équilibre partiel sous Q. Là encore, on réalise un calcul de type BA sous les charges totales avec une modification de la loi de comportement des aciers de précontrainte :

$$\sigma = f_p(eps) \text{ est remplacée par } \sigma = \rho(f_p(eps_{pk}^{(0)}(y, z) + eps(y, z)) - f_p(eps_{pk}^{(0)}(y, z))) + f_p(eps_{pk}^{(0)}(y, z)).$$

Remarque : Cette option est en accord avec le deuxième commentaire du paragraphe 3.1.4.b du Guide Méthodologique Eurocode 2 du Sétra qui stipule que le même module de béton (sans préciser lequel) doit être utilisé pour la phase de retour à l'état 0 et pour le chargement final.

En toute rigueur pour que les calculs soient correctement conduits, il faudrait prendre en compte lors du retour à l'état 0 la variation des contraintes dans les aciers passifs mais cette variation est négligée. Ceci a pour conséquence qu'en présence d'aciers passifs et sous un chargement Q nul on ne retrouve pas au final l'état permanent antérieur dans le cas d'un chargement permanent de longue durée. Ce résultat logique est néanmoins surprenant pour l'utilisateur. C'est pourquoi l'option retenue par défaut est l'option IDENTIQUE ci-dessous.

IX.1.3 - Méthode du retour à l'état 0 – Option IDENTIQUE

La seule différence avec la méthode ci-dessus est que le retour à l'Etat 0 et le chargement final sont réalisés avec la même loi pour le béton que celle utilisée pour obtenir l'état permanent. Cette option déroge donc aux prescriptions du BPEL. Elle est néanmoins proposée par défaut car pour un Chargement Q nul, elle permet de retrouver au final l'état de contrainte obtenu sous G+P en présence d'aciers passifs que l'état permanent soit de courte ou de longue durée.

Remarque : Cette option, comme la précédente, est en accord avec le deuxième commentaire du paragraphe 3.1.4.b du Guide Méthodologique Eurocode 2 du Sétra qui stipule que le même module de béton (sans préciser lequel) doit être utilisé pour la phase de retour à l'état 0 et pour le chargement final.

IX.1.4 - Inclinaison des câbles sur la normale à la section

L'inclinaison des câbles de précontrainte n'est pas prise en compte dans la version actuelle de CDS.

IX.7 - Flexion composée déviée en béton précontraint par pré-tension

La seule différence entre la post tension et la pré-tension résulte de l'application de G. Alors qu'en post-tension G est concomitant à P, dans le cas de la pré-tension, G est concomitant à Q en l'absence d'un phasage de construction plus précis. Toute la présentation relative aux calculs en post-tension est applicable moyennant cette distinction.

Chapitre XI - Justification aux Eurocodes

Nous présentons ici les lois de comportement des matériaux définies dans les Eurocodes et prédéfinies dans CDS.

Pour chaque matériau standard : Béton, acier passif et acier de précontrainte, CDS construit une batterie de lois de comportement des matériaux qui seront activées en fonction des états limites des sollicitations appliquées aux sections et de la situation correspondante :

Etats limites	ELS Quasi permanent	ELS Fréquent	ELS Caractéristique	ELS Quasi permanent	ELS Fréquent	ELS Caractéristique	ELU
Situation de projet	Béton non fissuré			Béton fissuré			
Exploitation à la mise en service	X	X	X	X	X	X	X
Exploitation au temps infini	X	X	X	X	X	X	X
Construction	X	X	X	X	X	X	X
Accident							X
Séisme							X

Tableau des situations de projet et des états limites

X.1 - Lois de comportement du Béton

X.1.1 - Calcul ELU

X.1.1.1 - Loi de comportement parabole-rectangle

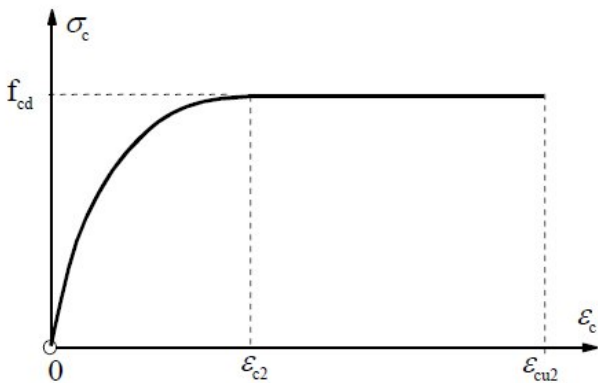


Figure 6 : Loi de comportement béton ELU de type parabole-rectangle

CDS calcule automatiquement la valeur de ϵ_{c2} , qui est égale à 0.002 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa et à $\epsilon_{c2} = 0.002 + 8.5 \cdot 10^{-5} (f_{ck} - 50)^{0.53}$ lorsque $f_{ck} \geq 50$ MPa.

De la même manière, le logiciel calcule la valeur de ε_{cu2} (notée Ecu dans CDS), qui est égale à 0.0035 par pour $f_{ck} \leq 50$ MPa et à $\varepsilon_{cu2} = 0.0026 + 0.035 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4$ lorsque $f_{ck} \geq 50$ MPa.

Pour le calcul de la contrainte limite en compression du béton f_{cd} , qui ne dépend plus du coefficient θ de durée d'application de la charge, CDS applique : $f_c = f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_b}$ avec $\alpha_{cc} = 1.0$ (par défaut).

Par ailleurs, la loi de comportement parabole-rectangle implémentée par défaut dans CDS est de degré 2 pour $f_{ck} \leq 50$ MPa, c'est-à-dire avec $n = 2$ dans l'expression $\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right]$ (pour $0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$).

lorsque $f_{ck} > 50$ MPa, Cds prend n inférieur à 2, selon l'expression : $n = 1.4 + 23.4 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4$

X.1.1.2 - Loi de comportement de type Sargin

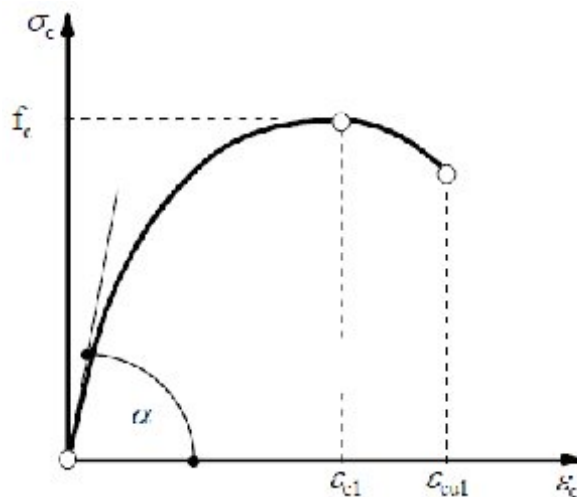


Figure 7 : Loi de comportement béton ELU de type Sargin

CDS calcule les valeurs de ε_{c1} et de ε_{cu1} selon les formules données par l'Eurocode 2 :

$$\varepsilon_{c1} = 0.7 f_{cm}^{0.31} \leq 2.8 \text{ en } \text{‰} \text{ et } \varepsilon_{cu1} = 2.8 + 27 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4 \text{ en } \text{‰} \text{ pour } f_{ck} \geq 50 \text{ MPa (0.0035 sinon).}$$

Le coefficient k constitue un paramètre de calcul pour la loi de comportement du béton de type Sargin, qui

s'écrit $\sigma_c = f_c \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k-2)\eta}$ $\eta = \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}$. Ce coefficient vaut $k = 1.05 E_{cd} \frac{|\varepsilon_{c1}|}{f_{cd}}$ avec $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{\gamma_{CE}}$ et $\gamma_{CE} = 1.2$

et est calculé automatiquement par le logiciel.

X.1.1.3 - Loi de comportement bilinéaire (élasto-plastique)

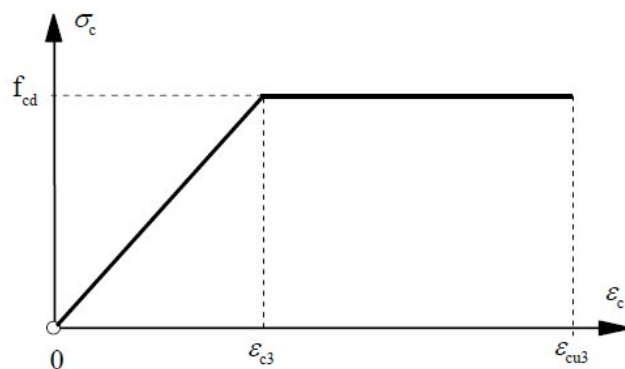


Figure 8 : Loi de comportement béton ELU de type élasto-plastique

CDS calcule la valeur de $\varepsilon_{cu3} = 0.0026 + 0.035 \left(\frac{90 - f_{ck}}{100} \right)^4$ si $f_{ck} \geq 50$ MPa et le fixe égal à 0.0035 sinon.

CDS calcule la valeur de $\varepsilon_{c3} = 0.00175 + 5.5 \cdot 10^{-4} \left(\frac{f_{ck} - 50}{40} \right)$ pour $f_{ck} \geq 50$ MPa et le fixe égal à 0.00175 sinon.

X.1.2 - Calcul ELS

X.1.2.1 - Généralités

Pour les calculs de béton armé ou précontraint à l'ELS, il est laissé à l'utilisateur le choix entre 3 méthodes d'évaluation des lois béton :

- r Une loi linéaire simplifiée utilisant le coefficient d'équivalence,
- r Une loi linéaire dite scientifique mais nécessitant de nombreux paramètres d'entrée. Cette méthode utilise les prescriptions de l'Eurocode pour l'évaluation à chaque instant du module court terme $E_{cm}(t)$ et du coefficient de fluage nécessaire à une étude long terme. Cette loi est la loi par défaut.
- r Une loi parabolique scientifique utilisant les mêmes paramètres que la loi linéaire

X.1.2.2 - Loi linéaire simplifiée

La méthode simplifiée applicable aux lois ELS de béton armé ou précontraint est proposée dans l'Eurocode. Elle considère un module de béton calculé via un coefficient d'équivalence acier/béton $n = E_s/E_{cm}$ valant 5 à court terme et 15 à long terme. Dans Cds, cette méthode s'appuie sur la définition du module du béton à chaque situation d'étude via la commande `MODULE_IMPOSE_ELS` (commande avancée, modifiable par l'utilisateur). Les valeurs par défaut sont données ci-dessous, en supposant un module de 200 GPa pour les aciers.

Module imposé au béton Valeurs à utiliser suivant la situation	
Construction	• $n=5$
Exploitation à la mise en service	• $E_b = 200\ 000 / 5$ • $= 40\ 000$ MPa
Exploitation au temps infini	• $n=15$ • $E_b = 200\ 000 / 15$ • $= 13\ 333$ MPa

X.1.2.3 - Loi linéaire ou parabolique scientifique

Cette méthode utilise les lois de l'Eurocode pour déterminer les modules du béton à utiliser.

Les calculs aux Eurocodes dépendent de deux dates :

- l'âge t du béton lors de l'étude (qui correspond à la date où on applique les surcharges). On utilise cet instant pour calculer $f_{ck}(t)$, $f_{cm}(t)$ et $E_{cm}(t)$.
- l'âge t_0 du béton lors de l'application des charges permanentes. Cette date permet notamment de calculer le coefficient de fluage, ce qui permet de calculer $E_{c,eff} = \frac{E_{cm}(t)}{1+\varphi(t,t_0)}$.

Pour un calcul en section fissurée avec pondération de la loi de comportement du béton, on utilise le module pondéré $E_b(t)$ défini selon $E_b(t) = \xi E_{cm}(t) + (1 - \xi) E_{c,eff}(t) = \frac{1+\xi\varphi(t,t_0)}{1+\varphi(t,t_0)} E_{cm}(t)$ où le coefficient ξ dépend du rapport entre charges permanentes appliquées à t_0 et surcharges appliquées à t . Le module du béton serait $E_{c,eff}(t)$ s'il n'y avait que des charges permanentes et $E_{cm}(t)$ s'il n'y avait que des charges variables. Le coefficient ξ est fixé égal à 0.25 conformément à la valeur moyenne constatée sur la plupart des ouvrages concernés.

La variable t prend successivement toutes les valeurs précisées dans la liste des dates d'étude ci-dessus.

En particulier :

- pour $t = t_0$, on effectue un calcul court terme avec $E_b(t) = E_{cm}(t)$ puisque le coefficient de fluage est nul. On utilise donc le module instantané du béton.
- pour $t = \infty$, on effectue un calcul long terme avec $E_b(t) = \frac{1+\xi\varphi(\infty,t_0)}{1+\varphi(\infty,t_0)} E_{cm}(\infty)$.

Remarque : le module $E_{cm}(t)$ se calcule à l'aide de $f_{cm}(t)$:

- en mode dimensionnement : $f_{cm}(t) = e^{s[1-(28/t)^{1/2}]} f_{cm}$ si $t < 28$ et $f_{cm}(t) = f_{cm}$ sinon.
- en mode vérification de pathologie, $f_{cm}(t)$ se calcule par la formule $f_{cm}(t) = e^{s[1-(28/t)^{1/2}]} f_{cm}$.
- Les valeurs par défaut attribuées aux différents paramètres et selon la situation considérée sont rappelés ci-dessous.

Fluage : Valeurs par défaut
• hum : Humidité relative de l'air en pourcentage (70 par défaut). • rm : Rayon moyen de la section en mètres (0.25 par défaut) • Type de ciment : N (Normal) • Type de béton (présence de fumée de silice) : Normal

Fluage Valeurs par défaut suivant la situation	
Construction	$t_0=28$ jours $t=28$ jours => implique par défaut $\Phi = 0$ et $E_b(t) = E_{cm}(t)$
Exploitation à la mise en service	$t_0=28$ jours $t=28$ jours => implique par défaut $\Phi = 0$ et $E_b(t) = E_{cm}(t)$
Exploitation au temps infini	$t_0=28$ jours $t=36\,500$ jours $\xi = 0,25$ $E_b(t) = \frac{1+\xi\varphi(\infty, t_0)}{1+\xi\varphi(\infty, t)} E_{cm}(\infty)$.

X.1.2.4 - Loi de comportement linéaire

Concernant la contrainte limite en compression f_c du béton, plusieurs critères sont à considérer selon l'Eurocode 2 :

- limitation à $0.45 f_{ck}$ à l'ELS quasi-permanent, pour conserver la linéarité du fluage ;
- limitation à $0.60 f_{ck}$ à l'ELS caractéristique, pour éviter l'apparition de fissures longitudinales, pour les sections de béton soumises aux classes d'exposition XD, XF ou XS;
- limitation à $0.60 f_{ck}$ pour éviter la compression excessive du béton soumis aux charges lors de l'application de la précontrainte ;
- par ailleurs, la limitation à $0.60 f_{ck}$ à l'ELS caractéristique permet de se dispenser de vérification à la fatigue du béton comprimé pour les ponts routiers.

Concernant la contrainte limite du béton en traction, deux valeurs sont calculées : f_{tlim_hze} hors zone d'enrobage et f_{tlim_ze} en zone d'enrobage. Ces valeurs sont fonctions du critère de justification à respecter.

La zone d'enrobage des armatures de précontrainte au sens de l'EC2 est définie par une zone de 100 mm autour de la gaine ou de l'armature adhérente (prétension), dans laquelle des critères de vérification particuliers sont à respecter et qui n'est pas à confondre avec l'enrobage de l'armature au sens de la durabilité.

Par exemple, dans le cas où le critère de non décompression doit être respecté à l'ELS fréquent dans la zone d'enrobage du câble (cas des classes d'exposition XD ou XS), $f_{tlim_ze} = 0$ et $f_{tlim_hze} = -k.f_{ctm}$ (avec k coefficient à déterminer selon le critère que l'on veut respecter). Il est à noter que le critère d'absence de décompression aux ELS fréquents (avec P_m) permet de se dispenser de la vérification à la fatigue des armatures de précontrainte et de béton armé.

En outre, en construction, l'article 113.3.2(103) de la NF EN 1992-2 permet une décompression à l'ELS quasi-permanent en zone d'enrobage, avec $\sigma_c \geq -f_{ctm}$. Ainsi, aux phases de construction, Cds fixe f_{tlim_ze} égal à $-f_{ctm}$.

X.2 - Lois de comportement des aciers passifs

X.2.1 - Calcul ELU

X.2.1.1 - Lois de comportement bilinéaires

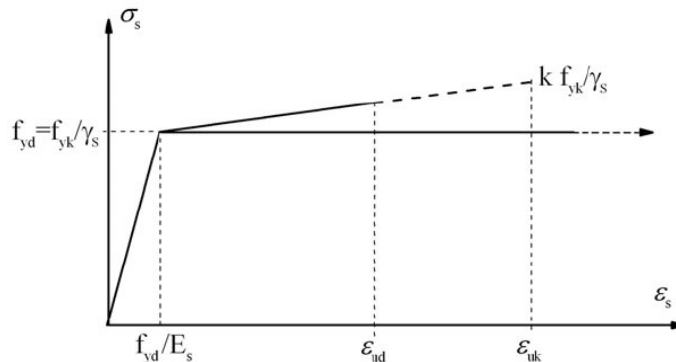


Figure 9 : Loi de comportement acier passif ELU de type bilinéaire (avec ou sans raffermissement)

Un choix (laissé libre par l'Eurocode) est à opérer par l'utilisateur entre :

- la loi bilinéaire avec palier horizontal, auquel cas il faut, dans le menu CALCULER, donner une valeur unité au coefficient k et CDS calcule alors automatiquement les valeurs de f_t et f_{ser} selon $f_t = f_{ser} = f_{yk}/\gamma_s$; en revanche, l'utilisateur doit dans ce cas conférer à $\epsilon_{ud} = \epsilon_{uk}$ une valeur très élevée, par exemple 1.0, car la déformation de l'acier passif n'est pas limitée ;
- la loi bilinéaire avec raffermissement, auquel cas l'utilisateur doit indiquer à CDS la valeur de k à considérer (fonction de la classe de ductilité de l'acier passif, 1.08 en classe B et comprise entre 1.15 et 1.35 en classe C) et CDS calcule alors automatiquement les valeurs de f_t et f_{ser} selon :

$$f_t = f_{ser} + (k-1)f_{ser} \frac{\epsilon_{ud} - \epsilon_e}{\epsilon_{uk} - \epsilon_e} \quad \text{avec : } f_{ser} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} \quad \text{et : } \epsilon_e = \frac{f_{ser}}{E_s}$$

Par ailleurs, la valeur calculée par CDS de $\epsilon_{ud} = 0.9\epsilon_{uk}$ vaut toujours 4.5%, ce qui est valable lorsque $\epsilon_{uk} = 5\%$ en classe de ductilité B mais est modifiée lorsque l'acier est de classe de ductilité C, auquel cas $\epsilon_{uk} = 7.5\%$ et donc $\epsilon_{ud} = 6.75\%$.

X.2.2 - Calcul ELS

X.2.2.1 - Loi de comportement linéaire

Dans cette loi, il faut renseigner f_{tser} , à savoir la contrainte limite en traction de l'acier passif. Cette limite dépend du critère de vérification ELS que l'utilisateur se fixe :

- non plastification des armatures passives : $f_{tser} = 0.8 f_{yk}$ à l'ELS caractéristique ;
- maîtrise de la fissuration : $f_{tser} = 1000 w_k$ à l'ELS fréquent, avec w_k ouverture admissible des fissures à contrôler (soit en pratique : $f_{tser} = 300$ MPa en classe d'exposition XC et 200 MPa en classe d'exposition XD ou XS) ;
- $f_{tser} = 300$ MPa à l'ELS caractéristique (limitation forfaitaire pour dispense de calcul en fatigue des aciers passifs...).

X.3 - Lois de comportement des aciers de précontrainte

X.3.1 - Calcul ELU

X.3.1.1 - Lois de comportement bilinéaires

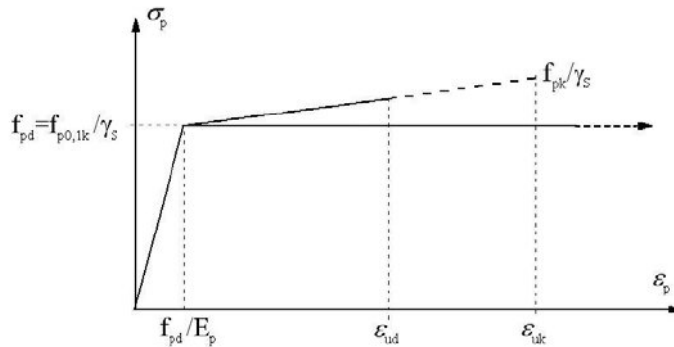


Figure 10 : Loi de comportement acier de précontrainte ELU de type bilinéaire (avec ou sans raffermissement)

Un choix (laissé libre par l'Eurocode) est à opérer par l'utilisateur entre :

- la loi bilinéaire avec palier horizontal, CDS calcule alors les valeurs de f_p et f_{ser} selon $f_p = f_{ser} = f_{p0,1k} / \gamma_s$;
- la loi bilinéaire avec raffermissement, auquel cas CDS fixe la valeur de k ($k = \frac{f_{pk}}{f_{p0,1k}} = 1,10$) et

calcule alors automatiquement les valeurs de f_p et f_{ser} selon :

$$f_p = f_{ser} + (k-1)f_{ser} \frac{\epsilon_{ud} - \epsilon_e}{\epsilon_{uk} - \epsilon_e} \quad \text{avec : } f_{ser} = \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s} \quad \text{et : } \epsilon_e = \frac{f_{ser}}{E_p}$$

Par ailleurs, Cds fixe ϵ_{ud} à 0.02. En théorie la valeur de ϵ_{ud} est égale $0.9\epsilon_{uk}$, en prenant $\epsilon_{uk} = 0.9A_{gt}$, où A_{gt} est le pourcentage minimum d'allongement à la force maximale et est donné égal à 3.5% par le projet de norme pr NF EN 10138-3, soit $\epsilon_{ud} = 0.9\epsilon_{uk} = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 3,5 = 2.835\%$.

Pour la valeur de $f_{p0,1k}$, l'Eurocode indique $f_{p0,1k} = 0.9 f_{pk}$, ce qui correspond sensiblement (à 1% près) au rapport k indiqué ci-dessus. Ainsi, pour un toron de classe 1860, on obtient $f_{p0,1k} = 1674$ MPa. Cependant, il est à noter que, si l'on se « réfère » au projet de norme pr NF EN 10138-3, on trouve $F_{p0,1} = 246$ kN pour un toron T15S de 150 mm² de section, soit :

$$f_{p0,1k} = \frac{F_{p0,1}}{150 \cdot 10^{-6}} = 1640 \text{ MPa}$$

Dans ce cas, c'est la condition $0.9f_{p0,1k}$ qui devient la plus restrictive (au lieu de $0.8f_{pk}$) pour la contrainte maximale dans les aciers de précontrainte lors de la mise en tension.

X.3.1.2 - Loi de comportement exacte

Il est également possible d'utiliser une loi représentant le diagramme réel du comportement des aciers de précontrainte.

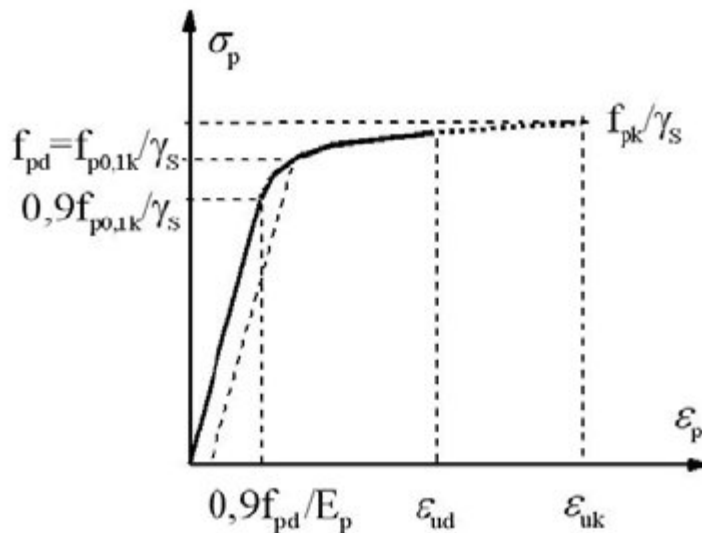


Figure 11 : Loi de comportement « réelle » de l'acier de précontrainte

Cette loi est linéaire de pente E_p pour $\sigma_p \leq 0,9 \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$ et d'expression $\varepsilon_p = \frac{\sigma_p}{E_p} + 100 \left(\frac{\sigma_p}{f_{p0,1k}} - 0,9 \right)^5$ pour $\sigma_p \geq 0,9 \frac{f_{p0,1k}}{\gamma_s}$.

Cette loi n'est pas implémentée dans CDS, il convient donc, si on veut l'utiliser, de la créer via le MATERIAU SPECIFIQUE à l'aide de l'outil de création d'une loi quelconque, en rentrant les coefficients des cubiques correspondantes.

X.3.2 - Calcul ELS

X.3.2.1 - Loi de comportement linéaire

CDS renseigne f_{ser} , contrainte limite en traction de l'acier de précontrainte, qui est fixée égale à $0,8 f_{pk}$ par l'annexe nationale de l'EC2 pour éviter la plastification des armatures.

Il est à noter ici qu'il n'y a pas dans l'Eurocode d'équivalent au critère de limitation de la surtension dans les câbles adhérents comme on le trouve en précontrainte partielle (classe III) au sens du BPEL.

Ceci nous permet de rappeler que l'Eurocode ne fait plus appel à la notion de classe de justification comme le faisait le BPEL. L'Eurocode 2 n'a pas reconduit la définition de niveaux discontinus : il passe de façon progressive d'une précontrainte partielle à une précontrainte totale, laissant l'entière liberté au concepteur. Il se contente de fixer un niveau minimal de précontrainte en fonction des conditions d'environnement et d'indiquer ensuite comment justifier la quantité d'aciers passifs nécessaire.

X.4 - Adhérence des aciers

Le logiciel CDS demande le coefficient d'adhérence à l'utilisateur pour chaque sollicitation et est donc dépendant de l'état limite considéré. Ce coefficient pilote la prise en compte des surtensions dans l'équilibre des sections.

Le guide d'application de l'Eurocode 2 recommande une valeur nulle pour la précontrainte adhérente pour une étude à l'ELS ou en fatigue en section non fissurée (pour ne pas prendre en compte les surtensions).

Le guide d'application de l'Eurocode 2 préconise, pour le calcul des contraintes aux ELS dans les aciers passifs des structures à **précontrainte partielle**, le calcul de l'état d'équilibre de la section en pondérant la surtension $\Delta\sigma_p$ dans les armatures de précontrainte par un coefficient ξ_1 (borné supérieurement à 1,0), ce coefficient ξ_1 faisant lui-même appel au coefficient ξ (rapport de la capacité d'adhérence des armatures de précontrainte à la capacité d'adhérence des armatures de béton armé) donné par le tableau ci-dessous (ou valeur à prendre dans l'ATE).

Armatures de précontrainte	ξ		
	pré-tension	post-tension, adhérentes	
		$\leq C50/60$	$\geq C70/85$
Barres ou fils lisses	sans objet	0,3	0,15
Torons	0,6	0,5	0,25
Fils crantés	0,7	0,6	0,3
Barres à haute adhérence	0,8	0,7	0,35
Note : Les valeurs intermédiaires entre C50/60 et C70/85 peuvent être interpolées			

Tableau de l'EC2 fournissant la valeur du paramètre ξ en fonction du type d'armature de précontrainte

Or, $\xi_1 = \sqrt{\xi \frac{\phi_s}{\phi_p}}$ avec ϕ_s le diamètre de la plus grosse armature passive et ϕ_p le diamètre équivalent de l'armature de précontrainte. De la sorte, ξ_1 n'est pas forcément égal à 0.5 (dans le cas général des torons).

Aux ELU le coefficient d'adhérence peut être fixé à 1 selon les Eurocodes.

X.5 - Justification du pivot 3

Le pivot 3 consiste à vérifier que la déformation au niveau du centre de gravité des sections ou des parois des caissons ne dépasse pas 0.002.

X.6 - Justification de la zone d'enrobage de la précontrainte

Cette justification est conduite automatiquement dans un périmètre de 100 mm autour du câble de précontrainte.

X.7 - Limitation simplifiée de la fissuration

Cette limitation est activée par défaut et elle consiste à limiter la contrainte dans les aciers à 1000 fois l'ouverture maximale des fissures.

X.8 - Justification simplifiée à la fatigue

Cette justification est conduite automatiquement en limitant les contraintes dans le béton et dans les aciers comme indiqué dans paragraphes relatifs à ces matériaux.

X.9 - Justification à la rupture fragile de la précontrainte

Cette justification n'est pas réalisée dans CDS.

Chapitre XII - Théorie des parois minces

XII.1 - Présentation

La théorie des parois minces mise en œuvre dans CDS est celle proposée par Michel MASSONI [1].

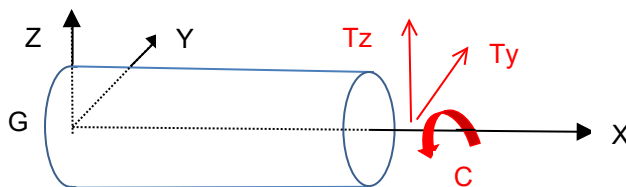
XII.2 - Hypotheses générales

- r La section peut se ramener à un assemblage de parois droites d'épaisseur constante ou variable linéairement connectées à des nœuds de jonctions de parois.
- r L'épaisseur des parois et leur variation est suffisamment faible eu égard aux longueurs des parois pour admettre l'hypothèse que les contraintes tangentes dans les parois sont parallèles à l'axe moyen de chaque paroi.
- r Les sections sont indéformables transversalement.
- r Les parois forment un réseau de barres connexes, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de sous ensemble de nœuds qui ne soit pas relié au reste des nœuds de la section.

XII.3 - Notations

On convient de noter :

- r s : la coordonnée curviligne d'un point courant le long de la fibre moyenne d'une paroi.
- r $e(s)$: l'épaisseur de la paroi à l'abscisse curviligne s : c'est une fonction linéaire de s .
- r N_n : le nombre de points de jonctions des parois.
- r N_p : Le nombre de parois.
- r G : le centre de gravité de la section.
- r Y et Z : les axes principaux de la section.
- r y et z : les coordonnées dans le repère principal GYZ d'un point courant le long de la fibre moyenne d'une paroi.
- r Y_i et Z_i : les coordonnées d'un point de jonction d'indice i .
- r (i,j) : les incidences d'une paroi ayant pour extrémité les points de jonctions d'indice i et j .
- r T_y et T_z : efforts tranchants du torseur de droite (action de la partie droite sur la partie Gauche) selon les directions Y et Z
- r C : Couple de torsion du torseur de droite positif de Y vers Z .

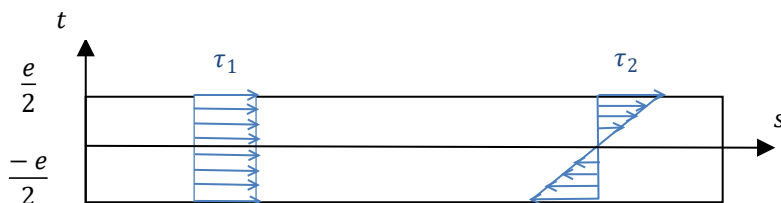


XII.4 - Champ de cisaillement de Torsion pure

On appelle état de torsion pure un état de contrainte dans lequel la section n'est soumise qu'à des cisaillements sous l'action d'un couple de torsion. Le calcul des déplacements dans le problème de Saint-Venant montre qu'il y a gauchissement des sections droites mais on admet que soit du fait de la forme de la section (section fermée) soit du fait des conditions aux limites, le gauchissement est libre.

L'examen des solutions exactes du problème de Saint-Venant [2] conduit à supposer que les cisaillements en un point courant d'abscisse curviligne s ont la répartition suivante dans l'épaisseur de la paroi :

$$\tau(s,t) = \tau_1(s) + 2 \frac{\tau_2(s)}{e} t \quad t \in \left[-\frac{e}{2}, \frac{e}{2}\right] \quad (1)$$



La contrainte d'indice 1 est donc symétrique (uniforme) dans l'épaisseur. La contrainte d'indice 2 est antisymétrique. La partie symétrique engendre un flux de cisaillement $\Phi_k = e\tau_1$ sur la paroi k . La partie antisymétrique n'engendre pas de flux.

L'équilibre des points de jonction implique la nullité de la somme vectorielle des flux entrants et sortants[1]. Ceci se traduit par l'équation suivante :

$$\sum_{k \in J_l^+} \Phi_k - \sum_{k \in J_l^-} \Phi_k = 0 \quad \forall l = 1, N_n \quad (2)$$

Où :

- J_l^+ : Ensemble des parois ayant le nœud l pour origine.
- J_l^- : Ensemble des parois ayant le nœud l pour extrémité.

Cette relation s'écrit matriciellement sous la forme :

$$M\Phi = 0 \quad (3)$$

Où :

- Φ : est le vecteur dont les composantes sont les Φ_k
- M : est la matrice d'équilibre des flux et est de dimension N_n lignes et N_p colonnes.

L'ensemble des parois forme un graphe orienté dont les sommets sont les points de jonction et dont les arcs orientés sont les lignes moyennes des parois orientés dans le sens curviligne croissant du point origine au point extrémité de la paroi. La relation $M\Phi = 0$ montre que Φ définit un flot sur le graphe qui a été supposé connexe. On peut alors démontrer que la dimension des espaces des flots est $N_p - N_n + 1$ [1]. Cette dimension est le degré hyperstatique de torsion. On peut également démontrer que le rang de M est $N_n - 1$: nombre cyclomatique des flux [1].

On choisit donc une sous matrice A de rang $N_n - 1$ déduite de la matrice M par élimination d'une des équations et l'on obtient un système de conditions indépendantes liant les Φ_k :

$$A\Phi = 0 \quad (4)$$

Φ : Est un vecteur de dimension N_p et donc A est une matrice rectangulaire comportant : N_p colonnes et $N_n - 1$ lignes.

La théorie de l'élasticité et l'analogie de la membrane de Prandtl [2] permettent d'écrire pour une paroi mince la relation :

$$\tau_2 = -G e \frac{d\theta}{dx} \quad (5)$$

Avec

- e : épaisseur de la paroi
- G : module de glissement
- $\frac{d\theta}{dx}$: rotation unitaire de la section

On montre que le couple de torsion ainsi équilibré sur une paroi mince par le cisaillement antisymétrique est :

$$C_a = - \int_0^l \frac{e^2}{3} ds \quad (6)$$

Compte tenu de l'indéformabilité de la section transversale on peut poser $\eta = \frac{\tau_2}{e} - G \frac{d\theta}{dx}$ identique pour toutes les parois. η : est donc uniquement dépendant de la rotation unitaire et du module de glissement.

Le potentiel élastique exprimé en contraintes d'une paroi [1] s'écrit alors :

$$\begin{aligned} W_k &= \frac{1}{2G} \iint_k \tau_2 dydz = \frac{1}{2G} \left(\int_k \tau_1^2 e ds + \int_k \frac{1}{3} \tau_2^2 e ds \right) \\ W_k &= \frac{1}{2G} \left(\phi_k^2 \int_k \frac{ds}{e} + \eta^2 \int_k \frac{e^3}{3} ds \right) \\ W_k &= \frac{1}{2G} (\phi_k^2 S_k + \eta^2 K_0^k) \end{aligned} \quad (7)$$

En posant :

$$S_k = \int_k \frac{ds}{e} \quad (8)$$

$$K_0^k = \int_k \frac{e^3}{3} \quad (9)$$

Soit pour toutes les parois :

$$W = \sum_{k=1}^{N_p} W_k = \frac{1}{2G} \sum_{k=1}^{N_p} [\phi_k^2 S_k + \eta^2 K_0] \quad (10)$$

Avec :

$$K_0 = \sum_{k=1}^{N_p} K_0^k = \sum_{k=1}^{N_p} \int_k \frac{e^3}{3} \quad (11)$$

W est une forme quadratique des variables ϕ_k et η . Après déformation, la section déformée ne présente aucune discontinuité, le théorème de Castigliano permet d'écrire [2] que la dérivée du potentiel élastique vis à vis des ϕ_k est nulle dans chaque paroi, ainsi que vis-à-vis de la variable η , ou autrement dit, que cette forme quadratique est minimale vis-à-vis de ces variables. Ce qui s'écrit :

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial \phi^k} &= \frac{1}{G} \phi_k S_k = 0 \\ \frac{\partial W}{\partial \eta} &= \frac{1}{G} K_0 \eta = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

Ce qui peut s'écrire matriciellement :

$$D'\Phi' = 0 \quad (13)$$

Avec :

$$D' = \begin{bmatrix} S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & S_k & \vdots \\ 0 & \cdots & K_0 \end{bmatrix} \text{ et } \phi' = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \vdots \\ \phi_{Np} \\ \eta \end{bmatrix} \quad (14)$$

ϕ' est un vecteur de dimension N_p+1 et D' est une matrice carrée de dimension N_p+1 .

L'équilibre entre les contraintes et le couple de torsion s'écrit :

$$C = \sum_{k=1}^{Np} \int_k \phi_k [(y - y_B) \sin \alpha - (z - z_B) \cos \alpha] ds - \eta \sum_{k=1}^{Np} \int_k \frac{e^3}{3}$$

Soit :

$$C = \sum_{k=1}^{Np} \phi_k B_k - \eta K_0 \quad (15)$$

Avec :

$$B_k = \int_k [(y - y_B) \sin \alpha - (z - z_B) \cos \alpha] ds \quad (16)$$

$$tg \alpha = \frac{dz}{dy}$$

Et y_B, z_B : coordonnées d'un point B quelconque.

Il est évident que B_k n'est autre que l'**aire sectorielle** [2] de la paroi k ayant pour origine le point B et pour pôle le centre de gravité.

On montre par la théorie des cycles [1] sur les graphes que C ne dépend pas explicitement des coordonnées du point B.

En résumé nous avons à résoudre le système (13) sous les contraintes d'équilibre (15) et les conditions (14) sur les flux, c'est-à-dire résoudre le système $D'\Phi' = 0$ avec les conditions :

$$C = \sum_{k=1}^{Np} \phi_k B_k - \eta K_0$$

$$A\Phi = 0$$

Ces deux égalités s'écrivent matriciellement :

$$A'\Phi' = Q' \quad (17)$$

Avec :

$$A' = \begin{bmatrix} & A & & 0 \\ & & & \vdots \\ B_1 & B_k & B_{Np} & -K_0 \end{bmatrix} \text{ et } Q' = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ C \end{pmatrix}$$

Q' est de dimension N_n et A' est rectangulaire et comporte N_p+1 colonnes et N_n lignes.

On obtient donc un double système matriciel : $D'\Phi' = 0$ et $A'\Phi' = Q'$.

Il s'agit donc d'un problème d'extrema liés que l'on résout par la méthode des multiplicateurs de Lagrange.

L'introduction des variables de Lagrange permet d'écrire le système à résoudre :

$$\begin{bmatrix} D' & {}^tA' \\ A' & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Phi' \\ \Lambda' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ Q' \end{pmatrix} \quad (18)$$

Avec le vecteur des variables de Lagrange de dimension N_n :

$$\Lambda' = \begin{pmatrix} \Lambda \\ \lambda_{nn} \end{pmatrix}$$

C'est donc un système de dimension $N_n + N_p + 1$ qui doit être résolu.

On peut éliminer dans (18) Φ' , en effet :

$$D' \phi' + {}^tA' \Lambda' = 0$$

D'où :

$$D' \phi' = - {}^tA' \Lambda'$$

Et :

$$\phi' = - D'^{-1} {}^tA' \Lambda'$$

Finalement en remplaçant dans (18) on obtient le système réduit :

$$A' D'^{-1} {}^tA' \Lambda' = - Q' \quad (19)$$

Dont la résolution permet d'obtenir le vecteur des variables de Lagrange: Λ' .

La raideur de torsion pure K et la rotation unitaire sont liées par la relation [2] :

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{C}{GK} \quad (20)$$

On en déduit facilement que :

$$\lambda_{nn} = \eta = - G \frac{d\theta}{dx} = - \frac{C}{K} \quad (21)$$

Si l'on pose :

$$\lambda_k = l_k \lambda_{nn}, k = 1, N_n - 1 \quad (22)$$

On peut écrire vectoriellement :

$$L = \begin{pmatrix} l_1 \\ l_k \\ l_{N_n-1} \end{pmatrix} = \Lambda / \lambda_{nn} \quad (23)$$

Du membre supérieur de l'équation générale (18), on déduit :

$$\phi_k^1 S_k - \frac{B_k}{K} + ({}^tA\Lambda)_k = 0$$

D'où

$$\phi_k^1 = \frac{B_k}{K S_k} - \frac{({}^tA\Lambda)_k}{S_k} \quad (24)$$

Posons $C = 1$ dans l'équation d'équilibre des contraintes (15) :

$$\sum_{k=1}^{N_p} \phi_k^1 B_k - \eta K_0 = 1$$

Remplaçons ϕ_k^1 par son expression :

$$\sum_{k=1}^{Np} \frac{B_k^2}{KS_k} - \frac{B_k ({}^tAL)_k}{S_k} - \eta K_0 = 1$$

En utilisant (21), il vient :

$$\sum_{k=1}^{Np} \frac{B_k^2}{KS_k} - \frac{B_k ({}^tAL)_k \lambda_{nn}}{S_k} - K_0 \lambda_{nn} = 1 \quad (25)$$

Or

$$K \lambda_{nn} = C = 1$$

On obtient par identification :

$$K = K_0 + \sum_{k=1}^{Np} \frac{B_k^2}{S_k} - \frac{B_k ({}^tAL)_k}{S_k} = K_0 + K_1 \quad (26)$$

Dans laquelle K_0 est la rigidité de torsion de cisaillement antisymétrique et K_1 est la rigidité de torsion symétrique. La première est négligeable devant la seconde pour les profils fermés et la dernière est nulle pour les profils ouverts.

Interprétation du vecteur L :

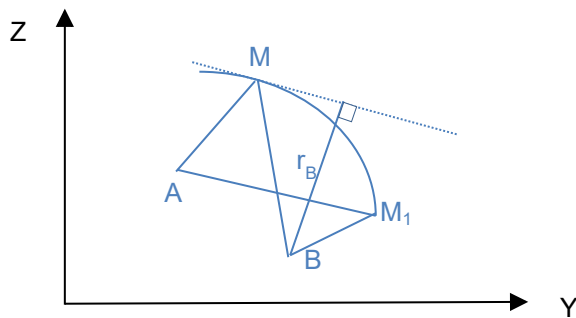
On peut écrire les N_p premières lignes du système (18) :

$$K \phi_k^1 S_k - B_k = - ({}^tAL)_k = (l_{ori} - l_{ext})_k \text{ pour } k = 1, Np \quad (27)$$

Notion de fonction sectorielle

On définit la fonction sectorielle de pôle B par sa différentielle :

$$d\omega_B = \overline{BM} \wedge \overline{ds} - \frac{1}{e} K \phi_k^1 ds = r_B ds - \frac{1}{e} K \phi_k^1 ds \quad (28)$$



Il s'en suit :

$$\omega_B(s) = \int_0^s r_B d\sigma - K \phi_k^1 \int_0^s \frac{d\sigma}{e} \quad (29)$$

Et

$$\omega_{kB}(s) = B_k - \frac{K \phi_k^1 S_k}{e} \quad (30)$$

$$B_k = \int_k r_B ds$$

Car comme on l'a vu précédemment B_k défini par (16) n'est autre que l'aire sectorielle. Ici c'est l'aire sectorielle de pôle B et d'origine M_1 .

On peut à partir de (27) et (30) assimiler l_i et ω_{Bi} et écrire :

$$\left(\omega_{B_{ori}} - \omega_{B_{ext}} \right)_k = K \phi_k^1 S_k - B_k \text{ pour } k = 1, Np \quad (31)$$

En convenant que le point sectoriel origine est le point éliminé de la liste des nœuds pour passer de la matrice M à la matrice A.

Remarque :

Lorsque l'on change de pôle :

$$d\omega_A - d\omega_B = \overrightarrow{AB} \wedge \overrightarrow{ds}$$

Si $M_1(y_1, z_1)$ est le point sectoriel origine alors :

$$\omega_A - \omega_B = (y_B - y_A)(z - z_1) - (z_B - z_A)(y - y_1) \quad (32)$$

La fonction sectorielle en un point M dépend de 3 paramètres qui définissent la position du pôle B : y_B et z_B et le point sectoriel origine.

On appelle fonction sectorielle principale la fonction sectorielle ϖ telle que :

$$\int \varpi y e ds = \int \varpi z e ds = \int \varpi e ds = 0 \quad (33)$$

Les deux premières équations définissent le pôle, la dernière la constante d'intégration correspondante au point sectoriel initial retenu.

Utilisation de la fonction sectorielle principale :

Les sections transversales sont supposées indéformables, on en déduit que sous l'action des charges appliquées la déformation se réduit à une rotation d'angle θ autour d'un point O du plan GYZ. Ce point est appelé centre de torsion.

On a[2] :

$$\frac{\tau}{G} = \gamma = \frac{\partial u}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial x}$$

Avec :

$$\begin{aligned} \tau &= C \left(\frac{\phi_k^1}{e} + 2\eta_1 t \right) \\ C &= GK \frac{d\theta}{dx} \\ v &= r_0 \theta \end{aligned}$$

Avec r_0 équivalent à r_B pour B en O.

Par conséquent :

$$\frac{\partial u}{\partial s} = \frac{\tau}{G} - \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\tau}{G} - \frac{r_0 d\theta}{dx} = - \frac{d\theta}{dx} \left(r_0 - \frac{K \phi_k^1}{e} - 2K\eta_1 t \right)$$

Sur le feuillet moyen $t = 0$ et on obtient :

$$u(x,s) = u(x,0) - \frac{d\theta}{dx} \left(\int_0^s r_0 ds - K\phi_k^1 \int_0^s \frac{d\sigma}{e} \right) = \frac{d\theta}{dx} \omega_0(s) \quad (34)$$

Or

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} \text{ et } \sigma = E\epsilon$$

Nous en déduisons les équations de nullité des sollicitations normales et de flexion :

$$\begin{aligned} E \frac{d^2 \theta}{dx^2} \int \omega_0(s) ds &= 0 \\ E \frac{d^2 \theta}{dx^2} \int y(s) \omega_0(s) ds &= 0 \\ E \frac{d^2 \theta}{dx^2} \int z(s) \omega_0(s) ds &= 0 \end{aligned} \quad (35)$$

On en déduit que ω_0 doit vérifier les propriétés de la fonction sectorielle principale et que donc le centre de torsion est le pôle sectoriel principal.

Soient Y_0 et Z_0 les coordonnées de ce pôle on montre facilement à l'aide des formules de changement de pôle en posant $A=0$ et $B=G$ que les relations (33) et (35) conduisent à :

$$\begin{aligned} Y_0 &= \frac{1}{I_y} \int z e \omega_g(s) ds \\ Z_0 &= \frac{1}{I_z} \int y e \omega_g(s) ds \end{aligned} \quad (36)$$

XII.5 - Effort tranchant

On admet que la résultante des sollicitations dans une section droite se réduit à un effort tranchant de composantes T_y et T_z selon les conventions de la figure xxxx. On se restreint à l'étude des profilés minces.

En l'absence d'efforts normaux ou de moments fléchissants répartis on montre par la considération des efforts de glissement que le flux de cisaillement pour toute surface Ω contenu dans la section droite est [2] :

$$\phi_{\partial\Omega} = - \left[\frac{T_y}{I_z} M_z(\Omega) + \frac{T_z}{I_{zy}} M_y(\Omega) \right] \quad (37)$$

Dans laquelle :

- I_y et I_z : sont les inerties principales de la section,
- $M_y(\Omega)$ et $M_z(\Omega)$: sont les moments statiques de la surface Ω dans le repère principal d'inertie.

On peut résoudre séparément les problèmes relatifs à T_y et ceux relatifs à T_z qui se déduisent formellement les uns des autres par permutation des variables Y et Z et obtenir les solutions complètes par superposition. On développe ici le problème relatif à T_y .

Sur une paroi mince d'épaisseur $e(s)$ on peut écrire le flux de cisaillement ϕ_k sous la forme :

$$\phi_k(s) = - \left[\frac{T_y}{I_z} m_z(s) \right] \quad (38)$$

Avec :

$$m_z(s) = m_z(0) + \int_0^s y(\sigma)e(\sigma) d\sigma = m_z(0) + \varphi_y(s) \quad (39)$$

En posant :

$$\varphi_y(s) = \int_0^s y(\sigma)e(\sigma) d\sigma \quad (40)$$

Avec les notations analogues à celles de la torsion, les relations de compatibilité nodales sont :

$$\sum_{k \in J_l^+} m_z^k(0) - \sum_{k \in J_l^-} m_z^k(0) = \sum_{k \in J_l^-} \int_k y(\sigma)e(\sigma) d\sigma = \sum_{k \in J_l^-} \varphi_y^k(s) \quad \text{pour } l = 1, N_n \quad (41)$$

On peut encore montrer que par la théorie des graphes [1], que pour un caisson multicellulaire, on n'a que $N_n - 1$ relations indépendantes parmi les N_n précédentes.

Le potentiel élastique de la paroi k s'écrit alors :

$$W_k = \frac{1}{2G} \left(\frac{T_y^2}{I_z^2} \int_k (m_z^k(0) + \varphi_y^k(s))^2 \frac{ds}{e} \right) \quad (42)$$

Et celui de la section est :

$$W = \sum_{k=1}^{Np} W_k \quad (43)$$

Il s'agit encore d'un potentiel quadratique en fonction des $m_z^k(0)$ que l'on doit minimiser sous les contraintes linéaires de compatibilité des flux.

Soit Λ le vecteur des multiplicateurs de Lagrange on obtient le système à résoudre :

$$\begin{bmatrix} D & {}^t A \\ A & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} M \\ \Lambda \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F \\ Q \end{pmatrix} \quad (44)$$

Où A est définie par (4) : et où :

$$D = \begin{bmatrix} S_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & S_k & \vdots \\ 0 & \cdots & S_{Np} \end{bmatrix}$$

$$M = \begin{pmatrix} m_z^1(0) \\ m_z^k(0) \\ m_z^{Np}(0) \end{pmatrix}$$

$$F = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_k \\ F_{Np} \end{pmatrix}, F_k = \int_k \frac{\varphi_y^k(s)}{e} ds$$

$$Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_j \\ Q_{Nn} \end{pmatrix}, Q_j = \sum_{k \in J_l^-} \varphi_y^k(s), j = 1, N_n - 1$$

A l'aide d'intégrations par parties sur chaque paroi, on peut montrer [1] que :

$$\int_k (y \sin \alpha - z \cos \alpha) m_z^k(s) ds = \int_k \omega_G y e ds \quad (45)$$

En effet, $(y \sin \alpha - z \cos \alpha)$ est la distance r_G qui apparaît dans l'expression de la différentielle $d\omega_G$ de la fonction sectorielle de pôle G et de point sectoriel initial, le point éliminé.

Détermination du centre de cisaillement :

C'est par définition, le point C de la section transversale par le quel doit passer l'effort tranchant pour que la section ne soit soumise à aucune Torsion. Soient Y_c et Z_c , les coordonnées de C dans le repère principal d'Inertie ; Le torseur des sollicitations en G se réduit à trois composantes : T_y , T_z et $C_g = T_z Y_c - T_y Z_c$.

Le couple résultant des flux de cisaillement est :

$$C_G = \sum_{k=1}^{Np} \int_k (y \sin \alpha - z \cos \alpha) \varphi_k(s) ds \quad (46)$$

On en déduit finalement que :

$$\begin{aligned} y_c &= \frac{1}{I_y} \sum_{k=1}^{Np} \int_k (y \sin \alpha - z \cos \alpha) m_y^k(s) ds = \frac{1}{I_y} \sum_{k=1}^{Np} \int_k \omega_G z e ds \\ z_c &= \frac{1}{I_z} \sum_{k=1}^{Np} \int_k (y \sin \alpha - z \cos \alpha) m_z^k(s) ds = \frac{1}{I_z} \sum_{k=1}^{Np} \int_k \omega_G y e ds \end{aligned} \quad (47)$$

On remarque que le centre de torsion O et le centre de cisaillement C sont confondus dans cette théorie. Cette dernière formule est une autre façon de démontrer l'égalité (45) car l'expression en ω_G de y_c et z_c est celle proposée dans la théorie classique des parois minces [2].

XII.6 - Torsion Non uniforme ou gênée[2]

On a vu que la torsion uniforme conduisait à un gauchissement libre des sections. La torsion non uniforme se caractérise, elle, par une variation longitudinale de la torsion ce qui se traduit par un gauchissement gêné de la section. Cette torsion non uniforme peut résulter d'un cas de charge ou de conditions aux limites empêchant le gauchissement libre de la section comme par exemple un encastrement. Ce gauchissement gêné conduit à des contraintes normales dans la section qui, elles-mêmes, engendrent une torsion secondaire noté ici T_3

Profils ouverts

La déformation longitudinale de gauchissement de la section sous la torsion seule est encore donnée par la formule (34)

$$u(x,s) = \omega_0(s) \frac{d\theta}{dx}$$

Et la contrainte longitudinale correspondante est donnée par la formule classique :

$$\sigma(x,s) = E \frac{\partial u(x,s)}{\partial x} = E \omega_0(s) \frac{d^2 \theta}{dx^2}$$

Cette contrainte liée au gauchissement est nulle si la dérivée seconde de la rotation est nulle c'est-à-dire si la torsion est uniforme.

Ces contraintes longitudinales induisent, elles aussi, une torsion secondaire qui peut être évaluée par l'équilibre d'une portion de paroi (Γ) et qui conduit à un flux de torsion ϕ_k^2 :

$$\phi_k^2 = \tau e = -E \frac{d^3\theta}{d^3x} \int_{\Gamma} e\omega_o ds = -E \frac{d^3\theta}{d^3x} S_{\omega} \quad (48)$$

Dans laquelle :

$$S_{\omega} = \int_{\Gamma} e\omega_o \quad (49)$$

est le **moment statique sectoriel**

Et une torsion T_3 secondaire égale à :

$$T_3 = E \frac{d^3\theta}{d^3x} \int_{\Gamma} e\omega_o^2 ds = E \frac{d^3\theta}{d^3x} I_{\omega} \quad (50)$$

Avec :

$$I_{\omega} = \int_{\Gamma} e\omega_o^2 ds \quad (51)$$

Appelée **Inertie sectorielle principale**.

Finalement la torsion totale est donnée par l'équation différentielle :

$$T = T_1 + T_2 + T_3 = GK \frac{d\theta}{dx} + EI_{\omega} \frac{d^3\theta}{d^3x} \quad (52)$$

Qui se résout facilement dans le cas d'une section de caractéristiques constantes [2] car il s'agit alors d'une équation différentielle linéaire à coefficients constants dont la solution est de la forme :

$$\theta(x) = A + Bch\alpha x + Csh\alpha x + \frac{1}{GK} \int_0^x [ch\alpha(x-t) - 1] T(t) dt \text{ avec } \alpha = \sqrt{\frac{GK}{EI_{\omega}}} \quad (53)$$

Les constantes d'intégration A, B, C sont déterminées par les conditions aux limites et dans le cas isostatique T est déterminé par le chargement de la poutre.

L'analyse des contraintes de gauchissement gêné fait apparaître un couple appelé **Bimoment** qui s'obtient par la formule suivante :

$$B = \int \sigma_x \omega_o dy dz = EI_{\omega} \frac{d^2\theta}{d^2x} \quad (54)$$

Ce couple est autoéquilibré.

En éliminant $\frac{d^2\theta}{d^2x}$ entre (47) et (52), on obtient la contrainte longitudinale en fonction du Bimoment :

$$\sigma(x,s) = E \frac{\partial u(x,s)}{\partial x} = E\omega_o(s) \frac{d^2\theta}{d^2x} = E\omega_o(s) \frac{B}{EI_{\omega}}$$

$$\sigma(x,s) = \omega_0(s) \frac{B}{I_\omega}$$

La résolution de l'équation différentielle (52) donne θ et sa dérivée seconde ce qui permet de déterminer le Bimoment à partir de l'Inertie sectorielle et finalement la contrainte en tout point de la section.

De ce qui précède on déduit facilement :

$$T_3 = EI_\omega \frac{d^3\theta}{dx^3} = \frac{dB}{dx} \quad (55)$$

Et

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = \frac{B}{I_\omega} \quad (56)$$

On remarquera l'analogie entre flexion et torsion gênée :

$$\begin{aligned} \frac{d^2\theta}{dx^2} &= \frac{B}{I_\omega}, & T_3 &= \frac{dB}{dx}, & \sigma &= \omega_0 \frac{B}{I_\omega} \\ \frac{d^2v}{dx^2} &= \frac{M}{I}, & F &= \frac{dM}{dx}, & \sigma &= y \frac{M}{I} \end{aligned}$$

On notera les homologues respectives entre M et B, y et ω_0 , I et I_ω .

Profils fermés

On ne peut pas reprendre la formule (34) car la contrainte n'est plus antisymétrique dans l'épaisseur [2]. Elle est remplacée par la formule suivante :

$$u(x,s) = \omega_0(s) \frac{d\chi}{dx} \quad (57)$$

Dans laquelle $d\chi$ est une fonction de x qui remplace $d\theta$.

La contrainte tangente est donnée par la formule :

$$\tau = -Gr \frac{d\theta}{dx} - G \frac{\partial w}{\partial s} = -Gr \frac{d\theta}{dx} + G(r - \frac{df}{dx}) \frac{d\chi}{dx} \quad (58)$$

Avec :

$$f = \frac{1}{e} K \phi_k^1 ds$$

Nous obtenons cette fois-ci une double équation différentielle :

$$T_3 = GI_c \frac{d\theta}{dx} + G(I_c - K_1) \frac{d^3\chi}{dx^3} \quad (59)$$

Avec l'**Inertie tangente polaire**:

$$I_c = \int_{\Gamma} e r^2 ds \quad (60)$$

La deuxième équation est la suivante.

$$T_3 = GK \frac{d\theta}{dx} + EI_\omega \frac{d^3\theta}{dx^3} \quad (61)$$

Ces deux équations se ramènent à l'équation en χ :

$$T_3 = EI_\omega \frac{d^3\chi}{dx^3} - kGK \frac{d\chi}{dx} \text{ avec } k = 1 - \frac{K}{I_c}$$

C'est une équation différentielle linéaire à coefficients constants dont la résolution donne la fonction χ . La solution est de la même forme que celle des sections ouvertes (53)

Une fois celle-ci déterminée on peut calculer :

$$\frac{d\theta}{dx} = \frac{d\chi}{dx} - \frac{1-k}{\alpha^2} \frac{d^3\chi}{dx^3} \quad (62)$$

Et finalement la torsion T_3 :

$$T_1 + T_2 = GI_c \frac{d\theta}{dx}$$

$$T_3 = T - T_1 - T_2$$

Et les contraintes supplémentaires induites par la torsion gênée :

$$\sigma(x,s) = E\omega_0(s) \frac{d^2\chi}{dx^2} \quad (63)$$

$$\tau_3 = G\left(r - \frac{df}{dx}\right) \frac{d\chi}{dx} \quad (64)$$

XII.7 - Bibliographie

[1] Michel MASSONI – Extension de la théorie de la torsion gênée aux sections multicellulaires ouvertes ou fermées – Annales des ponts et Chaussées – 2^{ème} trimestre 1979.

[2] J.A. CALGARO – M. VIRLOGEUX – Projet de construction de ponts – Analyse structurales des tabliers de Ponts – Presse de l'école Nationale des Ponts et Chaussées

Annexe A- Exemple de section BA

Exemple de ferrailage automatique d'une section rectangulaire en BA soumise à de la flexion simple aux ELU. Le ferrailage est positionné sur un lit avec un écartement maximal de 0.20 et minimal de 0.07 et des diamètres de 25 et 32 mm.

CDS

Definition des materiaux

MATERIAU BETON B35

FCK 35

TITRE "Beton B35"

PRECONTRAINTE NON

FIN_MATERIAU

MATERIAU ACIER acier500

Fyk 500

titre "acier 500"

FIN_MATERIAU

EDITER MATERIAUX TOUS

Definition des sections

SECTION sec_rectangulaire

TITRE "section rectangulaire"

CONTOUR contour_1

TITRE "contour externe"

RECTANGULAIRE LARGEUR 0.50 HAUTEUR 1.00 FIN_RECTANGULAIRE

FERRAILLAGE ferint1

OPTION_FERRAILLAGE_AUTOMATIQUE

DISPOSITION INFERIEURE STRICTE

E_MAX 0.20 E_MIN 0.07 SELECTION P_25 P_32 FIN_SELECTION

FIN_OPTION_FERRAILLAGE_AUTOMATIQUE

MATERIAU acier500

FIN_FERRAILLAGE

MATERIAU B35

FIN_CONTOUR

FIN_SECTION

EDITER SECTIONS TOUTES

Definition des sollicitations

SOLLICITATIONS flex_GQ SECTION sec_rectangulaire

TITRE "G+Q"

REPERE_EFFORTS BRUT

ETAT_LIMITE ELU DURABLE SITUATION EXPLOITATION SERVICE PONDERES

EFFORT GQ TITRE "GQ max" N 1.31274 My 1.951511 FIN_EFFORT

EFFORT GQ TITRE "GQ min " N 1.29056 My 1.21513 FIN_EFFORT

FIN_ETAT_LIMITE

FIN_SOLLICITATIONS


```
# Dimensionnement  
DIMENSIONNEMENT sec_rectangulaire  
    SOLLICITATIONS flex_GQ  
FIN_DIMENSIONNEMENT
```

```
# Justifications  
JUSTIFICATION sec_rectangulaire  
    INTERACTIONS  
    DEFORMATIONS NON_BORNEES  
    SOLLICITATIONS flex_GQ  
FIN_JUSTIFICATION  
FIN_CDS
```

Annexe B- Exemple de section BP

Exemple de section rectangulaire en béton précontraint avec des aciers et une précontrainte en fibre supérieure.

```

CDS
TITRE 'Section Precontrainte'
OPTION RETOUR_ETAT_0
TITRE 'Definition des materiaux'
MATERIAU
    BETON beton_35
    FCK    35
    TITRE "Beton 35"
    PRECONTRAINTE OUI
    FATIGUE_CRITERE_SIMPLIFIE TOUS OUI
FIN_MATERIAU
MATERIAU ACIER acier_420 #T10
    Fyk 420
    titre "acier 420"
    CONFINE OUI
FIN_MATERIAU
MATERIAU
    PRECONTRAINTE mat_prec
    FP01K    1330    # MPA
    FPK      1500    # MPA
    TITRE "precontainte"
FIN_MATERIAU
EDITER MATERIAUX TOUS
TITRE 'Definition de la section'
SECTION poutre_precontrainte
    titre "poutre precontainte rectangulaire"
    CONTOUR poutre
        titre "section rectangulaire"
        POINT
            NUMERO 1 Y  -1.9 Z  0
            NUMERO 2 Y   1.9 Z  0
            NUMERO 3 Y   1.9 Z  0.3
            NUMERO 4 Y  -1.9 Z  0.3
        FIN_POINT
        FERRAILLAGE Fer_global
            Titre "ferrailage global"
            POINT
                NUMERO 5 Y  -1.815 Z 0.264
                NUMERO 6 Y  -1.575 Z 0.264
                NUMERO 7 Y  -1.335 Z 0.264
                NUMERO 8 Y  -1.095 Z 0.264
                NUMERO 9 Y  -0.855 Z 0.264
            
```

```

        NUMERO 10 Y  -0.615  Z 0.264
        NUMERO 11 Y  -0.375  Z 0.264
        NUMERO 12 Y  -0.235  Z 0.264
        NUMERO 13 Y  -0.095  Z 0.264
            NUMERO 14 Y   0.135  Z 0.264
            NUMERO 15 Y   0.275  Z 0.264
            NUMERO 16 Y   0.415  Z 0.264
        NUMERO 17 Y   0.655  Z 0.264
        NUMERO 18 Y   0.895  Z 0.264
        NUMERO 19 Y   1.135  Z 0.264
        NUMERO 20 Y   1.375  Z 0.264
        NUMERO 21 Y   1.615  Z 0.264
        NUMERO 22 Y   1.815  Z 0.264
FIN_POINTS
DIAMETRE 8
MATERIAU acier_420
FIN_FERRAILLAGE
GAINE g
Titre "Gaine de precontrainte"
POINT
    NUMERO 23 y  -1.55 z 0.239 # Cable k
    NUMERO 24 y  -0.7 z 0.239 # Cable l
    NUMERO 25 y   0.35 z 0.239 # Cable l
    NUMERO 26 y   1.4 z 0.239 # Cable k

FIN_POINTS
Diametre 43.5
PRECONTRAINTe p
    Titre "Cable de precontrainte"
    POINT
        NUMERO 27 y -1.55 z 0.239 # Cable k
        NUMERO 28 y -0.7 z 0.239 # Cable l
        NUMERO 29 y  0.35 z 0.239 # Cable l
        NUMERO 30 y  1.4 z 0.239 # Cable k

FIN_POINTS
    AIRE 603.6 # mm2
    MATERIAU mat_prec
FIN_PRECONTRAINTe
FIN_GAINE
MATERIAU beton_35
FIN_CONTOUR
FIN_SECTION
EDITER SECTION poutre_precontrainte
TITRE 'Definition des Sollicitations'
SOLLICITATIONS sol_elu SECTION poutre_precontrainte

```

```
TITRE "sollicitations ELU service"
REPERE_EFFORTS BRUT
PRECONTRAINTE HYPERSTATIQUE POSTENSION
ETAT_LIMITE ELU DURABLE
    SITUATION EXPLOITATION INFINIE
    PONDERES
    EFFORTS GP TITRE "GP min" N 0 MY -0.19
        TENSIONS
        PRECONTRAINTE p POINT 27 TENSION 878 INJECTE 0.5 # Cable 1
        PRECONTRAINTE p POINT 28 TENSION 878 INJECTE 0.5 # Cable 1
        PRECONTRAINTE p POINT 29 TENSION 878 INJECTE 0.5 # Cable k
        PRECONTRAINTE p POINT 30 TENSION 878 INJECTE 0.5 # Cable m
        FIN_TENSIONS
    FIN_EFFORTS
    EFFORTS Q TITRE "Qmin" N 0 MY -1.665 FIN_EFFORTS
FIN_ETAT_LIMITE
FIN_SOLLICITATIONS
TITRE 'Dimensionnement'
DIMENSIONNEMENT poutre_precontrainte
    SOLLICITATION sol_elu
FIN_DIMENSIONNEMENT

TITRE 'Justification et diagramme d interaction'
JUSTIFICATION poutre_precontrainte
    INTERACTION
    SOLLICITATION sol_elu
FIN_JUSTIFICATION
FIN_CDS
```

Annexe C- Exemple de cisaillement de Caisson

Exemple de calcul des caractéristiques de cisaillement/torsion d'un caisson.

CDS

MATERIAU BETON BETON

TITRE ' Matériau beton fck = 43.55 '

FCK 43.55

PRECONTRAINTE non

FIN_MATERIAU

SECTION s2

TITRE ' SECTION S2 '

CONTOUR EXTERIEUR

TITRE 'CONTOUR EXTERIEUR'

POINTS

NUMERO	1	Y	5.0500	Z	1.2101
NUMERO	2	Y	2.6500	Z	1.2101
NUMERO	3	Y	2.0900	Z	1.2101
NUMERO	7	Y	-2.0900	Z	1.2101
NUMERO	8	Y	-2.6500	Z	1.2101
NUMERO	9	Y	-5.0500	Z	1.2101
NUMERO	10	Y	-5.0500	Z	1.0603
NUMERO	11	Y	-3.1500	Z	1.0274
NUMERO	12	Y	-2.6500	Z	0.7777
NUMERO	13	Y	-2.6500	Z	0.0537
NUMERO	15	Y	-2.6500	Z	-0.8901
NUMERO	16	Y	-2.6500	Z	-1.2696
NUMERO	17	Y	-2.0900	Z	-1.2696
NUMERO	20	Y	2.0900	Z	-1.2696
NUMERO	21	Y	2.6500	Z	-1.2696
NUMERO	22	Y	2.6500	Z	-0.8901
NUMERO	24	Y	2.6500	Z	0.0537
NUMERO	25	Y	2.6500	Z	0.7777
NUMERO	26	Y	3.1500	Z	1.0274
NUMERO	27	Y	5.0500	Z	1.0603

FIN_POINTS

EVIDEMENT evident

TITRE 'EVIDEMENT'

POINTS

NUMERO	28	Y	1.5900	Z	1.0583
NUMERO	29	Y	1.0000	Z	1.0703
NUMERO	30	Y	-0.0000	Z	1.0803
NUMERO	31	Y	-1.0000	Z	1.0703
NUMERO	32	Y	-1.5900	Z	1.0583
NUMERO	33	Y	-2.0900	Z	0.8087
NUMERO	35	Y	-2.0900	Z	-0.8901
NUMERO	40	Y	2.0900	Z	-0.8901

```

          NUMERO      42      Y      2.0900      Z      0.8087
    FIN_POINTS
    FIN_EVIDEMENT
    MATERIAU BETON
    FIN_CONTOUR
MORPHOLOGIE
    NOEUD 1
        CONTOUR exterieur    Point 2
        CONTOUR exterieur    Point 3
        CONTOUR evidement    Point 42
        CONTOUR exterieur    Point 25
    FIN_NOEUD
    NOEUD 2
        CONTOUR exterieur    Point 7
        CONTOUR exterieur    Point 8
        CONTOUR exterieur    Point 12
        CONTOUR evidement    Point 33
    FIN_NOEUD
    NOEUD 3
        CONTOUR exterieur    Point 15
        CONTOUR exterieur    Point 16
        CONTOUR exterieur    Point 17
        CONTOUR evidement    Point 35
    FIN_NOEUD
    NOEUD 4
        CONTOUR exterieur    Point 20
        CONTOUR exterieur    Point 21
        CONTOUR exterieur    Point 22
        CONTOUR evidement    Point 40
    FIN_NOEUD
    BRANCHES_PENDANTES
        CONTOUR exterieur    Point 9
        CONTOUR exterieur    Point 27
    FIN_BRANCHES_PENDANTES
    FIN_MORPHOLOGIE
    FIN_SECTION
    EDITER SECTION s2
    CISAILLEMENT section s2
        DISCRETISATION 0.1
        REPERE_EFFORTS GEOMETRIQUE
        EFFORTS 'ELU' FY 2 FZ 3 MX 4
    FIN_CISAILLEMENT
    FIN_CDS

```

Annexe D- Exemple de cisaillement de Charpente

Exemple de calcul des caractéristiques de cisaillement/torsion d'une charpente en I.

CDS

Titre "section Charpente en I "

MATERIAU

CHARPENTE A_cp

FY 32

Fu 35

TITRE "ACIER Charpente"

FIN_MATERIAU

Section S_I

titre "section en I"

Charpente Poutre

matériau A_cp

titre "Section en I"

POINTS

NUMERO 1 Y 0 Z 0

NUMERO 2 Y 0 Z 1

NUMERO 3 Y 1 Z 1

NUMERO 4 Y -1 Z 1

NUMERO 5 Y 1 Z 0

NUMERO 6 Y -1 Z 0

FIN_POINTS

PROFILS

NUMERO 1 ORIG 1 EXTR 2 EPAISSEUR 10

NUMERO 2 ORIG 1 EXTR 5 EPAISSEUR 20

NUMERO 3 ORIG 1 EXTR 6 EPAISSEUR 20

NUMERO 4 ORIG 2 EXTR 3 EPAISSEUR 20

NUMERO 5 ORIG 2 EXTR 4 EPAISSEUR 20

FIN_PROFILS

Fin_Charpente

Fin_section

EDITER SECTIONS TOUTES

CISAILLEMENT section S_I

DISCRETISATION 0.10

REPERE_EFFORTS GEOMETRIQUE

EFFORTS 'ELU' FY 2 FZ 3 MX 4

FIN_CISAILLEMENT

fin_cds